

基于纯电动船舶应用实践的综合效益分析与推广

肖宇华¹,朱津仪²,齐路³,孙梦茹⁴

(1. 国网江苏省电力有限公司,南京 210000;2. 国网江苏省电力有限公司 连云港供电公司,江苏 连云港 222000;3. 国网江苏省电力有限公司 南京供电分公司,南京 210000;4. 国网江苏省电力有限公司 灌云县供电公司,江苏 连云港 222000)

Comprehensive benefit analysis and promotion based on the application

practice of pure electric ships

XIAO Yuhua¹, ZHU Jinyi², QI Lu³, SUN Mengru⁴

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China;2. State Grid Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222000, China;3. Nanjing Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China;4. Guanyun Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

摘要:电动船舶是船舶行业发展最有前景的技术方向之一,是实现水上交通领域双碳目标的重要举措。聚焦近年来电动船舶推广现状,以江苏电动船舶的应用实践为例,通过试验数据分析了电动船舶的建设成本高、运营成本低、环境减排效益显著等特点。基于主要特征进一步研究了电动船舶推广机制,阐述了江苏实践的相关举措与成效,通过建设电动船舶配套充换电设施、降低电动船舶使用成本等方法,为现阶段电动船舶的规模化推广提供参考。

关键词:电能替代;综合效益;推广机制;电动船舶

Abstract: Electric ship is one of the most promising technology directions for the development of shipbuilding industry. It's an important measure to achieve carbon peaking and carbon neutrality goals under the field of waterborne traffic. Focusing on the current situation of the promotion of the electric ship in recent years, taking examples of the application practice of electric ships in Jiangsu, the characteristics of the electric ship, such as high construction cost, low operating cost, and significant environmental emission reduction benefits, are analyzed through experimental data. Based on the main features, the promotion mechanism of the electric ship is further analyzed. The relevant measures and results of Jiangsu practice are expounded. Through the construction of charging/battery swap infrastructure facilities for the electric ship and the reduction of the using cost of electric ships, new directions for the large-scale promotion of the electric ship are provided.

Key words: electric energy substitution; comprehensive benefits; promotion mechanism; electric ship

0 引言

随着国家碳达峰、碳中和战略的持续推进,能源消费侧结构不断优化^[1-2],水上交通作为国家综合立体交通网中的重要一环,其清洁、低碳、高效的发展要求,为船舶行业发展带来新机遇。传统船舶动力系统采用柴油发电机组推进,电动船舶通过“以电代油”,依靠船用动力电池推进,在船舶靠港期间通过港口岸电为船供电并对船用电池充电,完全消除发动机的污染排放^[3-4],可广泛应用于游轮、公务船、作业船、货船、拖轮等。电动船舶零排放的

优势对于我国长江大保护等环保战略的实现也有着重要意义。

本文基于终端用能绿色低碳转型的新形势,梳理电动船舶的政策背景、技术优势与国内外推广现状,以目前江苏电动船舶应用为典型案例,对其开展综合效益分析,为电动船舶规模化推广提供参考。

1 电动船舶发展现状

1.1 政策背景

党的十八大以来,生态文明建设作为新的绿色发展理念已贯彻到社会建设各方面。党的十九大以后,绿色低碳制度体系更加完善,顶层设计更加优化,尤其是在“双碳”目标提出之后,电动船舶推

收稿日期:2023-03-17;修回日期:2023-06-11
基金项目:国家电网有限公司科技项目(5400202155463
A-0-0-00)

广获得更重要的契机。2021年10月,国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》,将交通运输绿色低碳行动列为“碳达峰十大行动”之一,发展电动船舶,因地制宜开展沿海、内河绿色智能船舶示范应用。2022年3月,国家发展改革委等十部委联合印发《关于进一步推进电能替代的指导意见》(发改能源〔2022〕353号),明确“十四五”期间加大绿色船舶示范应用和推广力度,推进内河短途游船电动化,研究探索其他具备条件的内河船舶电动化更新改造的可行性。2022年9月,工业和信息化部等五部门联合发布《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》(工信部联重装〔2022〕131号),提出加快发展电池动力船舶,重点推动纯电池动力技术在中短途内河货船、滨江游船及库湖区船舶等场景的应用。

