

我国水路交通与能源融合发展路径探析

袁裕鹏^{1,2}, 袁成清^{1,2}, 徐洪磊³, 严新平^{1,2,4*}, 何琳⁵

(1. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 武汉 430063; 2. 国家水运安全工程技术研究中心, 武汉 430063;
3. 交通运输部规划研究院, 北京 100028; 4. 武汉理工大学智能交通系统研究中心, 武汉 430063;
5. 海军工程大学舰船振动与噪声研究所, 武汉 430034)

摘要: 能源是人类社会生存和发展的重要物质基础, 水路交通作为交通运输行业的重要组成部分是能源消耗与温室气体排放的重点领域之一, 因此水路交通与能源融合发展成为应对资源紧缺、气候变化、环境污染等严峻挑战的有力举措。本文梳理了包括船舶、港口在内的我国当前水路交通用能特征形式, 从供给、质量、利用模式的角度评估了相关主体的能源需求演化趋势; 开展了水路交通与能源融合发展的技术性评估, 涵盖自然禀赋分析、基础设施资产能源化应用潜力、用能需求研判, 并据此提出了我国水路交通与能源融合的发展原则、思路与路径。本文从政策、关键技术、人才培养等层面提出了推动我国水路交通与能源融合的发展建议, 以期为领域交叉研究、水路交通行业高质量发展提供基础参考。

关键词: 水路交通; 新能源; 低碳燃料; 零碳燃料; 能源利用模式; 交通基础设施

中图分类号: U6-9 **文献标识码:** A

Pathway for Integrated Development of Waterway Transportation and Energy in China

Yuan Yupeng^{1,2}, Yuan Chengqing^{1,2}, Xu Honglei³, Yan Xinping^{1,2,4*}, He Lin⁵

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China; 3. Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China; 4. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 5. Institute of Noise and Vibration, Naval University of Engineering, Wuhan 430034, China)

Abstract: Energy is vital for the survival and development of human society. Waterway transportation, as a significant component of the transportation industry, is one of major fields of energy consumption and greenhouse gas emissions. Therefore, the integrated development of waterway transportation and energy becomes a powerful measure against severe challenges such as resource shortage, climate change, and environmental pollution. This paper reviews the current energy consumption characteristics of waterway transportation in China in terms of ships and ports, and evaluates the evolution trend of energy demand of relevant main parts from the perspectives of energy supply, quality, and utilization mode. The technical assessment of the integrated development of waterway transportation and energy is conducted, including natural endowment analysis, energy application potential of infrastructure assets, and research and judgment on energy demand. Based on this, the development principles, ideas, and pathways of water way transportation and energy integration in China are proposed. Moreover, this paper proposes suggestions for promoting the integration

收稿日期: 2022-02-17; **修回日期:** 2022-04-06

通讯作者: *严新平, 武汉理工大学智能交通系统研究中心、交通与物流工程学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为交通系统的安全性、智能化和绿色技术; E-mail: xpyan@whut.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划 (2021YFB2601601); 中国工程院咨询项目“中国交通与能源融合发展战略研究”(2021-XZ-22)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

of waterway transportation and energy in China from the aspects of policy, key technology, and personnel training, so as to provide a basic reference for cross-disciplinary research and high-quality development of the waterway transportation industry.

Keywords: waterway transportation; new energy; low-carbon fuel; zero-carbon fuel; energy utilization mode; transportation infrastructure

一、前言

随着全球一体化的深入发展和市场竞争加剧,水运行业在过去数十年间以追求高效化与低成本化为主要发展趋势,是化石能源消耗与温室气体排放的重点领域之一 [1]。国际海事组织等相关机构出台了一系列关于限制船舶排放的法规,各国也在不断深入推进产业结构调整,以解决水运行业能耗高、效率低的问题 [2]。20 世纪 60 年代以来,欧盟、美国、日本、澳大利亚等国家和地区开始着眼于水路交通与能源的融合发展,相关研究主要围绕船舶与能源融合、港口与能源融合以及航道与能源融合 3 个方向进行 [3];积极研制新能源船舶 [4~7],涉及太阳能、风能、核能、氢能等能源形式,运用纯电动船、液化天然气 (LNG) 内燃机、氨内燃机、甲醇内燃机、氢内燃机等动力形式。例如,2000 年,世界首艘商用的风能/太阳能混合动力双体客船“Solar Sailer 号”在澳大利亚成功下水试航;2009 年,世界首艘燃料电池船舶“Viking Lady 号”海洋工程船改装完成,配有功率为 320 kW 的燃料电池动力系统。在我国,新能源船舶研究起步较晚,2022 年,国家工业和信息化部“绿色智能内河船舶创新专项”示范船舶“长航货运 001”轮在江苏镇江正式交付,是我国内河首艘绿色智能船舶,设有“柴油主机+轴带电机+LNG 气体燃料发电机组+锂电池”的混合推进系统;另外,新能源港口机械 [8]、新能源航标灯等相关研究及示范应用也在逐步推进。

水路交通行业用能以燃油消耗、煤炭消耗、电能消耗为主,尤其是燃油消耗占比仍然很高。根据我国碳达峰、碳中和战略目标以及水路交通行业当前的能源结构,为应对全球气温升高和能源危机,水路交通领域应在传统能源供应基础上,从能量供应源头改变用能形式,积极采用可再生能源;对我国内河及沿海水路交通基础设施和运载装备的用能模式进行必要调整,更好适应能源形式的转变。值得指出的是,水路交通绿色化的进程离不开水路交通中使用能源的绿色化,离不开水路交通与新能源

的深度融合。推动我国水路交通行业进行绿色、低碳转型,必然面临包括内河及沿海的绿色交通基础设施布局、基础设施的能源需求形态优化、船舶动力系统能源多元化转变、能源融合核心技术攻关和相关装备研制在内的多项挑战,需要兼顾规划、政策、技术、经济性等多个方面进行系统深入的研究。

