

能源与交通耦合的港口多能微网优化调度综述

侯慧^{1,2}, 谢应彪^{1,2}, 赵波³, 章雷其³, 谢长君^{1,2}, 董朝阳⁴

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学深圳研究院, 广东 深圳 518000;
3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 4. 香港城市大学电气工程系, 香港 999077)

摘要:能源与交通的耦合是港口多能微网未来发展趋势。然而,港口能源-交通耦合面临3类关键问题:如何厘清交通系统的协同调度潜力;如何应对能源侧与交通侧的调度随机性;如何发挥多能互补的调度灵活性。针对上述问题,综述了国内外港口能源-交通耦合研究现状。通过梳理能源-交通耦合下港口多个能源单元、交通单元的集成结构,总结了港口多能微网优化调度模型。分别论述港口能源-交通多网耦合、多能互补下的调度潜力、随机性及灵活性等方面研究成果,以进一步促进能源-交通耦合的综合效益优化与降碳绿色发展。探讨了港口多能微网发展面临的挑战,即港口不确定性精确刻画、港口交通柔性资源聚合、港口高碳排放属性转型、港口不同主体利益分配等问题。

关键词:港口多能微网;能源-交通耦合;调度潜力;调度随机性;调度灵活性

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202412035

0 引言

在港口电气化的背景下,能源侧与交通侧之间的深度耦合和高效互动促进了港口运营的综合效益优化与降碳绿色发展,使港口多能微网呈现出复杂的能源-交通耦合特性^[1]。从能源系统方面来看,交通领域的灵活性负荷资源可有力拓展港口消纳海上可再生能源的途径以及多能流融合的开发空间,在持续推动海上可再生能源发展的同时,实现港口能源系统低碳转型。从交通系统方面看,能源侧的多能供应有助于促进交通侧的能源结构改革与低碳经济发展。交通运输部印发的《绿色交通“十四五”发展规划》针对建设绿色港口、提升新能源设备占比等方面提出指导性建议。上海、江苏、浙江联合印发的《长三角生态绿色一体化发展示范区综合交通专项规划(2021—2035年)》提出,要从交通模式、交通装备、交通设施等方面协同推进交通领域节能降碳和绿色发展。

然而随着港口能源-交通耦合程度的加深,港口多能微网面临3类关键问题:①如何厘清交通系统的协同调度潜力;②如何应对能源侧与交通侧的调度随机性;③如何发挥多能互补的调度灵活性。目前,已有部分学者围绕上述关键问题展开研究。文献[1]提出港口能源管理计划,旨在揭示港口能源需求改进潜力及改进措施的预期收益。文献[2]立足

于降碳减排和建设绿色港口,从能源交易、碳处理流程、储能优化配置等方面推动港口低碳经济发展。然而,上述研究未深度剖析港口能源侧与交通侧的动态耦合过程。文献[3]从能源与交通两方面综述港口典型结构与运行特性,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。文献[4]针对电气化港口与船舶协调运行研究的不足,探讨停泊模型和航行模式下的港船分布式协调控制框架,并通过仿真模拟了船舶从孤岛航行模式到并网停泊模式的同步过程,但其忽视了交通设施对港口多能源开发潜力的有效支撑。综上,现有研究集中于港口能源管理与低碳发展、能源-交通融合运行框架、港船协调控制框架等整体层面,缺乏与港口多能微网优化调度接轨的具体角度,且未细化考虑港口能源-交通多网耦合、多能互补下的调度潜力、随机性及灵活性等。

鉴于此,本文参考现有港口研究的能源-交通融合典型架构^[1-4],采用现有陆基微网的优化调度分类标准^[5],聚焦港口能源-交通耦合面临的关键问题,综述了国内外港口能源-交通耦合研究现状。首先,梳理了港口多能微网结构与优化调度模型。其次,为厘清交通系统的协同调度潜力,分别从物流作业过程的协同调度潜力、交通侧柔性资源的需求响应潜力、船载微网的能源自洽与能量转移潜力等方面论述交通系统潜在的效能优化空间;为应对能源侧与交通侧的调度随机性,介绍了随机优化、鲁棒优化、分布鲁棒优化、人工智能算法等方法在港口不确定性场景中的应用;为发挥能源-交通耦合后多能互补的调度灵活性,论述了氢能、冷能等清洁能源的高效耦合转换与绿色交通供能特性。最后,对后续挑战进行了探讨。

收稿日期:2023-11-23;修回日期:2024-05-23

在线出版日期:2024-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177110);深圳市科技计划项目(JCYJ20210324131409026)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52177110) and Shenzhen Science and Technology Program(JCYJ20210324131409026)

1 港口多能微网结构及其优化调度模型

1.1 港口能源-交通耦合多能微网结构

港口作为多种交通方式的集散地和重要的物流运输枢纽,通过多能流互补特性、能量梯级利用等原则实现能源-交通互动。其基本结构由多个能源单元、交通单元等组合而成,如图 1 所示。

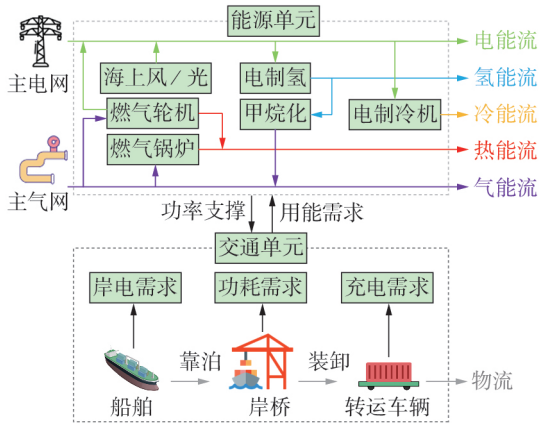


图 1 港口能源-交通耦合多能微网结构图

Fig.1 Structure diagram of port multi-energy microgrid with energy-transportation coupling

为反映港口电气化带来的运行灵活性,港口运行调度研究侧重点已从单一的交通系统角度转变为能源与交通耦合的角度。

从港口交通系统方面来看,船、车等交通工具的行为是复杂且随机的,包括续航里程、荷电状态、实时位置等。其次,港口交通网络的拓扑结构、交通状况、充电站位置等都会影响船、车等交通工具的路径选择,而其行驶路径及能源需求又决定港口能源系统的时空分布。

从港口能源系统方面来看,港口能源供应链主要包括能源获取、能源存储与转化、能源利用等环节。针对不同交通节点的能源需求差异,港口能源系统需根据交通运输特点及能耗特性进行匹配,同时兼顾能源供应时效性及低碳性,形成高度耦合、深度集成、富有弹性的港口多能微网。

1.2 港口能源-交通耦合优化调度模型

基于上述交通系统在能源交互、物流运输等方面呈现的特性,能源-交通耦合角度下的港口多能微网优化调度研究可从调度潜力、调度随机性及调度灵活性 3 个方面展开,如图 2 所示。其中,基本优化调度模型一般以总成本最小或可再生能源利用率最大等为目标,约束条件包括功率平衡约束、各子系统约束等。在建立基本优化模型的基础上,部分研究逐步引入调度潜力、随机性、灵活性等因素,构建更复杂、更符合实际情况的能源-交通耦合优化调度模型。对比分析部分典型研究在不同优化角度下的目

标函数、约束条件、模型类型与求解方法的不同,如附录 A 表 A1 所示。

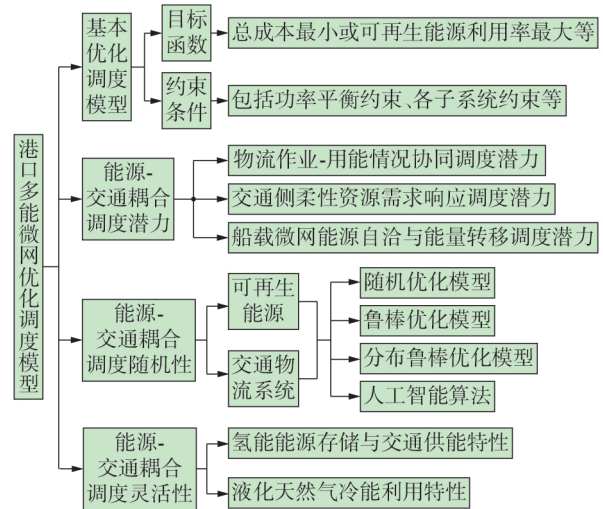


图 2 港口多能微网优化调度模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of optimal scheduling models for port multi-energy microgrid

2 能源-交通耦合调度潜力的研究现状

海上风电等可再生能源由于补贴退坡、波动性大等因素,面临着难以平价上网、并网消纳等问题^[6]。因此,港口能源系统作为支撑海上可再生能源消纳的枢纽、平台,迫切需要交通侧柔性资源提供协同海上可再生能源消纳的灵活性。

船-港-车互动是港口多能微网区别于陆地多能微网最显著的特征。基于物流作业过程,全电船舶及电动汽车等均可与港口多能微网实现能源双向流动,同时各电气化设备在任务总量约束下可平移作业时段负荷,实现交通侧柔性资源的需求响应。此外,搭载了独立能源系统的船载微网不仅能为船舶自身提供电力,也可与港口多能微网进行并网交互。综上,物流作业、柔性资源、船载微网等要素构成了一个高度互联、协同运作的港口交通系统。在考虑能源-交通耦合调度潜力过程中,应考虑各交通侧资源的协同调度潜力、需求响应潜力、能源自治与能量转移潜力等,以充分发挥港口能源系统作为灵活性聚合主体的优势。