2022年6月,江苏省发展改革委等十部门联合出台《关于印发进一步推进电能替代工作实施方案》(苏发改能源发〔2022〕660号),要求在港内作业船、短途运输船等场景推广应用新能源和清洁能源。2022年8月,江苏省政府办公厅印发《关于进一步提升全省船舶与海工装备产业竞争力的若干政策措施》(苏政办发〔2022〕53号),出台相关配套政策,由此电动船舶技术的发展进入快车道。

1.2 技术优势

1.2.1 提升稳定性

推进系统用电气调速取代机械调速,以电机取代热力发动机推进,有效简化了传动轴系^[5]。新技术可通过控制系统实现驾驶室的可靠遥控,以及对电动机及船舶的精确控制,利于提升船舶电气化、可靠性、反应速度及机动性,并且减少安装维护保养的工作强度。

1.2.2 提升可靠性

相比于柴油机发电机组电力推进系统,动力电池装置替代柴油发电机组提供电能,意味着船舶电源除提供能量外,还增加了储能功能,可有效稳定船舶电参数,提高供电可靠性。同时通过动力电池系统的功率变换设备等,减少船舶振动,降低船舶噪音^[6],提升船舶供电系统动态及静态性能,优化供电质量。

1.2.3 提升安全性

取消机舱及柴油机推进轴系,有效提升空间利用率,同样情况下可增大船舶空间近20%^[7]。同时,动力电池本体取代无效压载,置于底舱位置,提升船舶稳定性、安全性及舒适度。

1.3 国内外推广现状

欧洲及美国、日本电动船舶研制起步较早^[8],技术较为成熟,已形成一套相对成熟的市场推广运作机制。从外部环境来看,电动船舶生产较多的挪威、

法国等欧洲国家,水系充沛、河网密布、湖泊众多、内河航运发达,且多为短途运输,适宜电动船舶的推广使用。从技术来看,欧洲船用动力电池技术发展较早,船用动力电池是推动电动船舶发展的关键因素之一,回收价值更高的三元锂电池技术在国外电动船舶上应用更多。

国内电动船舶发展,从外部环境来看,广阔充沛的长三角、珠三角水域拥有发达的内河航运业,同时配套严格的船舶污染治理强制性措施,为电动船舶应用奠定了良好的基础。从技术来看,国内更注重应用的安全性与经济性,磷酸铁锂电池近几年在电动交通工具上的应用逐渐成熟,船用动力电池获中国船级社认证的企业也逐年增多。伴随未来的技术突破、产业成熟,国内电动船舶市场正迈入关键发展阶段。

2 江苏电动船舶典型案例分析

2.1 江苏电动船舶典型案例

2.1.1 华东首艘全电动大型商旅游船——“山水绿源号”

该船由江苏天目湖旅游股份有限公司投资运营,国网常州供电公司负责电动船岸电充电站建设以及外部电源线路接入改造,于2020年9月建成下水。船身总长32.65 m、总宽8 m,共分上下两层,载客数可达182名。整船采用双机双桨双舵行驶系统,操作灵活,安全性高。搭载的两台75 kW交流主机,最大航速可达17 km/h。整船容量1 000 kWh,相当于30辆电动汽车的满充电量。配套直流120 kW快充,充满7 h、最大续航100 km。预计年用电量7.36万kWh,可替代燃油70 000 L。投运至今游轮共运行362趟,航行759 h,充电69次,累计充电量达4.8万kWh。

2.1.2 全国首条运河千t级电动运输船——“中天电运001”

该船由国网江苏电力牵头,中天钢铁集团公司、上海瑞华集团公司与国网常州供电公司签订三方协议,采用市场化方式建设运营,供电公司负责建设充电设施以及外部电源线路接入改造,用于中天码头到新材料码头之间的矿渣运输,于2020年5月建成下水。船总长49.8 m、型宽10.6 m、型深3.9 m、吃水3.1 m、载重1 000 t、设计航速10 km/h,采用2台120 kW的电动机作为动力推进,装备双电(锂电池+超级电容)动力系统,电池容量1 500 kWh,续航里程50 km,使用移动式电源续航力可再增加100 km。配套高压6.6 kV/11 kV以及低压440 V岸电,采用快充