针对上述行业发展的迫切问题,我国已开展了相对充分的研究。具体包括在分析我国能源输送总体格局的基础上,研判能源输送发展趋势,提出推进能源输送网络与综合交通体系融合发展建议 [9];针对陆路交通系统,从技术角度探讨交通能源融合发展运行框架、控制方法,阐述能源系统与交通系统协同发展涉及的关键技术 [10];针对水路交通中的港口能源系统,提出水路交通与能源融合规划方法、运行方法、评估指标体系,兼顾运营管理及技术应用 [11]。本文着眼国家亟需并提炼研究切入点,重点从我国水路交通行业出发,剖析行业用能特征及能源需求演化趋势,分析内河及沿海区域的自然禀赋并评估相应交通基础设施资产的能源化应用潜力,提出我国水路交通与能源融合的发展路径,以期带动水路交通与能源高质量融合的产业研究。

二、我国水路交通的用能特征

(一) 船舶的用能特征分析

表 1 为不同动力形式船舶能源类型和能量传递方式。柴油机动力系统具有功率水平高、安全系数高等应用优势,在船舶动力系统诸多配置形式中,占主导地位的是“柴油机-轴系-螺旋桨”的动力系统配置,为此水路载运工具目前的用能特征仍然以采用船舶柴油机燃用轻/重柴油为主 [12],并在综合考虑绿色环保、市场效益、技术成熟度等因素的情况下,辅以应用包括柴油电力推进形式、柴油与 LNG 双燃料动力形式、多种清洁能源混合动力形式在内的新型船舶动力系统,提升船舶的绿色化水平 [13]。通过合适的参数设置和能量分配,多能源混合动力系统可以有效降低船舶的能耗和碳排放 [14]。

表1 不同动力形式船舶能源类型和能量传递方式

动力形式	能源类型	能量传递方式
主柴油机动力	燃油	柴油机-轴系-螺旋桨
电力推进	燃油	柴油发电机-变频器-电动机-螺旋桨
LNG双燃料动力	柴油/LNG	LNG双燃料发动机-轴系-螺旋桨
多能源混合动力	燃油和清洁能源	柴油机/太阳能/氢能/风能/储能等-变流器-电动机-螺旋桨 柴油机-轴系+太阳能/氢能/风能/储能等-变流器-电动机-螺旋桨

(二) 港口的用能特征分析

水路交通基础设施能量消耗方式主要是港口装备用能、交通用能、在港船舶用能等，包括港口机械和停泊船舶能源消耗两大类 [15]，如图1所示。基础设施能源消耗主要分为电能和燃油两大类。其中，电能占整体能源需求的主要部分，主要供给电力装卸设备；燃油则主要用于运输作业车辆。靠港船舶的早期用能主要是停泊发电机消耗燃油发电来满足；近年来靠港船舶则主要使用岸电系统，利用岸电设施为停靠船舶提供相对廉价、高质量、稳压稳频的电能，满足船舶用能需求，从而减少柴油发电机组的使用，减少船舶燃油消耗，降低船舶运营成本，优化港区大气环境，提高港口码头的竞争力。

基础设施的能量需求主要由电能、燃油、煤炭、LNG等能源提供。其中，电能、煤炭、燃油满足了绝大部分能量需求。电能主要用于装卸运输机械用电、堆存保障用电、维护管理用电；柴油主要用于装卸机械运输机械用油等；汽油主要用于车辆的公务通勤和维修用油等。

以天津港为例，该港作为我国北方最大的综合性对外贸易港，港内各类生产物流设施齐全，相关统计数据充足。天津港2018年的用能情况如下 [16]：

① 电力消耗占总能耗的比重约为36.08%，燃油消耗占总能耗的比重约为37.90%，煤炭消耗占总能耗的比重约为26.02%，耗能组成较为平均；② 生产用能占比约为40.69%，非生产用能占比约为59.31%，非生产用能消耗所占的比例相对较高；③ 在港口吞吐量增长了22%时，总能源消耗环比增长了10.42%，电能消耗的增长约为32.11%，超过了吞吐量的增长。

根据港口不同区域的功能定位，结合港口实际发展规划情况，港口能耗负荷主要包括临港/码头工业负荷、公共服务负荷、商业负荷、生活负荷4个部分，如图2所示 [17]。其中临港/码头工业负荷实行昼夜连续作业，有较大的用能需求，且对可靠性要求较高，在用能种类上，包括电、热、冷等多种用能形式；近年来，随着相关设备的升级改造，越来越多的港口工业设备实现了电气化运行（见表2）。公共服务负荷与商业负荷主要集中在白天，且所占港口负荷比重较小，对供能可靠性的要求不高，能源种类主要为电能。而生活负荷的特点在于其用能时序与其他类型的负荷正相反，负荷高峰一般出现在晚上，用能种类主要包括电、热和气等多种类型。