2.1 物流作业-用能情况协同调度潜力

目前针对港口多能微网的研究大都聚焦于岸电系统所耗能源问题,而忽视了物流作业过程的协同调度。实际上,港口物流作业过程中的电能消耗占能源系统 70% 以上,存在巨大的效能优化空间^[7]。同时,港口集装箱吞吐量日益攀升,合理的交通物流调度直接影响港口的运行效率及经济效益^[8],因此,物流作业过程在优化物流运输、降低用能消耗等方面的协同调度潜力有待挖掘。

港口调度中心根据船舶预计到达时间与集装箱数量进行泊位调度—岸桥分配—岸桥调度—集装箱转运的物流作业调度全过程,如图3所示,其协同调度潜力相关研究总结归纳如附录A表A2所示。

2.1.1 物流环节联合的协同调度潜力

由于港口物流资源的布局多样性,在物流运输方面,部分研究通过采用泊位-岸桥联合调度的方法使港口物流资源进行有效利用,实现作业效率最优。文献[9]将泊位分配表述为广义集分区模型,以确保每艘船舶的停泊/离港时间、空间位置满足泊位分区。文献[10-11]综合考虑泊位分配、岸桥分配及岸桥调度的协同运行,重点关注岸桥静态与动态分配对比,结果表明岸桥动态分配可显著提升港口运行效率。在实现泊位-岸桥最优调度后,还需考虑集装箱转运问题。文献[12]在考虑堆场交通限制的基础上,对堆场侧与船舶侧的集装箱分配和运输路线进行决策,实现堆场交通运行效率最优与集装箱运输距离、周转时间最短。上述研究均从物流管理与运输效率方面实现港口物流运输最优,但未剖析港口能源系统与物流作业过程的能耗情况。

2.1.2 能源-物流耦合的协同调度潜力

为降低物流作业过程的能源消耗,部分研究剖析物流作业环节中的能源耦合情况,以挖掘港口物流作业协同调度过程中的用能经济潜力。文献[13]以大型港口的岸电使用情况为例,论述在合理利用能源-物流耦合互补特性的情况下,可实现港口多能协同供应及能源综合阶梯利用,在提升盈利的同时推动港口绿色发展。因此,为打破能源侧与物流侧解耦运行状态,文献[7]在考虑岸桥分配的基础上,建立能源-物流耦合负荷模型,将能源系统及物流系统的单独优化与协同优化进行比较,可知能源-物流协同优化能降低系统运行成本、弃风弃光率等。考虑到泊位分配决定了港口负荷需求,文献[14]根据船舶负荷量大小优化其靠泊顺序,从而改变港口总

负荷曲线,并利用船舶时空灵活性和动态电价优势进一步实现最优经济效益。文献[15]为进一步突出能源系统与物流作业的协同作用,将二者的联合调度建立为两阶段模型,第一阶段考虑船舶靠港不确定性实现最佳泊位分配,第二阶段考虑可再生能源不确定性实现集装箱作业最优调度,兼顾港口运营效率与经济性。

然而,上述模型虽然涉及了能源侧与物流侧的耦合动态过程,但仅考虑物流系统的少量环节不足以代替港口整个物流系统的能源消耗。为解决这一问题,文献[16]基于柔性流水线车间调度原理,对物流系统全过程进行精细化建模,以全面分析能流集装箱装卸物流过程的能流耦合关系,结果表明所提能源-物流全过程协同调度模型在保证港口集装箱物流效率的同时,能有效降低港口能源消耗与物流整体调度成本。但该模型未考虑可再生能源的接入,不适用于目前可再生能源渗透率较高的港口多能微网。

现有研究表明港口物流系统协同调度在提升港口运行效率、降低能源消耗等方面的有效性^[17-20],然而港口能源侧与物流侧的耦合运行潜力尚未充分挖掘。如何实现港口能源与物流全过程协同调度,使其能源消耗最小化,是港口能源-交通耦合多能微网的研究热点之一。

2.2 交通侧柔性资源需求响应调度潜力

港口具有丰富的柔性交通资源,包括移动储能(船、车等)、冷藏集装箱、电气化设备等,此类柔性资源的负荷曲线具有良好的重塑性与可调控性,对其能源需求进行合理规划与调度可显著提升港口能源利用率与灵活性。

2.2.1 移动储能的需求响应潜力

不同于一般的电网储能装置,全电船舶及电动汽车作为分布式移动储能,不断进出港口,导致港口的拓扑结构和负荷曲线频繁变化,这对港口多能微

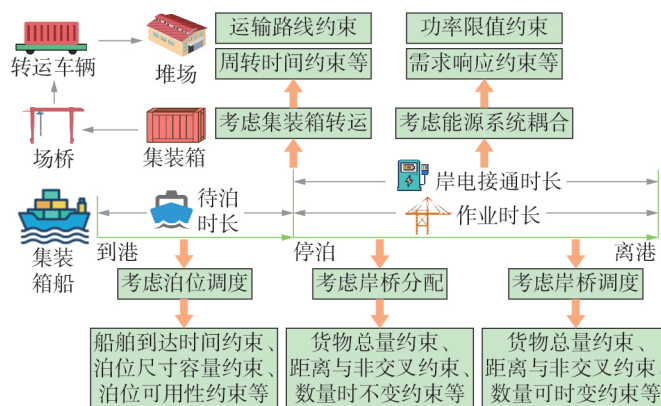


图3 港口物流作业调度全过程

Fig.3 Whole process of port logistics operation scheduling

网规划交通运行、平衡供需关系提出了极大挑战。同时,全电船舶及电动汽车集群的充电问题进一步增加了港口多能微网的运行压力,这也对港口多能微网的运行可靠性提出了更高要求。为此,港口可以通过采取合理的需求响应措施,引导全电船舶及电动汽车进行有序充电,以提高电力需求灵活性和降低电力负荷尖峰需求。全电船舶及电动汽车在充放电特性等方面具有较多共性,因此在研究全电船舶参与需求响应的过程中,可以参考电动汽车相关领域的研究成果。

单一的价格型响应存在“峰谷套利”“峰谷倒置”等现象^[21],而单一的激励型响应亦有响应率低、激励价格补偿机制尚未健全等难题。因此,在综合考虑价格型响应与激励型响应各自优缺点的基础上,文献[22]结合价格型与激励型需求响应措施,提出针对电动汽车的固定签约策略及灵活签约策略,其中固定签约策略基于签订激励协议,灵活签约策略则可选择成本最低的价格型、激励型充电方案。然而上述模型均基于陆地微网展开,鲜有研究将需求响应机制应用于港口多能微网中的移动储能调度。为此,文献[17]考虑到氢能船舶主体较少且易于直接控制,对氢能船舶采用激励型需求响应,而氢能汽车主体众多且行为的不确定性更为复杂,因此对氢能汽车采用价格型需求响应,结果表明对移动氢储能进行合理调度可显著提升港口经济性。

无论是价格型还是激励型需求响应措施,均难以有效刻画用户参与需求响应调度的意愿,且未顾及用户及聚合商的利益诉求。此外,港口船舶数量较少,并局限于港口这单一的充电选择,难以直接套用以往电动汽车的需求响应策略。因此,在有效计及船舶与电动汽车主体数量差异、船舶充电选择单一及电动汽车主体行为不确定性更复杂的基础上,充分考虑全电船舶、电动汽车用户参与调度的响应程度,是能源-交通耦合的港口多能微网研究热点之一。

2.2.2 冷藏集装箱的需求响应潜力

随着冷链行业的迅速发展,冷藏箱的用冷需求成为港口的主要能源消耗。西班牙瓦伦西亚的海港中,冷链运输的冷能消耗约占总能源需求的45%^[23]。冷藏集装箱具有显著的热惯性^[24],在不供电情况下可长时间保持温度恒定不变,这为其能源供应提供了一定的自由度,因此冷藏集装箱也可视作灵活性资源参与港口需求响应。文献[18]利用全电船舶搭载冷藏箱并入港口多能微网的不同节点,在时间和空间尺度上响应电网运行需求。

然而针对包含数千个热电负载的大型港口电力系统,传统的集中控制技术难以实现需求侧实时控制。部分研究采取对冷藏集装箱集群的方式,减少

冷藏集装箱带来的庞大变量。文献[25]将冷藏集装箱划分为不同集群,每个集群视为一个大容量冷藏集合,并利用动态分时电价机制,在港口负荷高峰期对冷藏集装箱负荷进行削减和转移,结果表明该方法具有良好的求解效率和准确性。文献[26-29]基于多智能体系统(multi-agent system, MAS)实现港口冷藏箱、船舶、汽车岸电等柔性电力负荷的高效聚合,其中冷藏箱代理会对冷藏箱下一个时间间隔内的温度进行估计,然后基于当前电价和功率需求估算最佳电力需求曲线从而进行能量分配,结果验证该能源管理方法可提高港口整体能源利用率及运营成本。但MAS将冷藏箱集群视为一个整体,无法满足不同冷藏箱温度精确控制的需求,易造成货物损坏,同时难以保证整体优化效果,在港口实际应用时仍存在局限性。文献[30]为避免冷藏箱整体建模而忽视不同个体的温度差异性,提出一种考虑日前调度、日内调度以及应急调度的分级控制方案,确保每个冷藏箱都不超过其温度阈值的情况下参与港口需求响应调度,结果验证了冷藏箱削峰填谷的潜力。