3 h 即可充满。船舶共开展短途和长途试航 29 次,总里程 1 000 km,累计用电 1.9 万 kWh。

2.1.3 太湖流域首艘电动作业船——“太湖电动 001 号”

该船由国网江苏电动汽车服务有限公司投资建设,出租给无锡五湖渔业公司,5 年租赁期满后,由承租方回购。主要用于太湖流域蓝藻打捞使用,于 2021 年 3 月建成并投入使用。该船全长 19 m,船宽 2.9 m,采用“2+1”台 10 kW 电动推进器,作业航速 8~10 km/h,续航力超过 10 h。该船舶采用“油改电”技术,船舶动力电池采用锂电池,容量 250 kWh。按每年运营 150 航次计算,年用电约 1.53 万 kWh,可减少燃油消耗 9 360 L,日常运行使用成本可降低 10%。

2.1.4 我国自主建造的首艘纯电动拖轮——“云港电拖一号”

该船由连云港港口集团有限公司投资并运营,岸电设施由国网连云港供电公司设计并投资建设。于 2021 年 8 月 16 日交付使用。该船舶总长 35.5 m、船宽 10 m、满载吃水 3.5 m、航速不小于 13 节、工作时长不低于 8 h,采用容量 5 000 kWh 磷酸铁锂电池组作为动力源,推进功率 3 000 kW,能够达到 2 984 kW 常规拖轮使用效果。配套 6 930 kVA 高压岸电系统,可完全替代传统大功率燃油拖轮。每日作业 8~10 h,据测算,该电动拖轮每年新增替代电量 60 万 kWh,节约燃油消耗约 34.95 万 L。

2.1.5 长江流域首艘 3 000 t 级纯电动干散货船——“船联壹号”

该船由国网南京供电公司及江苏船联新能源科技有限公司共同投资,并联合开展船舶油改电技术研发,由江苏船联新能源科技有限公司负责运营。2022 年 2 月 22 日举行正式下水仪式,之后正式启用。该船舶载重量为 3 000 t、额定功率 370 kW。采用 2 个 1 100 kWh 的可移动集装箱式磷酸铁锂电池组作为动力,为国内首创充换电兼容的大型船用动力电池组,续航能力 120 km,配套建成岸基直流充电设施 4 台,360 kW、180 kW 各两台。预计每年将用电 65 万 kWh,减少燃油消耗 35 万 L。

2.2 江苏电动船舶综合效益分析

2.2.1 建设成本

上述典型案例的电动船舶建设成本分析见表 1。电动船在船体造价成本上还不具备价格优势,电池占电动船舶制造成本的 30%~60%,上述电动船舶的动力电池成本平均为 0.2 万元/kWh,根据现有动力电池技术及材料状况,动力电池使用寿命约 10 年,年折算使用费用约 0.02 万元/kWh,电池价格高、需要额外配建岸电设施导致电动船舶总建设成本远高于传统船舶建设成本。随着电池动力系统技术发展,电池成本有所降低,但伴随新能源交通工具爆发式增长应用,原材料价格上涨。目前国内锂资源探明储量在不断增加,电池原材料价格未来仍将呈现整体下降趋势,电动船舶建设成本与传统船舶建设成本差距逐步减小,传统船舶建设成本经济性优势将逐步削弱。

2.2.2 运营成本

上述典型案例的电动船舶年均运营成本分析见表 2,其中船舶用电单价按国网江苏省电力有限公司岸电设施综合服务费 1 元/kWh 计算。电动船采用电能替代传统燃油,运营成本效益突出。从能源消耗费用来看,电动船舶较传统船舶消费成本平均降低 77%;从人工运维费用来看,因电动船电气化、智能化水平较高,电动船舶人工运维费用普遍低于传统船舶;从总体运营成本(能源消费+人工运维)来看,电动船舶较传统船舶平均降低 69%,运营经济效益显著。因此,电动船舶初始投资成本较高,但后期用能成本低,结合船舶的全生命运行周期进行整体测算,电动船舶仍具备一定经济效益,随着动力电池成本逐步下降,经济效益优势将日益显现。