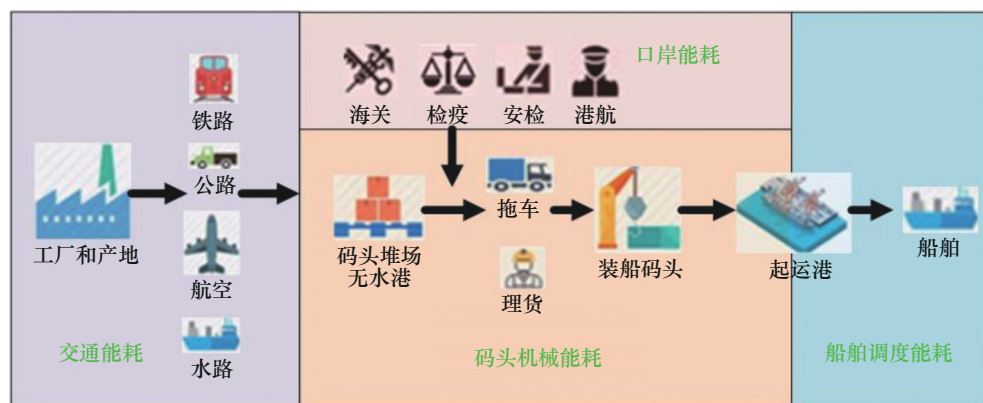


图1 水路交通基础设施能量消耗方式

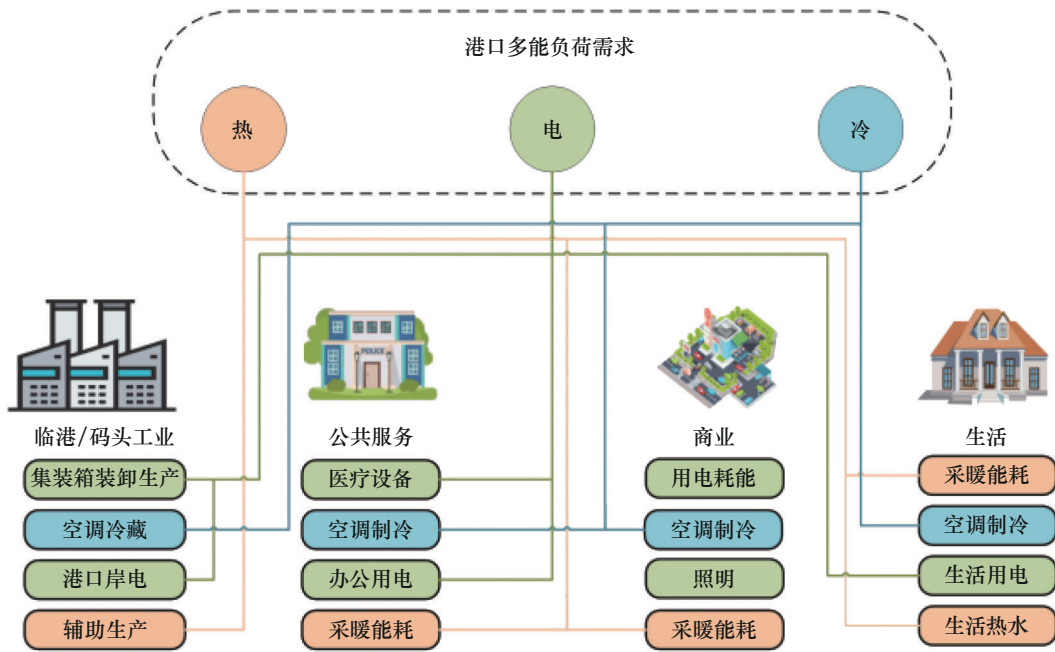


图2 港口多能负荷用能分析

表2 港口工业设备清洁能源替代方案分析

动力系统	码头起重机	轨道式龙门起重机	轮胎式龙门起重机	吊运机	堆场卡车	跨运车	自动引导车	自动堆垛起重机
柴油机	√		√	√	√	√	√	
电力	√	√	√	√	√	√	√	√
LNG			√	√	√	√		
氢气					√			

三、我国水路交通能源需求的演化趋势

(一) 碳排放视角下的能源需求演化趋势

为减少温室气体排放，全球主要国家和地区都积极制定了温室气体减排目标及不同时间节点下的行动方案，在联合国建立的全球应对气候变化政策框架下，我国与欧盟率先提出了碳减排路线规划图 [18]。

在碳排放视角下，为了实现“双碳”目标，船舶能源需求将从船用重油、轻油逐步向LNG等低碳燃料演化，最终发展为使用零碳燃料，如图3所示。零碳能源主要是氢和氨，在未来，氢和氨会从灰



图3 碳排放视角下的能源演化

氢/灰氨、蓝氢/蓝氨逐步向绿氢/绿氨发展，即通过可再生能源制取氢和氨，真正实现零碳排放 [19]。由此可见，立足于碳排放角度，水路交通能源需求将由高碳燃料向低碳燃料与零碳燃料进行演化。

(二) 能源供给视角下的能源需求演化趋势

在能源供给视角下，水路交通能源供给始于载运工具自携能源，将朝岸基能源转变，最终演化为载运工具清洁能源部分自洽，即载运工具配备太阳能和风能为辅的混合动力系统或者载运工具，可利用太阳能和风能进行制氢/氨，为船舶提供氢/氨能源，如图4所示。①当载运工具（船舶）通过所运载的能源为自身提供动力时，需设专门的燃料油舱，降低船舶的载货空间，进而影响载运工具的营运经济性。载运工具（船舶）自携的能源形式包括燃料油、LNG、氢能、氨能等 [20]。其中，燃料油可通过泊位、锚地进行加注，即分别通过陆地油罐



图4 水路交通能源供给转变趋势
注：LPG为液化石油气。

车与供油船向靠泊或抛锚船舶进行输油。②考虑到传统内燃机为主的动力形式会产生污染，影响空气质量和水源质量，岸基清洁能源的使用比例将日益提高。对于港口而言，可利用的能源有太阳能、风能、潮汐能等，在船舶靠港时为其供应岸电；还可以通过岸基电力为部分小型电池动力船舶充电提供航行动力。③随着“双碳”目标的提出，包括太阳能、风能、波浪能在内的清洁能源在船上的应用成为载运工具用能模式的重点发展方向。绿色能源的开发和利用可有效降低船舶发电机组或主机带来的能量损失，提高能量利用效率，因此，清洁能源自洽的发展模式具有广阔的发展前景。

(三) 能源质量视角下的能源需求演化趋势

目前，水路交通领域多使用化石低品位燃料，为提供燃料利用效率，燃料清洁高效利用、多能互补能源利用和余热回收利用等技术正在蓬勃发展。在未来，水路运输将越来越多将清洁与转换效率高的高品位能源作为首选。因此，在能源质量视角下，水路交通能源需求将由低品位能源向高质量能源方向演化。