上述研究为冷藏箱的能量管理方法提供了参考,但其蓄热特性及需求可调控性仍有待深入挖掘。如何实现在对港口成千上万个冷藏箱进行实时控制的同时,确保冷藏箱不同个体间的温度差异,是未来发挥冷藏箱需求响应潜力的研究重点。

2.2.3 电气化设备的需求响应潜力

1) 电气化港机。

部分研究考虑将岸桥、场桥等电气化港机与飞轮储能^[31]、超级电容器^[32]、压缩空气^[33]等储能系统结合,寻求最优电源管理策略,以达到削峰填谷的目的。文献[34]提出一种用于控制港机中飞轮储能系统的电源管理策略,在港机提升阶段储能系统提供短时间高强度负载,在下降阶段回收势能,结果表明该策略可显著减少能源及峰值电力需求。上述研究方式均从电气化港机与储能相结合的角度出发,未考虑电气化港机本身的运行工况角度。而由于港机的运行通常是总量型约束,即某时间段内完成的总工作量大于等于某限值,这为港机带来需求响应的潜力。针对电气化港机的不同工况及运行方式,文献[35]将港机运行过程分为提升、平移、下降3个过程,由此建立港机梯级功率模型。在此基础上,文献[36]通过延长服务时间或压缩工作功率建立港机需求响应几何模型,结果表明港机的需求响应可有效降低运行成本。但该模型过于理想化,实际港机包含多类动作,如何建立港机更精确的需求侧管理模型是未来降低港口电气化设备需求响应成本的关键步骤。

2) 电气化转运车辆。

转运车辆负责堆场间货物的转运,为使其运行

效率最大化,需解决包括任务调度、路径规划、由此引起的最优规模等问题。随着转运车辆电气化发展,以上3类经典问题将与能源系统相耦合,即转运车辆在进行作业任务的同时,港口需为其制定能量管理方案。由于转运车辆在完成任务总量约束下可从转运、充电、休息等各种状态间任意切换,因此转运车辆具备一定的需求响应潜力。

针对转运车辆能源-交通耦合模型的缺乏,文献[37]考虑港口货物转运的时间约束及不同转运车辆的空间约束,基于任务要求、路径及能耗关系给出了转运车辆的初步建模方法。文献[38]剖析港区绿色车辆调度受能源需求和物流运输的双重影响机制,探究绿色车辆在满足运输需求下的充能时间与成本最小化的调度方案。然而,利用0-1变量刻画转运车辆运行状态的方法面临非线性约束、变量规模庞大、求解效率低等难题。因此文献[38]进一步对比求解器、启发式算法、机器学习等求解方法,发现机器学习在仿真精度、收敛行为、计算效率等方面均具优势,凸显了其在解决港口转运车辆调度问题上的巨大潜力。

随着转运车辆向绿色化转型和物流贸易增长,转运车辆在能源需求与物流作业之间的耦合效应会更加突出,包括转运车辆任务调度、路径规划、最优规模问题等,通过探索多式联运或多港口区情境下的转运车辆能源-运输模型,探寻转运车辆参与需求响应的经济激励措施,是拓展港口能源-交通耦合运行效率的有效途径。

2.3 船载微网能源自治与能量转移调度潜力

为降低碳排、促进经济与环境友好型航运,载有独立发电与储能系统的船载微网得到广泛研究。船载微网通过安装太阳能光伏板、风帆等设备实现可再生能源的利用,并根据所处气象环境(如光照、风速等)动态调节储能系统充放电策略,有效实现自身内部能源平衡与优化,达到能源自治的目的。

当船舶靠港时,可利用岸电与港口连接,成为并网微网。船载微网一方面通过自身发电与储能系统降低对港口能源系统的依赖程度,实现能源独立;另一方面可利用移动的船载储能系统在多港口多微网间传递能源,实现能量转移。

2.3.1 船载微网的能源自治潜力

船载动力系统的能源供应是实现船载微网能源自治的首要关键。然而,船载微网的能源供应面临着可再生能源不确定性等挑战^[39],同时航线路径的改变会影响光伏太阳辐射角^[40]以及风帆风偏角^[41]的角度,进而影响可再生能源利用率,即可再生能源发电对气象条件的高度依赖性^[42]、气象条件与航线之间的紧密关联性^[43]等。在能源消耗方面,航行速度可根据船载微网能源供应强度适应性调整,因此

航速也可视为需求响应的手段。因此,在船载微网能量管理调度中,需考虑各种海洋气象因子与港口航次调度之间的耦合关系。典型船载微网调度结构如图4所示。

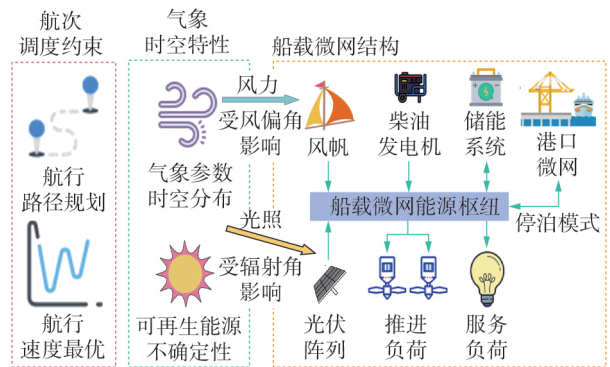


图4 航次调度与气象参数约束下的典型船载微网结构
Fig.4 Typical shipboard microgrid structure constrained by voyage scheduling and meteorological parameters

为推动清洁能源应用并实现航运脱碳目标,船载微网的动力系统采取了一系列改进措施,包括整合可再生能源、优化容量配置等^[44]。文献[45]提出确定混合船舶动力系统中光伏发电、柴油发电及储能系统的最佳容量配置方法,进一步减少了燃料成本和碳排放。船载微网不仅需实现动力系统能量管理最优,还需考虑外部气象环境等多变因素。同时,航行速度和航线的优化不需要对船舶动力系统进行改造即可实现船舶能效提高,具有低成本的优势。文献[46]综合考虑不同航线、航速下的气象环境因素与翼帆迎角的相互作用与协同优化,建立风能辅助船舶能耗模型,结果表明该模型可充分利用风能资源达到最佳运行状态。除气象环境外,海水波动等海洋因子也对船载微网的功率优化产生影响。文献[47]考虑水波、风速等综合阻力的影响,在航行时对推进功率进行区间预测,在实现船载微网的发电-储能-推进功率的最优协调运行的同时显著降低了碳排。

但船舶与港口之间并非完全独立,而仍然存在物流约束,例如准时到达的航次调度^[48]等。因此,在航次调度与总里程的约束下,文献[49]将船舶航行速度视为可调度负荷,通过采用储能系统及调节推进功率的手段调整航速,从容安排用能计划的同时实现运营成本最优,从而提升船载微网的能源自治能力。此外,船载微网的能源自治还体现为能源供应多样化。考虑到观光旅游船舶中游客具有多种能源需求,文献[50]在船上引入冷/热/电联产机组,使多种异质能源协调运行与互补互济,为能源供应带来额外自由度的同时,实现气体排放与运行成本最小。

2.3.2 船载微网的能量转移潜力

船载储能系统可实现多港口(海岛)多微网间的能量转移,防止能源短缺等情况发生。针对孤立海岛微网之间能源互动缺乏、能源供应单一等问题,文献[51]提出运用储电船舶(装载大容量储能系统)作为海岛微网中移动储能电站的概念,储电船舶不仅可以为不同海岛电站提供电源,也可作为海岛间物资运输的交通工具。在此基础上,文献[52]将电动船舶视为远洋海岛下的移动式共享储能,在综合考虑交通调度与能源调度的双重需求基础上,实现海岛间能量转移。与常规供电相比,全电船舶参与海岛电网调度在整体经济性上具有明显优势。文献[53]提出全电船舶的时空动态调度模型,利用全电船舶的移动储能特性减轻海岛微网运行压力,同时全电船舶的灵活性可提高海岛微网应对突发事件的弹性能力。

然而船舶负荷的频繁变化及高湿度、高盐度的运行环境都将严重威胁储能系统使用性能,储能系统的意外故障可能会给远航船舶带来灾难性后果,因此储能系统的健康管理是船载微网的关键一环。为解决船载储能系统频繁深度充放电导致寿命下降问题,文献[54]采用电池和高功率密度储能结合的混合储能系统,其中电池用于承担基础负载,高功率密度储能用于承担峰值负载,在延长电池寿命的同时更好地储备功率、降低启动成本。

目前船载微网中的可再生能源利用及储能系统管理越来越受到广泛关注,然而船舶风/光发电不确定性与航行环境多变性刻画仍有待研究,关于船载储能系统容量衰减及老化机制的研究还非常薄弱,因此未来船载微网的研究可着重于船舶风/光发电不确定性、航行环境多变性准确刻画及储能系统健康管理等方面。

3 能源-交通耦合调度随机性的研究现状

随着可再生能源的广泛利用,港口能源系统面临着风光出力随机性、预测准确性等难题。考虑不确定性场景中的可再生能源消纳成为港口多能微网优化调度研究的重要课题。由于船舶停靠行为的随机性,港口负荷也具有较大的随机性与波动性^[55]。在前述章节中,详细分析了交通物流系统的协同调度潜力,但尚未对其潜在的不确定性因素进行深入探讨。实际上,受制于海上气象环境以及机械故障等难以预知的复杂因素,交通系统存在船期延误、物流作业时间与原计划不符、岸电价格与负荷需求互相影响等不确定性挑战。若不考虑以上不确定性因素,港口调度计划将会频繁变更,从而造成港口运行控制的混乱与高昂成本。