2.2.3 社会效益

上述典型案例的电动船舶年度社会效益分析见表 3,柴油折标煤系数 1.457 1 kg ce/kg,电折标煤系数 0.122 9 kg ce/kWh^[9],柴油发电机组发电的转化效率约 31%,1 万 kWh 的电等效消耗 2.724 t 柴油,根据国际海事组织(IMO)《船舶能效营运指数(EEOI)自愿使用指南》,每吨柴油排放 3.206 t CO₂。根据生态环

表 1 电动船舶建设成本分析

Table 1 Analysis of the construction cost of the electric ship

| 电动船舶名称 | 电池容量/kWh | 电池类型 | 电池总成本/万元 | 总建设成本/万元 | 配套岸电建设成本/万元 | 若使用传统船舶的建设成本/万元 | 成本差额/万元 |
|----------|----------|------|----------|----------|-------------|-----------------|---------|
| 天目湖电动游船 | 1 000 | 磷酸铁锂 | 200 | 1 000 | 100.0 | 800 | 300.0 |
| 中天电动运输船 | 1 500 | 磷酸铁锂 | 300 | 466 | 100.0 | 350 | 216.0 |
| 太湖电动作业船 | 250 | 磷酸铁锂 | 50 | 100 | 4.2 | 35 | 69.2 |
| 连云港电动拖船 | 5 000 | 磷酸铁锂 | 1 000 | 2 000 | 900.0 | 1 600 | 1 300.0 |
| 南京纯电干散货船 | 2 200 | 磷酸铁锂 | 425 | 819 | 152.0 | 400 | 571.0 |

表2 电动船舶年均运营成本分析
Table 2 Analysis of average annual operating cost of the electric ship

| 电动船舶名称 | 年用电量/万 kWh | 用电单价/(元·kWh ⁻¹) | 电动船舶能源消耗费用/万元 | 电动船舶人工运维费用/万元 | 若使用传统船舶的燃油使用量/万 L | 燃油单价/(元·L ⁻¹) | 传统船舶燃油消耗费用/万元 | 传统船舶人工运维费用/万元 | 运营成本差额/万元 |
|----------|------------|-----------------------------|---------------|---------------|-------------------|---------------------------|---------------|---------------|-----------|
| 天目湖电动游船 | 7.36 | 1 | 7.36 | 20.00 | 7.000 | 6.75 | 47.250 0 | 47.37 | -67 |
| 中天电动运输船 | 2.00 | 1 | 2.00 | 20.00 | 2.000 | 5.60 | 11.200 0 | 41.92 | -31 |
| 太湖电动作业船 | 1.53 | 1 | 1.53 | 0.06 | 0.936 | 6.00 | 5.616 0 | 0.60 | -5 |
| 连云港电动拖船 | 60.00 | 1 | 60.00 | 160.00 | 34.950 | 6.75 | 235.912 5 | 223.00 | -239 |
| 南京纯电干散货船 | 65.00 | 1 | 65.00 | 36.00 | 35.000 | 6.50 | 227.500 0 | 90.00 | -217 |

境部《关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》(环办气候函[2022]111号)最新数据,电网碳排放因子0.581 0 t CO₂/MWh,每1万 kWh的电折合排放5.81 t CO₂。电动船舶与传统燃油船舶相比,CO₂年排放量显著降低,降幅约33%,节能减排效果显著。根据IMO报告,航运业的碳排放量占据全球CO₂排放总量的3%,因此电动船舶是推进水上运输行业双碳目标的重要实践,可有效降低船舶航行时的CO₂及其他污染物排放,为构建水上绿色高效交通体系作出贡献。