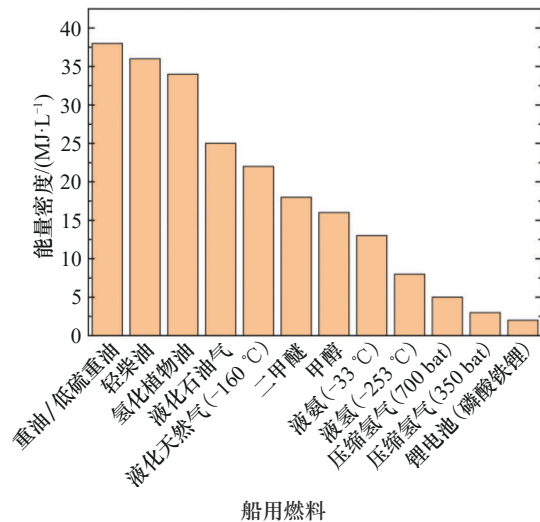
对高质量能源的评价通常可以从热力学、经济性角度来进行。除燃料本身价值外，燃料所占舱室容积大小会影响到船舶运营成本，而不同类型的燃料对船舶动力性影响较小，因此，可以从能量密度的角度对不同类型的燃料进行分析。船用燃料的体

积能量密度比较情况如图5所示。对于内河航行船舶来说，航程相对较短、靠港频次较高、燃料补给相对便利，除LNG、甲醇等低碳燃料外，还可以使用能量密度相对较低的能源；对于电池动力船舶来说，现阶段采用磷酸铁锂电池是较为均衡的技术路线，而三元锂电池将在更高密度需求的船舶应用领域发挥作用 [21]；对于国际航行船舶来说，航程较长、靠港频次低、燃料补给不便，对燃料的能量密度有一定要求，因此，可使用低碳燃料或氢燃料。

(四) 能源利用模式视角下的能源需求演化趋势

现有的能源利用形式过于单一，尚未充分实现不同种类能源间的交互以及循环利用，未来的能源利用形式将向多能源综合利用的方向演化。

图6列出了能源利用模式视角下的能源需求演化趋势。根据港口枢纽的条件，采用绿色能源与电网供电融合的“发电+储能”能源发展模式，可以减轻城市供电体系负荷；利用港口大型装备作业的



船用燃料
图5 船用燃料体积能量比较

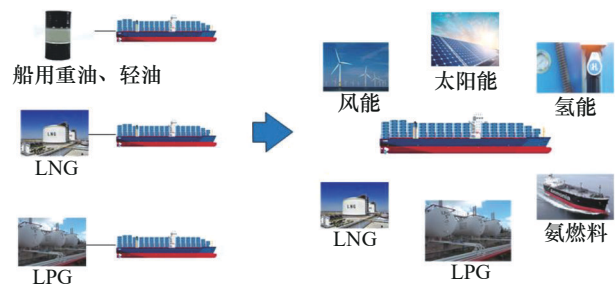


图6 能源利用模式视角下的能源需求演化趋势

特点,回收机械势能,并就近在本机利用;通过利用绿色能源进行电解水制氢,为港口移动装备燃料电池补充氢能;利用岸电技术,为靠泊船舶提供清洁电力。利用船舶的空间和资源,收集太阳能、风能及波浪能,形成多能源融合系统,为船舶提供电能;多余的电能制取氢气,为船舶氢动力装置提供氢源;收集船舶的振动能,为传感设备提供电源,从而实现多能源综合利用。

未来水路交通将致力于形成多能协同作用的能源网络,实现对不同能源的捕获、转换和控制,为载运工具和基础设施提供能源需求服务,大幅提高节能减排效果。

四、水路交通与能源融合发展的技术性评估

(一) 我国水路交通系统的自然禀赋分析

根据我国风资源分区,结合国家综合立体交通网中的港口和高等级航道网布局,通过地理信息系统叠加分析可知,我国绝大多数的内河和沿海主要港口位于我国风资源的四类区。在内河高等级航道中,约有95%(约为 2.5×10^4 km)位于风资源IV类区,约有3%(约为740 km)位于风资源III类区,约有2%(约为459 km)位于风资源II类区。我国高等级航道网所在风资源分区的基本情况如表3所示。

在光资源分布方面,我国内河高等级航道约有82%(约为 2.2×10^4 km)位于光资源III类区,约有17%(约4547 km)位于光资源II类区,约有1%(约318 km)位于光资源I类区。我国高等级航道网所在光资源分区的基本情况如表4所示。

由表3及表4可知,我国高等级航道自然禀赋条件尚可,全国大部分航道、港口拥有一定的风、光资源,能够开展新能源发电并应用的基础,具有基础设施资产能源化应用的潜力。

(二) 水路交通基础设施资产能源化应用潜力评估

为进一步评估水路交通基础设施资产能源化的应用潜力,分别对水路交通中的两个典型应用场景:港口及航道的发电潜力进行测算。

1. 港口发电潜力测算

以我国综合立体交通网中的沿海和内河主要港口(未包含香港港的数据)为研究对象,分别分析港区范围内建设光伏设备、风电设备可利用太阳

表3 我国高等级航道网所在风资源分区的基本情况

风资源分区	航道
II类区	澜沧江-湄公河航道 金沙江-长江航道
III类区	黑龙江航道部分流域 松花江航道部分流域
IV类区	松花江航道大部 长江航道 嘉陵江航道 岷江航道 北盘江-红水河航道 右江-西江航运干线 赣江航道 闽江航道 汉江航道 湘江航道 京杭运河 沙颍河航道 信江航道等

表4 我国高等级航道网所在光资源分区的基本情况

风资源分区	航道
I类区	溇沱河航道 南运河航道
II类区	黑龙江航道 松花江航道 嘉陵江航道 岷江航道 澜沧江-湄公河航道 金沙江-长江航道
III类区	长江航道 北盘江-红水河航道 右江-西江航运干线 赣江航道 闽江航道 汉江航道 湘江航道 京杭运河 沙颍河航道 信江航道等