因此,针对能源侧与交通侧调度随机性问题,主

要采用随机优化、鲁棒优化、分布鲁棒优化、人工智能算法4类模型^[56]应对港口优化调度中的不确定性挑战,相关研究总结如附录A表A3所示。

3.1 随机优化模型

随机优化通过概率分布刻画不确定性或依赖概率信息模拟生成多个随机场景。在港口能源系统方面,文献[15]针对港口能源系统可再生能源与负荷预测的不确定性,采用蒙特卡洛抽样模拟大量离散场景进行不确定性量化,并求取使港口运行成本与船舶晚点成本期望和最小的调度方案,同时设计能源与交通不确定性。文献[57]通过拉丁超立方分层抽样生成场景,在生成同等数量场景的情况下能够更好地反映概率分布特征。除应用最为广泛的蒙特卡罗抽样、拉丁超立方抽样外,马尔可夫链^[58]、高斯分布^[59]、时间序列^[60]、Copula函数^[61]等场景生成方法也得到了一定的应用。当场景过多时会给优化问题求解带来“维数灾难”,通过场景削减能够以数量少于原始场景的典型场景来代替原始场景,以提高问题求解效率^[62]。文献[63]提出港口多能微网运行场景的高保真压缩与重构方法,通过连续层次聚类对源、荷场景进行压缩与重构,在实现场景削减的同时能最大限度减少场景削减造成的不确定性信息损失。常见的场景削减方法还包括K-均值聚类^[64]、快速前向选择、同步回代削减^[65]等。

在港口交通系统方面,文献[66]假设船舶到达时间服从离散概率分布,建立两阶段随机优化模型,第一阶段基于已知信息进行船舶泊位分配,第二阶段揭示不确定性后计算实际周转调度时间并评估该方案性能。与船舶到达时间随机变量的独立分布相比,泊位可用性的概率分布受前一艘船在泊位完成时间概率分布的影响,这种泊位可用性与船舶作业时间不确定性的耦合关联使得泊位概率分布信息变得更加复杂。除将不确定性变量假设遵循某种概率分布外,场景建模也在港口交通系统得到应用。文献[67]将船舶可能延误到港情况表示为离散场景,提出基于场景的两阶段随机优化模型,仿真表明通过调整不确定性参数可实现船期的合理规划,降低实际成本与预期成本的偏差水平。

虽然随机优化能充分利用概率分布信息来提高优化结果的经济性,但随机优化需假设不确定性变量满足精确统计概率分布或依赖有限场景离散不确定性变量,无法涵盖不确定性因素的复杂变化特征。一方面,仅依赖概率分布或有限场景难以覆盖不确定性变量取极端值的情形,获取的调度方案存在无法确保港口能源系统安全运行的风险。另一方面,与能源侧具有储能系统等平抑不确定性变量波动的灵活手段不同,交通侧不确定性规划超出预期仅能重新调整物流调度策略,物流作业计划的频繁改变

将导致港口整体运营效率不佳,因此针对港口交通系统基于时间演变的多样性与复杂性,随机优化适用性较低。

3.2 鲁棒优化模型

不同于随机优化要求不确定性满足特定概率分布的强假设,鲁棒优化通过不确定集刻画不确定性变化区间,并求得不确定性最恶劣情况下的最优决策,因此具备样本外表现好、数据要求低、求解速度快等优势,在解决港口能源侧与交通侧不确定性方面得到了广泛应用。在港口能源系统方面,文献[18]针对确定性优化难以保证不确定性风险下的调度经济性,提出港口配电网的鲁棒优化日前经济调度模型,在风电出力最恶劣的情况下求取最优经济调度方案,能够有效提高计算效率并确保系统在不确定性风险下的安全韧性。然而,该研究基于单阶段鲁棒优化开展,在不确定性实现后决策无法根据不确定变量的具体值对优化结果进行自适应再调整,导致优化结果保守度较高、经济性较差,因此能自适应调整的两阶段鲁棒优化得到更为广泛的推广与应用。文献[19]在使用不确定集刻画风光出力的基础上,构建两阶段鲁棒优化模型,引入不确定性预算对其保守性和鲁棒性权衡。

鲁棒优化的最恶劣不确定性集使得每一个不确定性参数在最坏情况下都有一个对应可行的解决方案,有效改善了港口交通调度策略因船期不确定性规划超出预期而频繁变更的难题。与能源侧两阶段鲁棒优化不同的是,能源侧在第二阶段只考虑连续变量,而在交通侧两阶段模型中,第二阶段包含大量二进制变量,如泊位分配决策变量、岸桥分配决策变量等,这使得港口交通系统两阶段鲁棒优化呈现出高度复杂性。文献[68]假设船舶到达时间概率分布未知并构建两阶段鲁棒优化模型,第一阶段基于确定性的到达时间进行停泊决策,第二阶段在船舶到达时间不确定性实现的基础上进行岸桥分配决策,其所依赖的不确定性预算集合包含了船舶所有可能到达时间。文献[69]通过船舶预期到达时间及预期集装箱数量制定确定性模型的基础上,考虑船舶到港时间不确定性与集装箱数量累积不确定性,建立两阶段鲁棒优化模型,同时使用多个不确定集赋权的方式避免解过度保守。

鲁棒优化寻求不确定性最恶劣情况下的最优决策,所得决策虽具有强抗风险能力等优势,但现实中较少出现最恶劣情况,导致优化结果偏向保守,牺牲了成本效益。尽管上述研究提出两阶段联合、不确定性预算、多个不确定性集赋权等方法改善了鲁棒优化的保守性,但也增加了模型求解难度。

3.3 分布鲁棒优化模型

分布鲁棒优化兼顾了随机优化与鲁棒优化的优

势,作为一种新兴的不确定性方法得到推广,其在不确定变量最恶劣概率分布下进行优化^[70]。相比于鲁棒优化,分布鲁棒优化融入了矩信息、概率密度等概率分布信息,改善了优化结果的保守性;相比于随机优化,分布鲁棒优化无须假设变量满足精确概率分布,解决了随机优化中的概率分布准确参数较难获取的难题。分布鲁棒优化在其他能源系统中得到初步应用^[71-75],但在港口能源系统中相关研究较少。文献[17]采用分布鲁棒优化进行日前-日内两阶段联合调度,结果证明分布鲁棒优化可为港口多能微网提供海上风电不确定性风险下兼顾经济性及鲁棒性的调度方案。然而鲜有研究应用分布鲁棒优化刻画交通侧不确定性。文献[76]创新性提出考虑船舶到达时间不确定性下的两阶段分布鲁棒优化模型,第一阶段基于确定性的到达时间进行决策,第二阶段根据船舶延误时间进行作业决策,其选择的 Kantorovich 模糊集包含作业时间参考分布在预定义最大距离内的所有概率分布,仿真验证分布鲁棒优化应用在交通侧的有效性,且无论是经济成本、不确定性刻画准确性还是求解效率均优于随机优化与鲁棒优化。

计及港口调度随机性的研究日益成熟,但随机优化、鲁棒优化以及分布鲁棒优化仍然存在模型构建繁琐、转化求解困难等问题。且当前港口能源侧与交通侧不确定性模型仍处于解耦状态,鲜有研究综合考虑二者的联合优化与耦合机理。

3.4 人工智能算法

为适应港口能源侧与交通侧复杂的物理模型和不确定性情境,人工智能算法逐渐成为研究热点。文献[77]采用人工神经网络、随机森林、线性回归等多种预测模型对港口数据进行关联性分析,针对船舶到港时间及岸电消耗进行预测,结果表明人工神经网络预测性能最优,该预测结果为港口决策提供了可靠的信息支持,有助于最大限度减少运营成本和物流时间。同时,该研究也证明了人工智能算法对于解决船期延误、交通负荷等不确定性方面的适用性。然而,基于数据驱动的人工智能方法受限于特定场景的数据,需要海量数据作为训练支撑,并且不同港口在规模和运营管理上存在差异,因此最优模型不具备通用普遍性。

由于港口岸电价格往往呈现时变波动性,为降低充电/能耗成本,船舶用户会对岸电价格水平做出最优响应,因此岸电价格不确定性也是影响船舶到港时间不确定性的关键因素之一。然而电价呈现出较强的多样性和非线性,传统预测方法难以捕捉其变化特征。为此,文献[78]基于深度学习方法对岸电价格进行预测,实现动态岸电价格制约下的全电船舶最优航次调度,凸显了人工智能算法在港口

不确定性预测方面的应用前景。

4 能源-交通耦合调度灵活性的研究现状

前述章节均从能源-交通综合效益优化的角度进行调度,而忽视了交通系统清洁能源属性带来的降碳绿色发展潜力。实际上,在全球航运业促进低碳转型的趋势下,国际海事组织鼓励港口采用零排放和近零排放的新技术、燃料和能源^[79]的背景下,氢能船舶^[80]、液化天然气(liquefied natural gas, LNG)动力船舶^[81]、氢电叉车^[82]等使用清洁能源的交通物流设备备受关注。