3 电动船舶推广机制研究

电动船舶的规模化推广需要政府、企业、船东三方协同参与。政府作为规则制定方,可用强有力的管控手段完善电动船舶市场推广机制的顶层设计。船东作为终端消费方,他们的使用需求构成电动船舶市场推广机制的底层逻辑。而建立在两者之间的电动船舶制造企业、航运企业、码头企业、岸电建设企业等,则需要在既定规则的框架内,从消费方的需求出发,提供适合的条件,最终达成三方共赢的局面。因此从以下3方面入手,可拆解电动船舶面临的难题与相应的推广解决机制。

3.1 加快配套基础设施建设

根据上文综合效益分析可知,新兴电动船舶市场还处于培育期,研发投入大、科技含量高、电池成

本居高不下,导致电动船舶的建设成本明显高于燃油船舶,虽然后期维护成本、充电成本较低,仍难以抵消前期一次性巨额投资的压力,目前仅能在部分领域试点示范。电动船舶更适用于短途货运船、港口作业船、执法船、景区游船等应用场景,不太适用于远洋、长途货船,因此技术水平及成本投资是制约电动船舶行业发展的潜在原因,现阶段更应注重电动船舶行业的可持续发展,加强电动船舶配套岸电基础设施建设,政府部门对于具备良好示范推广效应的项目给予专项财政资金支持,物价部门完善岸电使用价格收费政策,降低电动船舶的使用成本,港口码头企业在新建或改造初期,将岸电建设纳入整体规划。

为做好行业支撑,江苏全省大力推进岸电建设,国网江苏电力投资建设的岸电设施超过500套,截至目前江苏泊位码头岸电覆盖率已达70%以上。此外国网江苏电力积极做好港口码头岸电设施红线外配套电网投资建设,并试点实施岸电使用服务费优惠,实现船舶使用岸电综合成本(电费和服务费)低于燃油发电成本,降低船舶的使用成本。

3.2 完善激励惩罚措施

根据电动汽车相关博弈论模型^[9],配套基础充电设施建设可以从根本上提升行业的产业基础,但同时必需配套政府强制性措施,加强监管力度,才能保证基础设施建设起到正面提升作用。

江苏省目前已将电动船舶的应用纳入了地方发

表3 电动船舶年度社会效益分析
Table 3 Analysis of annual social benefit of the electric ship

| 电动船舶名称 | 年用电量/万 kWh | 电动船舶CO ₂ 排放值/t | 若使用传统船舶的燃油使用量/t | 传统船舶CO ₂ 排放值/t | CO ₂ 减排量/t |
|----------|------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------|
| 天目湖电动游船 | 7.36 | 43 | 20 | 64 | 22 |
| 中天电动运输船 | 2.00 | 12 | 5 | 17 | 6 |
| 太湖电动作业船 | 1.53 | 9 | 4 | 13 | 4 |
| 连云港电动拖船 | 60.00 | 349 | 163 | 524 | 175 |
| 南京纯电干散货船 | 65.00 | 378 | 177 | 568 | 190 |

展规划,《江苏省“十四五”长江经济带船舶污染治理行动方案》明确了电动船舶和配套充换电设施的建设目标,对不按规定使用岸电的,按照《长江保护法》等法律法规实施行政处罚,2024年推动形成一批新能源船舶航线。在实现“双碳”目标的契机下,紧紧围绕长江大保护等生态文明建设要求,建议交通运输主管部门制定激励与惩罚并重的措施,引导存量船舶主动实施改造,新增船舶优先选用电动船舶。在游船、小型作业船领域规模化推广电动船舶,在电动拖船、大型运输船领域开展示范项目建设。

3.3 宣传普及应用

根据最新统计年鉴数据,我国现有机动船保有量12.68万艘,而根据相关调研,近几年电动船舶的应用仅有近百艘,船东作为电动船舶的终端消费者,对电动船舶的使用态度也是推动电动船舶市场发展的重要因素。建议行业主管部门普及推广电动船舶使用优势,政府、船舶制造企业联合电力部门共同做好各领域典型船舶的示范应用,以可复制可推广的经验凝聚社会共识,营造良好发展氛围。