能、风能的潜力。港区的面积、岸线长度和平均潮差数据主要来自港口规划和规划环境影响评估中的数据。若规划和环境影响评估中相关数据较陈旧或缺失,则分别以港口单位吞吐量(沿海或内河港口

分别计算)、港区面积、岸线长度、港口吞吐量数据为依据进行估算。

对于港口的发电潜力,按照两种利用方式进行评估,方式一为乐观场景测算,即在港区30%的总面积范围内铺设光伏或风力发电设备;方式二为一般场景测算,即在港区10%的总面积范围内铺设光伏或风力发电设备。

在测算太阳能的可装机容量时,以2015年发布的《光伏电站工程项目用地控制指标》为依据[22]。在假设太阳能经由光电设备转换为电能总输出效率为20%的前提下,我国港口区域乐观场景下的太阳能可装机容量约为29 623 MW,年发电量约为 5.74×10^9 kW·h;一般场景下的太阳能可装机容量约为14 760 MW,全年预计可发电量为 1.913×10^9 kW·h。

在测算风能的可装机容量时,以《电力工程项目建设用地指标(风电场)》为依据[23],单台机组用地指标按照3000 kW进行测算。除考虑机组基本用地指标外,风电站建设还需要考虑变电站、集电线路、管理中心、交通工程等用地情况,故综合用地指标按照机组基本用地指标的1倍进行测算。在风能经由机电设备转换为电能总输出效率为30%的假设前提下,我国港口乐观场景下的风能可装机容量约为 2.2×10^8 kW,年发电量约为 1.39×10^{10} kW·h;一般场景下的风能可装机容量约为 0.7×10^8 kW,年发电量约为 5.21×10^9 kW·h。

2. 航道发电潜力测算

对于内河航道的发电潜力,按照两种情景进行评估。情景一为乐观情景测算,约有20%的高等级航道两侧可铺设光伏或风力发电设备;情景二为一般情景测算,约有10%的高等级航道两侧可铺设光伏或风力发电设备。分别测算两种情景下,航道两侧各5 m范围内铺设光伏或风力发电设备时的装机容量。

在测算太阳能的可装机容量时,仍以《光伏电站工程项目用地控制指标》为依据,计算方法与港口相同。在太阳能经由光电设备转换为电能总输出效率为20%的假设前提下,我国内河航道乐观场景下的太阳能可装机容量约为2321 MW,年发电量约为 4.5×10^8 kW·h;一般场景下的太阳能可装机容量约为1160 MW,年发电量约为 2.3×10^8 kW·h。

在测算风能的可装机容量时,航道仍以《电力工程项目建设用地指标(风电场)》为依据,单台

机组用地指标按照3000 kW进行测算。在风能经由机电设备转换为电能总输出效率为30%的假设前提下,我国内河航道乐观场景下的风能可装机容量约为 2×10^7 kW,年发电量约为 1.43×10^9 kW·h;一般场景下的风能可装机容量约为 9×10^6 kW,年发电量约为 6.4×10^8 kW·h。

(三) 我国水路交通系统的用能需求分析

考虑我国目前发展现状,水路交通系统用能需求不断增加,且水路交通能源消费总量相比于全国其他能源消费总量占比较大。通过对货运总量和货物周转总量的预测,估算出下一阶段我国不同类型水路交通系统运输能耗的总量。

根据《中国统计年鉴2021》[24],2019年,我国交通运输、仓储及邮电通信业的能源消费总量约为 4.391×10^8 tce,约合 1.752×10^{11} kW·h,其中汽油的消费量为 6.25×10^7 t,占全国汽油消费总量的45.82%;柴油的消费量为 9.87×10^7 t,占全国柴油消费总量的66.14%;煤油的消费量为 3.69×10^7 t,占全国煤油消费总量的93.39%。

2019年,我国水路货运量为 7.47×10^8 t,货物周转量为 1.04×10^{13} t·km,其中内河运输、沿海运输和远洋运输货运总量及货物周转总量如表5所示。

2019年,123家公路水路运输企业的统计数据显示[25],远洋和沿海货运企业每百吨海里单耗0.48 kgce,港口每千吨单耗0.21 tce。2019年,我国水路交通运输能耗的基本情况为,远洋和沿海货运的能耗约为 2.27×10^7 tce,约合 1.85×10^{11} kW·h;港口能耗约为 2.93×10^6 tce,约合 2.38×10^{10} kW·h。

根据2019年水路交通运输基本情况及过往历史数据,分别对2025年、2030年、2035年水路交通运输发展情况进行预测,预测结果如表6所示。预计2025年、2030年、2035年全国港口吞吐量分别达到 1.66×10^{10} t、 1.74×10^{10} t和 1.78×10^{10} t[26]。同

表5 2019年我国水路交通运输基本情况

水路交通类型	货运总量/ ($\times 10^8$ t)	货物周转总量/ ($\times 10^8$ t·km)
内河运输	39.13	16 302.01
沿海运输	27.27	33 603.56
远洋运输	8.32	54 057.47
合计	74.72	103 963.04

样, 根据历史统计数据分别对 2025 年、2030 年、2035 年我国港口能耗进行预测, 预测结果分别为 2.83×10^{10} kW·h、 2.97×10^{10} kW·h、 3.04×10^{10} kW·h。

五、我国水路交通与能源融合的发展思路与发展路径

(一) 发展原则

根据“双碳”目标和当前水路交通行业的能源结构, 水路交通能源融合发展可分为“三步走”, 即短期战略(2021—2025年)、中期战略(2025—2030年)和长期战略(2030—2035年)3个阶段。短期战略是根据沿海港口的自然禀赋发展风能和太阳能, 水路载运工具提升化学储能装备和燃料电池的功率密度, 形成LNG、甲醇等低碳能源或油(气)电混合动力模式, 实现可再生能源与储能模式相结合。中期战略是深入推进河港口和锚地, 对其动力设备和载运工具实施电动化改造, 同时实现氢能的制取、存储与运输; 提高清洁能源的使用占比, 实现清洁能源自洽, 形成微电网的自给自足模式。长期战略是在此基础上推进至沿海和内河的自然禀赋匮乏区域, 实现余电上网模式, 构建多层次、一体化的水路交通与能源融合的枢纽体系。具体发展原则如下。