上述清洁能源设备的出现带来了两方面的影响:一方面,交通物流设备的清洁能源属性突破了港口传统能源限制,促使港口进一步配备相应的清洁能源制备设施,进而推动港口能源与交通之间的深度绿色耦合;另一方面,电/氢等多种类交通负荷需求促进了港口多能源融合发展,并使各异质能源流呈现出多能互补、耦合转换的调度灵活性。因此,在港口多能微网调度过程中,需充分考虑各能源类型的调度灵活性,以减少能源之间的冲突浪费,促进能源互补互济。本章主要针对能源侧的调度灵活性,交通侧的调度灵活性可视为第2章的调度潜力。

4.1 氢能能源存储与交通供能特性

虽然氢能交通物流设备具有促进交通行业深度脱碳的潜力^[83],但高昂的电解水成本以及运氢成本^[84]一直是制约氢能广泛应用的因素。然而,新兴的海水无淡化原位直接电解制氢技术的突破极大降低了电解水成本,该技术可直接利用海水制氢,避免了电解水制氢对纯水的高度依赖,克服了淡水资源短缺的矛盾^[85]。随着可再生能源“绿色制氢”技术的发展,制氢成本将在未来10 a内降低约70%^[86]。同时,借助海上丰富的可再生能源,电制氢在获得源源不断清洁电力的同时,也解决了可再生能源消纳低的问题^[87-88]。上述依托海水资源与可再生能源电制氢的思路,为港口氢能的可持续发展提供了可能,从而进一步加速推进多能互补“氢港”的形成。此外,氢能既可视作一种能源存储载体,又可作为氢能汽车、氢能船舶、氢电叉车等移动氢储的动力来源;既可实现能源存储与转换之间的有机衔接,又可打破港口能源壁垒、促进可再生能源消纳。因此,有必要对氢能存储特性与交通供能特性进行分析。港口氢能系统结构如图5所示。

在氢能存储特性方面,文献[89]将富余风光出力转换为氢能实现中长期存储,并在电力不足时通过氢燃料电池发电接入电网进行电力市场交易。文献[90]利用海上富余风电制氢,在电力不足时又将氢能转化为电能,实现了百分百清洁供电,但高昂的设备成本影响了经济效益。为进一步提高氢能消纳

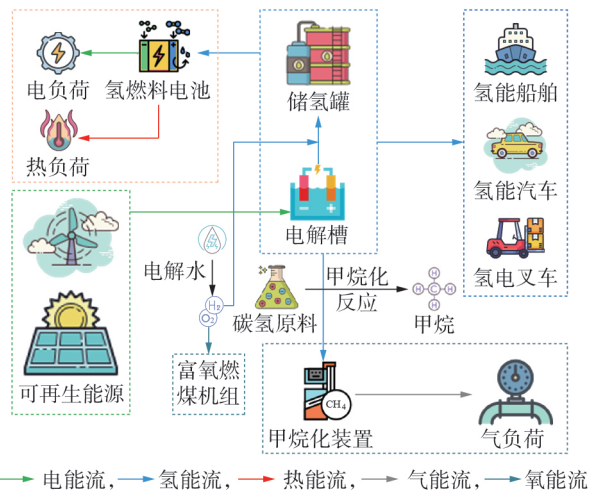


图5 港口氢能系统结构

Fig.5 Structure of port hydrogen energy system

风电收益,文献[91]从丹麦海上风电场投资者角度出发,对海上风电场配备的氢能存储进行优化配置,结果表明配置合理的氢能存储可通过峰谷套利来提高运营利润,并避免不确定性造成的发电偏差惩罚。

上述研究充分利用氢能存储特性,在提高港口可再生能源消纳的同时兼顾经济性,为氢能的经济应用铺平了道路,然而氢能在港口的大规模应用仍具有局限性。为此,考虑到氢能的交通供能特性,“因地制宜”地将港口氢能船舶、汽车等视为氢能移动存储灵活性资源,有利于海上风电的消纳、港口氢能系统的普及。文献[82]通过将港口氢电叉车与传统叉车在安全性、投入比以及环境友好性方面进行对比,结果表明氢电叉车在港口节能减排中将发挥重要作用。文献[92]探讨了氢能在港口交通设备及海运中作为替代燃料的脱碳潜力,同时指出当前氢能基础设施建设与法规标准的不足,限制了其在港口的广泛应用。文献[93]评估了氢能汽车储能双向灵活性的经济技术可行性,结果表明氢储能双向灵活性有利于降低可再生能源系统的运行成本、碳排放。在此基础上,文献[17]构建含氢港口多能微网,把氢能船舶、氢能汽车视为灵活性氢储能资源,在风电不足时通过移动氢储能削峰填谷,提高港口能源利用率。针对管网输氢的规模限制,文献[94]通过船舶实现规模化运氢,以构建多港口间氢能供应链。此外,氢能低密度高能量的特点使其具备供应远洋船舶的潜力^[95]。

4.2 LNG冷能利用特性

LNG是世界港口、航运广泛使用的清洁燃料,其经LNG船运输到港后,存储于LNG接收站中,再由港口气化后与天然气(natural gas, NG)配网衔接。LNG气化时会释放大量清洁无污染的冷能,发展潜

力巨大。日本在LNG冷能利用方面起步较早,率先利用冷能发电实现低碳性和经济性^[96]。目前,LNG冷能利用主要集中在冷能发电、冷能存储、低温碳捕集等方面^[97],具有环保性和多功能性,如图6所示。

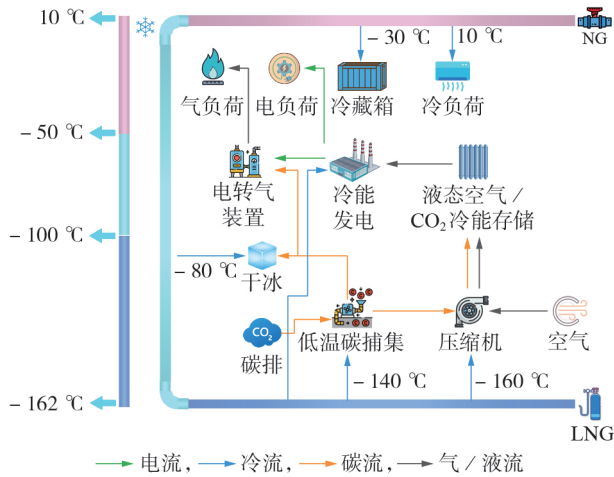


图6 LNG冷能利用示意图

Fig.6 Schematic diagram of LNG cold energy utilization

然而现有研究均基于化工领域的热力学分析、系统可行性与经济性分析、环境贡献度分析等^[98]方面展开,港口多能微网调度方面的LNG冷能利用相关研究则较少。文献[99]利用LNG气化过程中释放的高品质冷能制备液态CO₂及干冰,获取经济收益及实现碳利用,但其制取经济商品的冷能利用方式与能源系统运行调度耦合性较弱。文献[100]进一步将液态空气储能引入综合能源系统,从能源调度层面充分利用LNG气化释放的冷能及液态空气储能压缩空气产生的热能,同时考虑碳捕集,实现经济性与低碳性的双赢。考虑到用冷需求的不同温区差异,文献[101]提出了LNG冷能的发电-制冷两级利用模型,以降低冷能焓损失。但LNG冷能两级利用难以充分利用LNG各个温区内的冷能,同时未考虑LNG冷能低温碳捕集的负碳排特性,难以进一步减少能源系统的碳排放。为此,文献[20]提出了冷能发电-低温碳捕集-直接冷却的冷能梯级利用模型,并构建碳捕集-碳存储-碳利用的协调碳处理流程。但上述关于LNG冷能调控方案未考虑LNG管网与NG网络之间的高效匹配与有效衔接,同时未将LNG气化容量约束、港口用冷需求波动等实际因素纳入考量。

综上,现有研究多侧重于从化工领域方面提升LNG冷能利用的焓效率,并且未结合实际气网供应能力与负荷具体用能特性对不同温区内冷能进行梯级利用,未能有效挖掘LNG冷能在能源调度方面的低碳灵活性潜力。因此,有必要围绕LNG冷能的梯

级利用、低温碳捕集、冷能存储等开展港口多能微网运行调度研究。

5 港口能源-交通耦合发展面临的挑战

随着能源转型与智能交通的发展,港口作为能源-交通的集成枢纽,建立多能微网模型来优化能源利用和交通运输效率已经成为研究热点。本文分别从能源-交通耦合调度潜力、调度随机性以及调度灵活性3个方面对国内外港口多能微网优化调度研究成果进行综述,最后对港口多能微网发展面临的挑战进行探讨,以期提炼其未来重点研究方向,主要分为以下4个方面。

1)港口不确定性精确刻画问题。港口可再生能源出力、交通系统调度均与气象条件显著相关,但现有不确定性模型难以纳入气象因素等环境特征。同时,现有研究未深入探究能源侧与交通侧不确定性的关联耦合机理,缺乏能源-交通不确定性联合优化模型与相互反馈效应分析,二者联合优化对港口系统可靠性的影响机制有待评估。因此,制定考虑气象条件、源荷波动、交通状况等不确定性因素的综合风险调度策略是亟需解决的难题。

2)港口交通柔性资源聚合问题。港口交通柔性资源包括全电船舶、冷藏箱、电气化物流设备等,此类负荷的集中调度会造成通信量大、维数灾难等问题。为降低优化难度,可将具有相似能源特性的可调控负荷进行聚合,然而个体能源需求又受激励方式、心理意愿、物流工况等多重因素影响,难以细化个体行为差异的灵活性。因此如何在实现港口交通柔性资源高效聚合的同时,兼顾个体之间的需求差异,对提高港口调度潜力及降低负荷尖峰需求有着重要现实意义。