国网江苏电力现已在游轮、干散货船、拖轮、运输船等不同领域打造各类典型示范,配套建设岸电设施保障电动船舶充电需求。“国内首艘纯电动拖轮下水作业”、“长江流域载重3 000 t级电动货船下水起航”等电动船舶新闻宣传在央视、新华社等主流媒体获得广泛报道,形成良性社会影响。

4 结束语

电动船舶是电能替代技术的重要应用场景,是终端绿色低碳转型的典型示范,本文对电动船舶发展现状进行调研,基于江苏电动船舶应用实践作综合效益分析,在推广机制上进行有益探索。目前电动船舶在适宜短途航运的游船、运输船、作业船、货船、公务船、拖轮等均已具有可复制可推广的典型示范项目,未来几年伴随着电池技术的成熟与完善,必将迎来规模化推广应用阶段。电动船舶的大规模应用,其充电负荷波动会对电力系统产生冲击,对电网电能质量与安全稳定运行也将产生一定影响。建议有效协调政府、企业、消费者三方之力,促进形成电动船舶市场化推广良性机制,带动电动船舶产业发展。

参考文献:

- [1] 屈博,刘畅,李德智,等.“碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J].电力需求侧管理,2021,23(2):1-3,9.
QU Bo, LIU Chang, LI Dezhi, et al. Research on the de-

velopment strategy of electricity substitution under the target of “carbon neutral”[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2):1-3, 9.

- [2] 于海波,陈景琪,刘强,等.电能替代行业现状分析与建议[J].电力需求侧管理,2020,22(3):2-7.
YU Haibo, CHEN Jingqi, LIU Qiang, et al. Analysis and suggestions on the current situation of electrical energy substitution industry [J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(3):2-7.
- [3] 李斌.发展港口岸电系统 助推全社会节能减排[J].电力需求侧管理,2015,17(4):1-6.
LI Bin. Develop shore electric power system to improve social energy-saving and emissions reduction [J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(4):1-6.
- [4] 李作锋.江苏电能替代的研究与实践[J].电力需求侧管理,2016,18(5):1-3.
LI Zuofeng. The research and practice of electric energy alternative in Jiangsu [J]. Power Demand Side Management, 2016, 18(5):1-3.
- [5] 周镇海.浅析纯电动船的应用前景[J].中国水运,2020(11):109-110.
ZHOU Zhenhai. Application prospect of pure electric ship[J]. China Water Transport, 2020(11):109-110.
- [6] 吕明杰,岂兴明,尹航,等.浅析内河纯电动船舶发展现状[J].船电技术,2022,42(1):28-31.
LYU Mingjie, QI Xingming, YIN Hang, et al. Brief analysis of development status of pure electric ships on inland waterway [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2022, 42(1):28-31.
- [7] 谈微中,严新平,刘正林,等.无轴轮缘推进系统的研究现状与展望[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(3):601-605.
TAN Weizhong, YAN Xinpeng, LIU Zhenglin, et al. Technology development and prospect of shaftless rim-driven propulsion system [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2015, 39(3):601-605.
- [8] 秦琦,王宥臻.全球新能源(清洁)船舶及相关智能技术发展[J].2018船舶智能能效技术国际高峰论坛,2018,29(S1):29-41.
QIN Qi, WANG Youzhen. Global new energy(clean)ship and related intelligent technology development [J]. 2018 International Summit Forum on Ship Intelligent Energy Efficiency Technology. 2018, 29(S1):29-41.
- [9] 秦字兴,朱阁.基于政府、企业和消费者三方博弈的电动汽车市场推广分析[J].工业工程,2015,18(4):1-8,42.
QIN Zixing, ZHU Ge. A marketing analysis of electric vehicles based on trilateral game among government, enterprises and consumers [J]. Industrial Engineering Journal, 2015, 18(4):1-8, 42.

作者简介:

肖宇华(1984),男,江苏江阴人,硕士,高级工程师,主要从事电力市场开拓、电能替代等工作;

朱津仪(1995),女,江苏连云港人,硕士,助理工程师,主要从事电力市场开拓、电能替代等工作;

齐路(1994),男,安徽桐城人,硕士,工程师,主要从事电力需求侧管理、用电检查等工作。

(责任编辑 水 鸽)