(1) 加快船舶动力系统能源的多元化转变。根据水路交通以国内内河航运为主、国际航运为辅的特点, 内河及沿海船舶由LNG、柴油机和蓄电池(超级电容)等多模式的柴(气)电混合动力船舶逐步过渡到纯电动船舶。国际航运船以氨和氢燃料

为主, 采用内燃机和燃料电池为主动动力, 以太阳能、风能等清洁能源作为辅助动力。

(2) 加快港口、锚地的能源需求形态转变。利用基础设施的自然禀赋, 在考虑经济成本和运行模式的前提下, 逐步淘汰以柴油机为代表的高能耗、高排放、低效率的老旧设备, 形成以太阳能、风能、波浪能和潮汐能等一次能源为主的能源融合系统。在满足港口、锚地和船舶岸电用能的同时, 富余电能接入储能系统或余电上网, 同时利用绿色能源电解水制氢, 实现绿色经济一体化的港船能源网络。

(3) 加快能源融合关键技术的攻关和核心装备的研制。以氨和氢气为代表的零碳燃料逐步取代传统燃料, 考虑技术的可行性和经济性, 需攻克众多核心技术, 如氨的引燃、氮氧化物减排、高密度储氢等。发展以蓄电池和超级电容为介质的储能系统, 进一步提升能量密度和降低成本; 突破载运工具轻量化、船舶风力助航、光伏发电和余热回收利用等关键技术, 助力实现净零碳排放。

(4) 加快相关行业技术标准与法规体系的制定。贯彻落实党中央、国务院“双碳”行动方案的部署和要求, 由中央财政设置专项资金, 对新能源动力船舶进行补贴试点, 并不断提高技术门槛。通过新能源行业技术标准, 引导水路交通能源融合, 形成完整的技术标准体系; 制定《新能源船舶补贴标准》, 完善《港口和船舶岸电管理办法》, 促使靠港船舶使用岸电; 实行碳税政策, 推行激励措施。

我国水路交通与能源融合发展在能源结构、基础设施、技术路线、法律法规等方面需要建立新的发展模式。只有推广成熟度高、可行性强的能源体系, 构建低碳和零碳燃料结构, 才能促进水路交通与能源有效融合, 实现水路交通的绿色化、智能化、高效化发展。

(二) 发展思路

按照我国水路交通能源系统供给将由低碳到零碳, 能源系统配用由低效到高效转变的现实需要, 实现能源结构的转变。通过优化水路交通系统的能源配置, 拓展覆盖范围, 提升货运量和货物周转量; 通过水路交通基础设施与新能源的融合集成, 构建清洁、高效和智能的新型水路交通能源系统, 并从“源-网-荷-储”4个层面构建清洁化、高效化的新型水路交通能源系统。

表6 2025年、2030年、2035年我国水路交通运输规模预测结果

时间/年	水路交通类型	货运总量/ ($\times 10^8$ t)	货物周转总量/ ($\times 10^8$ t·km)
2025	内河运输	43.3	19 080
	沿海运输	30.8	38 409
	远洋运输	—	10 569
2030	内河运输	46	21 710
	沿海运输	32.9	40 989
	远洋运输	—	11 108
2035	内河运输	46.3	23 000
	沿海运输	34.2	42 571
	远洋运输	—	11 108

在“源属性”层面：将水路交通能源应用多样化，在港口、船舶、航道和锚地等水路交通系统提升风、光等可再生能源占比。针对不同自然禀赋特征，对经济效益和发展潜力进行评估，提高用能自治率和新能源渗透率。根据船舶船型、航线、功能的不同，综合利用各种资源，使水路交通在“源属性”上体现出新的发展模式。

在“网属性”层面：将港口作为枢纽，在空间上加强港口、锚地、航道和船舶的联系。考虑水路交通能源系统的分散性和波动性，将太阳能、风能、波浪能和潮汐能等与电网融合，通过水路交通能源系统的多点互联、多能互补，实现用能形式的多样化，优化能源结构，构建分布式微网，并于2035年前形成集安全、智能、经济、绿色一体化的微电网体系。

在“荷属性”层面：将负荷用能需求分散到分布式微网中。针对电网的分散性和波动性，通过“源属性”“网属性”和“储属性”实现水路交通能源系统负荷侧的可控。形成基于变电站、储能站、配电站等的新型水路能源系统，实现水路交通能源系统的电力平衡，提高负荷侧的经济性和稳定性。

在“储属性”层面：将功率型储能和能量型储能技术应用于水路交通能源。储能系统可在较短的时间内释放能量，补偿电网中的能量波动，改善电能质量，提高电能利用率，同时提升了对风、光等一次能源的消纳能力，最终实现系统“源-荷-网-储”的协调运作。

综上，我国水路交通与能源融合需要切实提出具体的应用场景，明确研究路径，给予政策支持，发展相关产业，建立示范工程，形成与自然禀赋相适应的“源-网-荷-储”为一体的水路交通与能源融合系统。

（三）发展路径

以实现“双碳”战略为目标，以《交通强国建设纲要》为总指导，结合国务院《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划通知》、交通运输部《绿色交通“十四五发展规划”》等政策文件，按合理推进、逐渐推广的原则，水路交通与能源融合发展将由多风/多光区域逐步向少负荷/多光/多风区域、沿海和内河少光少风区域拓展，按序依次从沿海港口开发至内河港口。

根据我国水路交通资产能源化潜力测算，若综合考虑风、光自然资源禀赋，对2021—2025年、2026—2030年、2031—2035年3个阶段的清洁能源利用率分别按20%、40%、60%计算。根据水路交通系统用电负荷需求，在不考虑载运装备能耗前提下，在乐观场景下，计算出不用阶段内的自治率。