3)港口高碳排放属性转型问题。使用清洁能源的船舶等交通物流设备可从源头降低碳排,推进交通系统绿色低碳转型。此外,依托丰富的可再生能源,港口可积极参与到能源交易市场中,进一步助力港口走向零碳未来。因此,有必要探究港口交通物流设备的清洁能源替代技术以及港口主体参与能源市场交易机制,从而改变港口高碳排属性。

4)港口不同主体利益分配问题。现有研究多基于港口多能微网的最优经济调度展开,忽视了港口、船舶、汽车等不同主体的利益诉求,考虑港区多主体之间能源交易互动的研究仍十分稀缺。同时,不同港区间可实现能量共享、交通协同调度等,因此建立兼顾单港区利润分配公平性、多港区间交易隐私性的协同优化调度与利润分配模型,进而提高各主体参与协同的积极性,是港口多能微网经济调度的重点研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 林森, 文书礼, 朱森, 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.
- [3] 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):114-135.
FANG Sidun, ZHAO Changhong, DING Zhaohao, et al. Port integrated energy systems toward carbon neutrality (I): typical topology and key problems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(1):114-135.
- [4] FANG S D, WANG Y, GOU B, 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.
- [5] 黎静华, 朱梦姝, 陆悦江, 等. 综合能源系统优化调度综述[J]. *电网技术*, 2021, 45(6):2256-2272.
LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, et al. Review on optimal scheduling of integrated energy systems [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(6):2256-2272.
- [6] 张金辉, 江岳文. 考虑市场竞争与接纳的海上风电场装机容量及布局分层优化[J]. *电网技术*, 2020, 44(10):3837-3846.
ZHANG Jinhui, JANG Yuewen. Hierarchical optimization of installed capacity and layout of offshore wind farm considering market bidding and acceptance [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(10):3837-3846.
- [7] 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):6184-6196.
HUANG Yiwen, HUANG Wentao, WEI Wei, et al. Logistics-energy collaborative optimization scheduling method for large seaport integrated energy system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(17):6184-6196.
- [8] 吴云强, 张戎. 单向航道下连续泊位分配与船舶调度集成优化[J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(9):246-255.
WU Yunqiang, ZHANG Rong. Integrated optimization of continuous berth allocation and ship scheduling under one-way channel [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(9):246-255.
- [9] KRAMER A, LALLA-RUIZ E, IORI M, et al. Novel formulations and modeling enhancements for the dynamic berth allocation problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 278(1):170-185.
- [10] ABOU KASM O, DIABAT A, CHENG T C E. The integrated berth allocation, quay crane assignment and scheduling problem: mathematical formulations and a case study [J]. *Annals of Operations Research*, 2020, 291(1):435-461.
- [11] NOURMOHAMMADZADEH A, VOB S. A robust multiobjective model for the integrated berth and quay crane scheduling problem at seaside container terminals [J]. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2022, 90(7-9):831-853.
- [12] LIU M, LEE C Y, ZHANG Z Z, et al. Bi-objective optimization for the container terminal integrated planning [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 93:720-749.
- [13] 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):1285-1301.
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):1285-1301.
- [14] MAO A J, YU T T, DING Z H, et al. Optimal scheduling for seaport integrated energy system considering flexible berth allocation [J]. *Applied Energy*, 2022, 308:118386.
- [15] ZHANG Y, LIANG C J, SHI J, et al. Optimal port microgrid scheduling incorporating onshore power supply and berth allocation under uncertainty [J]. *Applied Energy*, 2022, 313:118856.
- [16] 普月, 刘皓明, 王健, 等. 考虑多源激励的港口能流-物流全过程协同调度优化[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(20):7912-7929.
PU Yue, LIU Haoming, WANG Jian, et al. Whole-process collaborative scheduling optimization for port energy flows and logistics flows considering multi-source incentives [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(20):7912-7929.
- [17] 侯慧, 甘铭, 吴细秀, 等. 考虑移动氢能存储的港口多能微网两阶段分布鲁棒优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(8):3078-3093.
HOU Hui, GAN Ming, WU Xixiu, et al. Two-stage distributionally robust optimal scheduling for port multi-energy microgrid considering mobile hydrogen energy storage [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(8):3078-3093.
- [18] 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.
- [19] HEIN K, XU Y, GARY W, et al. Robustly coordinated operational scheduling of a grid-connected seaport microgrid under uncertainties [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2021, 15(2):347-358.
- [20] 侯慧, 谢应彪, 甘铭, 等. 冷能梯级利用的港口多能微网双层不确定性经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(6):205-215.
HOU Hui, XIE Yingbiao, GAN Ming, et al. Bi-layer uncertainty economic scheduling for port multi-energy microgrid with cold energy of cold energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(6):205-215.
- [21] 潘振宁, 余涛, 王克英. 考虑多方主体利益的大规模电动汽车分布式实时协同优化[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(12):3528-3541.
PAN Zhenning, YU Tao, WANG Keying. Decentralized coordinated dispatch for real-time optimization of massive electric vehicles considering various interests [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(12):3528-3541.
- [22] 侯慧, 王逸凡, 赵波, 等. 价格与激励需求响应下电动汽车负荷聚集商调度策略[J]. *电网技术*, 2022, 46(4):1259-1269.
HOU Hui, WANG Yifan, ZHAO Bo, et al. Electric vehicle aggregator dispatching strategy under price and incentive demand response [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(4):1259-1269.

- [23] LU Y, FANG S D, CHEN G H, et al. Cyber-physical integration for future green seaports: challenges, state of the art and future prospects[J]. *IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems*, 2023, 1: 21-43.
- [24] 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. Genova, Italy: IEEE, 2019: 1-6.
- [25] 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): 586-597.
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): 586-597.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] KANELLOS F D. Multiagent-system-based operation scheduling of large ports' power systems with emissions limitation[J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(2): 1831-1840.
- [29] KANELLOS F D. Real-time control based on multi-agent systems for the operation of large ports as prosumer microgrids[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 9439-9452.
- [30] PEI R, XIE J H, ZHANG H L, et al. Robust multi-layer energy management and control methodologies for reefer container park in port terminal[J]. *Energies*, 2021, 14(15): 4456.
- [31] AHAMAD N B B, SU C L, XIAO Z X, et al. Energy harvesting from harbor cranes with flywheel energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(4): 3354-3364.
- [32] BAALBERGEN F, BAUER P, FERREIRA J A. Energy storage and power management for typical 4Q-load[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(5): 1485-1498.
- [33] LEMOFOUET S, RUFER A. Hybrid energy storage system based on compressed air and super-capacitors with maximum efficiency point tracking (MEPT) [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, 126(7): 911-920.
- [34] PIETROSANTI S, HOLDERBAUM W, BECERRA V. Optimal power management strategy for energy storage with stochastic loads[J]. *Energies*, 2016, 9(3): 175.
- [35] FANG S D, WANG H D. Optimization-based energy management for multi-energy maritime grids[M]. Berlin, German: Springer Nature, 2021.
- [36] 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): 950-969.
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): 950-969.
- [37] 邵能灵, 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): 3749-3764.
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): 3749-3764.
- [38] LU Y, FANG S D, NIU T, 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.
- [39] HOU H, GAN M, WU X X, et al. Real-time energy management of low-carbon ship microgrid based on data-driven stochastic model predictive control[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2023, 9(4): 1482-1492.
- [40] DANANDEH M A, MOUSAVI G S M. Solar irradiance estimation models and optimum tilt angle approaches: a comparative study[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 92: 319-330.
- [41] SHEN Z P, WANG S S, YU H M, et al. Online speed optimization with feedforward of unmanned sailboat via extremum seeking without steady-state oscillation[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 189: 106393.
- [42] PARK C, JEONG B, ZHOU P L, et al. Live-life cycle assessment of the electric propulsion ship using solar PV[J]. *Applied Energy*, 2022, 309: 118477.
- [43] WANG K, XUE Y, XU H, et al. Joint energy consumption optimization method for wing-diesel engine-powered hybrid ships towards a more energy-efficient shipping[J]. *Energy*, 2022, 245: 123155.
- [44] 侯慧, 甘铭, 吴细秀, 等. 混合动力船舶能量管理研究综述[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(5): 216-229.
HOU Hui, GAN Ming, WU Xixiu, et al. Review of hybrid ship energy management[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(5): 216-229.
- [45] LAN H, WEN S L, HONG Y Y, et al. Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system[J]. *Applied Energy*, 2015, 158: 26-34.
- [46] WANG K, GUO X, ZHAO J, et al. An integrated collaborative decision-making method for optimizing energy consumption of sail-assisted ships towards low-carbon shipping[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112810.
- [47] FAN F L, ADITYA V, XU Y, et al. Robustly coordinated operation of a ship microgrid with hybrid propulsion systems and hydrogen fuel cells[J]. *Applied Energy*, 2022, 312: 118738.
- [48] ZHEN L, SHEN T, WANG S A, et al. Models on ship scheduling in transshipment hubs with considering bunker cost[J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 173: 111-121.
- [49] KANELLOS F D. Optimal power management with GHG emissions limitation in all-electric ship power systems comprising energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(1): 330-339.
- [50] LI Z M, XU Y, FANG S D, et al. Multi-objective coordinated energy dispatch and voyage scheduling for a multi-energy cruising ship[C]//2019 IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. Calgary, Canada: IEEE, 2019: 1-8.
- [51] 林湘宁, 陈冲, 周旋, 等. 远洋海岛群综合能量供给系统[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 98-110.
LIN Xiangning, CHEN Chong, ZHOU Xuan, et al. Integrated energy supply system of pelagic clustering islands[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1): 98-110.
- [52] 文汀, 随权, 林湘宁, 等. 计及共享全电船舶参与的海岛电网日前调度研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(8): 2416-2429.
WEN Ting, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. Research on day-ahead dispatching strategy for grids with shared electric vessels on pelagic islands[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40

- (8):2416-2429.
- [53] TAO Y C, QIU J, LAI S Y, et al. Flexible voyage scheduling and coordinated energy management strategy of all-electric ships and seaport microgrid[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(3):3211-3222.
- [54] FANG S D, XU Y, LI Z M, et al. Two-step multi-objective management of hybrid energy storage system in all-electric ship microgrids[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4):3361-3373.
- [55] 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 Xiaoqing, 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.
- [56] 林舜江, 冯祥勇, 梁炜焜, 等. 新能源电力系统不确定优化调度方法研究现状及展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(10):20-41.
LIN Shunjiang, FENG Xiangyong, LIANG Weikun, et al. Research status and prospect of uncertain optimal dispatch methods for renewable energy power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10):20-41.
- [57] CHANG X Y, XU Y L, GU W, et al. Accelerated distributed hybrid stochastic/robust energy management of smart grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(8):5335-5347.
- [58] JIN J X, YE L, LI J C, et al. Wind and photovoltaic power time series data aggregation method based on an ensemble clustering and markov chain[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(3):757-768.
- [59] 叶林, 李智, 孙铂皓, 等. 基于随机预测控制理论和功率波动相关性的风电集群优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11):3172-3183.
YE Lin, LI Zhi, SUN Bohao, et al. Optimal dispatch of system integrated wind farm clusters based on stochastic model predictive control considering temporal correlation of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11):3172-3183.
- [60] LUCHERONI C, BOLAND J, RAGNO C. Scenario generation and probabilistic forecasting analysis of spatio-temporal wind speed series with multivariate autoregressive volatility models[J]. Applied Energy, 2019, 239:1226-1241.
- [61] 赵书强, 金天然, 李志伟, 等. 考虑时空相关性的多风电场出力场景生成方法[J]. 电网技术, 2019, 43(11):3997-4004.
ZHAO Shuqiang, JIN Tianran, LI Zhiwei, et al. Wind power scenario generation for multiple wind farms considering temporal and spatial correlations[J]. Power System Technology, 2019, 43(11):3997-4004.
- [62] 董骁翀, 张姝, 李焱, 等. 电力系统中时序场景生成和约简方法研究综述[J]. 电网技术, 2023, 47(2):709-721.
DONG Xiaochong, ZHANG Shu, LI Ye, et al. Review of power system temporal scenario generation and reduction methods[J]. Power System Technology, 2023, 47(2):709-721.
- [63] 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):5839-5850.
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):5839-5850.
- [64] 杨茂, 董骏城. 基于混合分布模型的风电功率波动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊1):69-78.
YANG Mao, DONG Juncheng. Study on wind power fluctuation characteristics based on mixed distribution model[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(Supplement 1):69-78.
- [65] HEITSCH H, RÖMISCH W. Scenario reduction algorithms in stochastic programming[J]. Computational Optimization and Applications, 2003, 24(2/3):187-206.
- [66] SCHEPLER X, ABSI N, FEILLET D, et al. The stochastic discrete berth allocation problem[J]. EURO Journal on Transportation and Logistics, 2019, 8(4):363-396.
- [67] PARK H J, CHO S W, LEE C. Particle swarm optimization algorithm with time buffer insertion for robust berth scheduling[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 160:107585.
- [68] RODRIGUES F, AGRA A. An exact robust approach for the integrated berth allocation and quay crane scheduling problem under uncertain arrival times[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 295(2):499-516.
- [69] XIANG X, LIU C C. An almost robust optimization model for integrated berth allocation and quay crane assignment problem[J]. Omega, 2021, 104:102455.
- [70] 贺帅佳, 阮贺彬, 高红均, 等. 分布鲁棒优化方法在电力系统中的理论分析与应用综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14):179-191.
HE Shuaijia, RUAN Hebin, GAO Hongjun, et al. Overview on theory analysis and application of distributionally robust optimization method in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14):179-191.
- [71] QIU Y B, LI Q, AI Y X, et al. Two-stage distributionally robust optimization-based coordinated scheduling of integrated energy system with electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1):542-555.
- [72] HUANG H X, LIANG R, LV C X, et al. Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system[J]. Applied Energy, 2021, 290:116759.
- [73] 魏春, 蒋繁, 王宇蝶, 等. 基于Sinkhorn分布鲁棒优化的综合能源系统最优能流方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5):28-35.
WEI Chun, JIANG Fan, WANG Yudie, et al. Optimal energy flow method of integrated energy system based on Sinkhorn distribution robust optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5):28-35.
- [74] 刘鸿鹏, 李宏伟, 马建伟, 等. 考虑源-荷不确定性的电热联合系统分布鲁棒优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(8):1-8.
LIU Hongpeng, LI Hongwei, MA Jianwei, et al. Distributionally robust optimal dispatching of integrated electricity and heating system considering source-load uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8):1-8.
- [75] CAO Y S, LI D M, ZHANG Y H, et al. Optimal energy management for multi-microgrid under a transactive energy framework with distributionally robust optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1):599-612.
- [76] AGRA A, RODRIGUES F. Distributionally robust optimization for the berth allocation problem under uncertainty[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022, 164:1-24.
- [77] ABU BAKAR N N, BAZMOHAMMADI N, ÇIMEN H, et al. Data-driven ship berthing forecasting for cold ironing in maritime transportation[J]. Applied Energy, 2022, 326:119947.
- [78] WEN S L, ZHAO T Y, TANG Y, et al. Coordinated optimal energy management and voyage scheduling for all-electric ships based on predicted shore-side electricity price[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1):139-148.

- [79] DENG S Y, MI Z F. A review on carbon emissions of global shipping[J]. *Marine Development*, 2023, 1(1):4.
- [80] WANG H, AUNG M Z, XU X, et al. Life cycle analysis of hydrogen powered marine vessels: case ship comparison study with conventional power system[J]. *Sustainability*, 2022, 15(17): 12946.
- [81] YAO S G, LI C, WEI Y. Design and optimization of a zero carbon emission system integrated with the utilization of marine engine waste heat and LNG cold energy for LNG-powered ships [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 231: 120976.
- [82] 李小霞. 氢燃料叉车在绿色港口建设中的应用[J]. *中国港口*, 2020(9):60-61.
LI Xiaoxia. Application of hydrogen fuel forklift in green port construction[J]. *China Ports*, 2020(9):60-61.
- [83] 周专, 苗帅, 袁铁江. 基于系统动力学的交通领域氢能需求预测[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(4):33-39, 47.
ZHOU Zhuan, MIAO Shuai, YUAN Tiejia. Prediction of hydrogen demand in transportation field based on system dynamics[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(4):33-39, 47.
- [84] 王书征, 单婷婷, 赵洋, 等. 考虑不同制氢方法的高速公路加氢站布局规划[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(4):9-17.
WANG Shuzheng, SHAN Tingting, ZHAO Yang, et al. Layout planning for highway hydrogen refueling stations considering different hydrogen production methods[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(4):9-17.
- [85] XIE H P, ZHAO Z Y, LIU T, et al. A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation[J]. *Nature*, 2022, 612(7941):673-678.
- [86] ATILHAN S, PARK S, EL-HALWAGI M M, et al. Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry [J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2021, 31:100668.
- [87] 李立钦, 石庆鑫, 王月汉, 等. 计及高阶方程分段线性化的港口电-氢综合能源系统优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(12):21-28.
LI Liqin, SHI Qingxin, WANG Yuehan, et al. Optimal scheduling of electricity-hydrogen integrated port energy system considering piecewise linearization of high order equations [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(12):21-28.
- [88] 杜天硕, 李军徽, 葛磊蛟, 等. 计及海水淡化电制氢和热惯性的海港综合能源系统优化运行模型[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(12):143-150.
DU Tianshuo, LI Junhui, GE Leijiao, et al. Optimal operation model of seaport integrated energy system with seawater desalination for hydrogen production and thermal inertia[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(12):143-150.
- [89] 徐桂芝, 梁丹曦, 宋洁, 等. 风-光-氢-储综合能源系统日前经济调度[J]. *现代电力*, 2023, 40(6):939-946.
XU Guizhi, LIANG Danxi, SONG Jie, et al. Day-ahead economic dispatch of wind-photovoltaic-HESS-BESS integrated energy system[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(6):939-946.
- [90] 李梓丘, 乔颖, 鲁宗相. 海上风电-氢能系统运行模式分析及配置优化[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(8):104-112.
LI Ziqiu, QIAO Ying, LU Zongxiang. Operation mode analysis and configuration optimization of offshore wind-hydrogen system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(8): 104-112.
- [91] HOU P, ENEVOLDSEN P, EICHMAN J, et al. Optimizing investments in coupled offshore wind-electrolytic hydrogen storage systems in Denmark [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 359:186-197.
- [92] PIVETTA D, DALL'ARMI C, SANDRIN P, et al. The role of hydrogen as enabler of industrial port area decarbonization [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 189: 113912.
- [93] CAO S L, ALANNE K. Technical feasibility of a hybrid on-site H₂ and renewable energy system for a zero-energy building with a H₂ vehicle [J]. *Applied Energy*, 2015, 158: 568-583.
- [94] 陈笑云, 冯忠楠, 魏繁荣, 等. 基于气网-水网协同的多时间尺度氢供应链优化[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(12):159-167.
CHEN Xiaoyun, FENG Zhongnan, WEI Fanrong, et al. Optimization of multi-time scale hydrogen supply chain based on gas-water network collaboration [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(12): 159-167.
- [95] MCKINLAY C, TURNOCK S, HUDSON D. A comparison of hydrogen and ammonia for future long distance shipping fuels [J]. *Energy*, 2019, 170:557-568.
- [96] CCENGEL Y A. Power generation potential of liquified natural gas regasification terminals [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(4):3241-3252.
- [97] HE T B, CHONG Z R, ZHENG J J, et al. LNG cold energy utilization: prospects and challenges [J]. *Energy*, 2019, 170: 557-568.
- [98] TIAN Z, QI Z X, GAN W L, et al. A novel negative carbon-emission, cooling, and power generation system based on combined LNG regasification and waste heat recovery: energy, exergy, economic, environmental (4E) evaluations [J]. *Energy*, 2022, 257:124528.
- [99] 康丽虹, 贾燕冰, 田丰, 等. 含LNG冷能利用的综合能源系统低碳经济调度[J]. *高电压技术*, 2022, 48(2):575-584.
KANG Lihong, JIA Yanbing, TIAN Feng, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system containing LNG cold energy utilization [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(2):575-584.
- [100] 朱振山, 盛明鼎, 陈哲盛. 计及液态空气储能与综合需求响应的综合能源系统低碳经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(12):1-8.
ZHU Zhenshan, SHENG Mingding, CHEN Zhesheng. Low-carbon economic dispatching of integrated energy system considering liquid air energy storage and integrated demand response [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(12):1-8.
- [101] 李茜, 宾帆, 张安安, 等. 基于复合能源管道供能的区域综合能源系统优化运行[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(17):91-101.
LI Qian, BIN Fan, ZHANG An'an, et al. Optimal operation of regional integrated energy system based on energy supply through composite energy pipeline [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(17):91-101.