2021—2025年：我国新能源渗透率不低于15%，用能自治率预期可达17.3%。采用可再生能源发电配合复合储能的供能模式，优先开发沿海港口及近海多风、多光区域。该阶段用能主要仍以电网供电为主、可再生能源发电为辅。预计节能减排效果显著，能量利用效能逐步提高。

2026—2030年：我国新能源渗透率不低于35%，用能自治率预期可达33.1%。可再生能源发电配合氢能、复合储能可提供的有功出力进一步提高，剩余出力由电网补充。深入推进至自然禀赋优越、用能负荷较少的内河航道、港口、锚地及水上服务区。预计节能减排效果取得大幅进展，能效得到进一步提高。

2031—2035年：我国新能源渗透率不低于55%，用能自治率预期可达48.5%。可再生能源发电配合氢能和复合储能及微电网模式可提供约50%的有功出力，并在用能低谷期实现余电上网，逐步推进至沿海和内河少风少光的航道、港口。水路交通向实现智能化、绿色化、高效化和环境友好性大踏步前进。

六、推动我国水路交通与能源融合的举措与建议

（一）政策层面

明确战略定位，加强顶层设计。明确水路交通与能源融合的定位，将水路交通与能源融合发展纳入国家水路交通建设的发展战略，开展水路交通与能源融合发展规划研究和顶层设计。

落实融合理念，加快相关建设。普及水路交通与能源融合的思路，推广交通资产能源化的理念，将太阳能、风能、氢能等可再生能源系统纳入航道、锚地、港口等绿色化升级改造过程中，并同步至相关规划。

强化示范引领，实现精准扶持。推广水路交通与能源融合发展，联合研发企业、设计单位、造船企业、船东共同响应；研究并优化精准扶持范围，

提高补贴标准, 延长政策时限, 完善管理规定和标准规范, 激发各方积极性。

(二) 技术层面

加强自主研发, 推进技术创新。坚定推进水路交通与能源融合自主创新, 全面提升可再生能源系统的性能, 逐步突破航道、锚地、港口等典型应用场景下的关键技术, 推进全产业链发展。水路交通与能源融合涉及的关键技术如下。

1. “风、光、储、氢”多能源系统融合模式及匹配方法

不同的航道、港口自然资源禀赋各异, 交通资源能源化的方式也不同, 能源融合模式多样, 且可再生能源渗透率参差不齐; 此外, 港区用能设备众多, 各种机电系统耦合, 能耗大且难以预测, 靠港船舶能耗需求具有随机性和差异性; “风、光、储、氢”运行特性各异, 不同容量的各能源子系统匹配困难, 难以实现整体效率最佳。为此, 今后要重点突破“风、光、储、氢”多能源系统融合模式及匹配方法, 为水路交通与能源融合提供技术支撑。

2. 多能源系统的能源捕获与稳定控制技术

航道、港口风光资源捕获及其能源化利用是水路交通能源融合发展的基础, 同时港区负荷差异大、载荷范围宽等场景特征对“源-荷-储”的柔性互联、功率变换与稳定运行提出了新的要求。因此, 实现航道-港口-船舶多能源系统的柔性互联与稳定控制是水路交通与能源融合发展所要解决的关键问题。

3. 大容量氢气“制-注-储-供-用”一体化运行控制与安保技术

航道和港区的风、光、水等可再生能源自然禀赋充足, 但不确定性和随机性较大, 同时港区的用氢设备运行具有一定的周期性, 在波动制氢条件下合理的进行“制-注-储-供-用”全链条氢能量管理与调配, 同时在复杂条件下快速实现安全预警及应急处理, 是保障氢能安全、高效利用的关键。

4. 多能接入港区局域电网优化运行控制技术

对于电网接入大容量多类型综合能源的港区多能源系统, 部分多能流电源对外呈现出低阻尼或是负阻抗特性, 将使整个局域电网系统呈现出低惯量、弱阻尼的特征, 致使电网系统的抗扰动能力变差。因此, 需要针对多能源系统接入港区电网, 研

究多能源融合系统稳定运行的控制策略。

(三) 人才培养层面

打造特色学科体系, 助推行业持续建设。以学科的可持续发展为目标, 结合国家能源交通发展规划和战略要求, 综合多学科特点, 加快交通、电气和能源动力等学科的协同发展, 促进水路交通与能源融合, 推动“产学研用”一体化发展, 全面打造特色学科体系。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: February 17, 2022; **Revised date:** April 6, 2022

Corresponding author: Yan Xiping is a professor from the Intelligent Transportation System Research Center and the School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, and a member of the Chinese Academy of Engineering. His major research fields include safety, intelligence, and green technology of transportation system. E-mail: xpyan@whut.edu.cn

Funding project: National Key R&D Program of China (2021YFB2601601); Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Integrated Development of Transportation and Energy in China” (2021-XZ-22)

参考文献

- [1] 李晓易, 谭晓雨, 吴睿, 等. 交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 15-21.
Li X Y, Tan X Y, Wu R, et al. Paths for carbon peak and carbon neutrality in transport sector in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 15-21.
- [2] 王花云, 廖凌风, 马俊. 基于竞合理论的北部湾港口群吞吐量演化与竞争力提升研究 [J]. 广西财经学院学报, 2021, 34(6): 70-81.
Wang H Y, Liao L F, Ma J. Research on throughput evolution and competitiveness improvement of Beibu Gulf port group based on competition and cooperation theory [J]. Journal of Guangxi University of Finance and Economics, 2021, 34(6): 70-81.
- [3] 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 J Q, Mi H N, Cheng H W, et al. A planning model and method for an integrated port energy system considering shore power load flexibility [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12): 1577-1585.
- [4] Yuan Y P, Wang J X, Yan X P, et al. A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship [J]. Energy, 2018, 165: 965-978.
- [5] Qiu Y C, Yuan C Q, Tang J R, et al. Techno-economic analysis of PV systems integrated into ship power grid: A case study [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 198: 111925.
- [6] Mckinlay C J, Turnock S R, Hudson D A. Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol? [J]. International

- Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(55): 28282–28297.
- [7] De-Troya J J, Álvarez C, Fernández-Garrido C, et al. Analysing the possibilities of using fuel cells in ships [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(4): 2853–2866.
- [8] Corral-Vega P J, García-Triviño P, Fernández-Ramírez L M. Design, modelling, control and techno-economic evaluation of a fuel cell/supercapacitors powered container crane [J]. Energy, 2019, 186: 115863.
- [9] 曾学福. 综合交通基础设施建设与国家能源运输网融合发展的研究 [J]. 公路, 2022, 67(2): 172–180.
Zeng X F. Research on the integrated development of comprehensive transportation infrastructure construction and national energy transportation network [J]. Highway, 2022, 67(2): 172–180.
- [10] 何正友, 向悦萍, 杨健维, 等. 电力与交通系统协同运行控制的研究综述及展望 [J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 569–581.
He Z Y, Xiang Y P, Yang J W, et al. Review on cooperative operation and control of transportation and power systems [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 569–581.
- [11] 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/OL]. 中国电机工程学报, 2022, 3(5): 1–20. (2021-12-20)[2022-03-08]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212121>.
Fang S D, Zhao C H, Ding Z H, et al. Port integrated energy systems toward carbon neutrality (II): Flexible resources and key technologies in energy-transportation integration [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022, 3(5): 1–20. (2021-12-20)[2022-03-08]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212121>.
- [12] 王扬. 船舶动力系统现状及发展趋势 [J]. 中国设备工程, 2017(24): 180–181.
Wang Y. Present situation and development trend of marine power system [J]. China Plant Engineering, 2017(24): 180–181.
- [13] 浦金云, 方远, 伞兵, 等. 国外船舶生命力新技术发展与未来趋势 [J]. 海军工程大学学报, 2020, 32(6): 36–45.
Pu J Y, Fang Y, San B, et al. Development and future trend of overseas ships' new survivability technology [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2020, 32(6): 36–45.
- [14] Yuan Y P, Wang J X, Yan X P, et al. A review of multi-energy hybrid power system for ships [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 132: 11–81.
- [15] Misra A, Panchabikesan K, Ayyasamy E, et al. Sustainability and environmental management: Emissions accounting for ports [J]. Strategic Planning for Energy & the Environment, 2017, 37(1): 8–26.
- [16] 王欣. 天津港区分布式能源优化规划研究 [D]. 北京: 华北电力大学(硕士学位论文), 2017.
Wang X. Study on the optimization and planning of the distributed energy sources in Tianjin port [D]. Beijing: North China Electric Power University (Master's thesis), 2017.
- [17] Hua C Y, Chen J H, Wan Z, et al. Evaluation and governance of green development practice of port: A sea port case of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 249: 119434.
- [18] 国务院. 国务院关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通
知 [EB/OL]. (2022-01-24)[2022-03-28]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/content_5670202.htm.
- The State Council. Notice of the State Council on printing and distributing the comprehensive work plan for energy conservation and emission reduction in the 14th Five-Year Plan [EB/OL]. (2022-01-24)[2022-03-28]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/content_5670202.htm.
- [19] 吕龙德, 熊莹. 船舶动力路径 从常规燃料到低碳零碳排放 [J]. 广东造船, 2021, 40(6): 4–11.
Lyu L D, Xiong Y. Ship power path from conventional fuel to low carbon and zero carbon emission [J]. Guangdong Shipbuilding, 2021, 40(6): 4–11.
- [20] 邹乐, 曹俐. 中国沿海地区海洋交通运输业能源消耗驱动因素的时空差异特征 [J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(10): 3–9.
Zou L, Cao L. The spatiotemporal differences characteristics of the driving factors of energy consumption in marine transportation in China's coastal area [J]. Ocean Development and Management, 2021, 38(10): 3–9.
- [21] 邓磊, 吴钊, 帅晓睿. 后备用磷酸铁锂电池组应用特性研究 [J]. 电源技术, 2021, 45(11): 1424–1426.
Deng L, Wu F, Shuai X R. Characteristic study on lithium iron phosphate battery pack using as backup power [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(11): 1424–1426.
- [22] 国土资源部. 光伏电站工程项目用地控制指标 [EB/OL]. (2015-12-02)[2022-03-28]. http://g.mnr.gov.cn/201701/t20170123_1429897.html.
Ministry of Land and Resources. Land use control index of photovoltaic power station project [EB/OL]. (2015-12-02)[2022-03-28]. http://g.mnr.gov.cn/201701/t20170123_1429897.html.
- [23] 建设部, 国土资源部. 电力工程项目建设用地控制指标(风电场) [EB/OL]. (2012-02-07)[2022-03-28]. http://www.nea.gov.cn/2012-02/07/c_131395603.htm.
Ministry of Construction, Ministry of Land and Resources. Construction land index of power engineering project (wind farm) [EB/OL]. (2012-02-07)[2022-03-28]. http://www.nea.gov.cn/2012-02/07/c_131395603.htm.
- [24] 国家统计局. 中国统计年鉴—2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [25] 交通运输部. 2019年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. (2020-05-12)[2022-03-08]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202006/t20200630_3321335.html.
Ministry of Transport of the people's Republic of China. 2019 statistical bulletin on the development of the transportation industry [EB/OL]. (2020-05-12)[2022-03-08]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202006/t20200630_3321335.html.
- [26] 黄波. 碳达峰、碳中和对港口行业的影响及广州港相关发展建议和措施 [J]. 中国港口, 2021(12): 9–13.
Huang B. Impact of carbon peak and carbon neutralization on port industry and relevant development suggestions and measures of Guangzhou Port [J]. China Ports, 2021(12): 9–13.