作者简介:

侯慧(1981—),女,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为多能微网运行调度、能源互联网等(E-mail: hushou@126.com);

谢应彪(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为港口多能微网规划运行及其不确定性调度(E-mail: xyngbiao@126.com)。

(实习编辑 丁欣欣)

Review of optimal scheduling for port multi-energy microgrid with energy and transportation coupling

HOU Hui^{1,2}, XIE Yingbiao^{1,2}, ZHAO Bo³, ZHANG Leiqi³, XIE Changjun^{1,2}, DONG Zhaoyang⁴

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Shenzhen Research Institute, Wuhan University of Technology, Shenzhen 518000, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;

4. Department of Electrical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The coupling of energy and transportation is the future development trend of port multi-energy microgrid. However, the port energy-transportation coupling confronts three pivotal problems, namely, how to clarify the collaborative scheduling potential of the transportation system, how to deal with the scheduling randomness of the energy and transportation sides, how to optimize the scheduling flexibility of multi-energy complementation. Aiming at the above problems, the current research status on the port energy-transportation coupling at home and abroad is reviewed. By sorting out the integrated structure of multiple energy units and transportation units under the energy-transportation coupling, the optimization scheduling models of port multi-energy microgrid are summarized. The research findings on scheduling potential, randomness and flexibility under port energy-transportation multi-network coupling and multi-energy complementation are discussed to further promote comprehensive efficiency optimization and carbon reduction development of the energy-transportation coupling. Challenges faced by the development of port multi-energy microgrid are discussed, such as the precise characterization of port uncertainty, the flexible resource aggregation of port transportation, the transformation in port high carbon emission attribute and the distribution of interests among different port stakeholders.

Key words: port multi-energy microgrid; energy-transportation coupling; scheduling potential; scheduling randomness; scheduling flexibility

(上接第49页 continued from page 49)

Market clearing mechanism considering cycle life of energy storage and quantitative analysis of locational marginal price forming cause

CHEN Zeyu, CHEN Yanbo

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The current market clearing models are difficult to reflect the true operation loss of electrochemical energy storage, which is not conducive to effective allocation of energy storage resource, and the formation mechanism of market clearing price becomes more complex after considering the participation of energy storage, the system operators often face the problem of difficulty in explaining the clearing results. An electric energy market clearing mechanism considering the improvement of energy storage cycle life is proposed, the operation loss of energy storage is correctly measured by introducing the accumulated discharge energy and corresponding unit cost. Aiming at the problem that it is difficult to verify and explain the market clearing price, a quantitative analysis method of forming cause for locational marginal price considering energy storage is proposed. The construction of locational marginal price is explained by establishing the correlation between quotation parameters and locational marginal price. The example analysis results show that the proposed market clearing mechanism can effectively reflect the operation loss of energy storage, thus can effectively promote energy storage participating in electric energy trading. The market clearing results based on the proposed model verify the correctness and practical application value of the quantitative analysis method of forming cause for locational marginal price.

Key words: locational marginal price; cycle life; market clearing; quantitative analysis; electrochemical energy storage

附录 A

表 A1 不同优化角度下目标函数、约束条件对比

Table A1 Comparison of objective functions and constraint conditions under different optimization perspectives

参考文献	优化角度			目标函数	约束条件	模型类型	求解方法
	单一能源	单一交通	能交耦合				
[8]	×	√	×	最小化偏离偏好泊位成本与滞期成本	船舶时空约束、潮汐约束、岸线长度约束等	MILP	GUROBI
[12]	×	√	×	最小化停泊距离和时间偏差	船舶时空约束、集装箱转运约束、泊位分配约束、岸桥分配约束等	MINLP	MNSGA-II
[14]	×	×	√	最小化能源供应成本	泊位分配约束、船舶负荷约束、功率平衡约束、设备出力约束、储能运行约束	MILP	GUROBI
[15]	×	×	√	最小化停泊时间偏差、能源侧运行成本	泊位分配约束、船舶停泊时间约束、岸桥分配约束、船舶与岸桥负荷约束、功率平衡约束、设备出力约束、储能运行约束，可再生能源与负荷不确定性约束	MILP	GAM
[16]	×	×	√	最小化船舶在港时长、能源侧运行成本	物流设备运行工况约束、物流设备能耗约束、船舶时空约束、功率平衡约束、设备出力约束、储能运行约束	MINLP	MNSGA-II
[17]	×	×	√	最小化能源侧运行成本	船舶停靠时间约束、船/车功率约束、功率平衡约束、设备出力约束、储能运行约束、风电不确定性约束	MILP 两阶段分布鲁棒优化	GUROBI
[18]	×	×	√	最小化能源侧运行成本	船舶/冷藏箱时空约束、船舶/冷藏箱能量响应约束、潮流约束、设备出力约束、二阶锥凸约束	鲁棒优化	GUROBI
[19]	×	×	√	最小化能源侧运行成本	岸电功率约束、功率平衡约束、储能运行约束、机组出力约束、风光不确定性	MILP 两阶段鲁棒优化	C&CG
[20]	√	×	×	最小化能源侧运行成本	液化天然气气化约束、冷能梯级利用约束、碳处理流程约束、功率平衡约束、设备出力约束、储能运行约束	MILP 两阶段分布鲁棒优化+随机优化	GUROBI

注：混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)；混合整数非线性规划(mixed-integer nonlinear programming, MINLP)；非支配排序遗传算法(modified non-dominated sorting genetic algorithm, MNSGA-II)；列约束生成算法(column-and-constraints generation, C&CG)；GUROBI、GAM 均为求解器

表 A2 港口物流作业的协同调度潜力相关研究总结

Table A2 Summary of research on collaborative scheduling potential in port logistics operation

参考文献	泊位调度	岸桥分配	岸桥调度	集装箱转运	能源系统耦合	优化目标
[8]	√	×	×	×	×	最小化停泊成本
[9]	√	×	×	×	×	最小化停泊时间
[10]	√	√	√	×	×	最小化作业时间
[11]	√	√	√	×	×	最小化停泊距离、时间偏差
[12]	√	√	√	√	×	最小化集装箱运距、时间
[7]	×	√	×	×	√	最小化港口运行成本
[14]	√	√	√	×	√	最小化待泊、延迟出发成本
[16]	√	√	×	√	√	最小化在港时长与系统成本

表 A3 港口调度随机性相关研究总结

Table A3 Summary of research on port scheduling randomness

参考文献	不确定性因素					所用方法
	船期 延误	物流 作业 时间	岸电 价格	可再生 能源发 电	负荷 预测	
[15]	×	×	×	√	√	两阶段 随机优化
[17]	×	×	×	√	×	两阶段 分布鲁棒优化
[18]	×	×	×	√	×	鲁棒优化
[19]	×	×	×	√	×	两阶段 鲁棒优化
[66]	√	√	×	×	×	两阶段 随机优化
[67]	√	√	×	×	×	两阶段 随机优化
[68]	√	√	×	×	×	两阶段 鲁棒优化
[69]	√	√	×	×	×	两阶段 鲁棒优化
[74]	√	√	×	×	×	两阶段 分布鲁棒优化
[75]	√	×	×	×	√	机器学习
[76]	×	×	√	×	×	强化学习