

船用模块化集装箱式动力电池的运营模式设计

张文芬^{1,2*}, 汤旭晶², 严新平², 史旭初³

(1. 武汉纺织大学, 湖北 武汉 430200; 2. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430063; 3. 浙江省湖州市港航管理局, 浙江 湖州 313000)

摘要: 纯电池动力船舶是实现清洁能源动力技术之一, 近年来发展迅速。由于船舶电池动力模组容量大制造成本高, 船东难以承受初装投资, 以及充电和维护需专业人员管理等应用推广困难, 解决这一问题的有效办法是将电池动力组做成集装箱式的模块化, 采用换装方式为船舶提供电池动力, 变传统柴油动力船舶买油开船为纯电池动力船舶租电航行, 并实现快速续航。这一电池动力营运模式的变革具有重要意义。本文提出了“船电分离、换电租赁”的新型船舶运营模式, 并结合内河 64TEU 集装箱绿色智能示范船舶项目进行分析, 这种新型运营模式可以提高纯电池动力船的运营效率和动力电池利用率, 实现交通网和能源网的协同优化。

关键词: 船电分离; 电动船; 运营模式; 减排

中图分类号: TK01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 10—0006—04

“3060”碳达峰碳中和的发展目标使航运业按下碳减排的“加速键”。电动船舶是船舶智能化、绿色化发展的必然产物, 也是船舶行业实现节能减排和转型升级的重要路径。近年来, 电动船舶在内河货运船舶、景区游船、城市渡轮等得到了广泛的应用^[1-3]。

2020 年中国电动船舶用锂离子电池出货量达到 75.6MWh, 市场规模达 0.95 亿元, 同比增长 67.1%。近年来动力电池技术性能的不不断提升, 《中国制造 2025》、《产业结构调整指导目录(2019 年版)》、《纯电池动力船舶检验指南》、《内河绿色船舶规范》等一系列政策标准的出台, 有力支撑了电动船舶发展。

截至 2020 年底, 全国拥有水上运输船舶 12.68 万艘(内河 11.5 万艘, 占比 90%), 未来纯电动船的推广应用, 将改变水运能源结构。2016 年以来, 全国各地船舶电动化发展需求非常旺盛, 按照 2025 年船舶锂电化渗透率 20% 测算, 我国电动船舶市场规模将达到 550 亿元。

尽管我国电动船舶市场潜力巨大, 但推广应用面临着诸多难点和阻碍。其一是经济难点, 由于电池动力制造成本高, 船东难以承受昂贵的动力电池初装费用。目前船用磷酸铁锂电池的价格在 2000 元/kWh 左右, 即容量为 1000kWh 动力电池价格近 200 万, 比肩千吨级传统内河船的造价成本, 且经初步估算, 1000kWh 动力电池仅能维持千吨级船舶航行 100km, 船舶吨位和航行距离的增加还会使得电池容量需求倍增。其二, 电池后期的维护保养及老化退役问题, 让船东们对电动船望而却步。电池购买后并非一劳永逸, 目前船

用动力电池的循环寿命 3500 次左右, 电池容量衰减到 80% 将不能作为动力电池, 理想情况下电池使用寿命也仅 8 年左右, 若电池维护保养不当还将加速电池的电池老化、衰减, 这意味着若干年后, 船东将面临更换电池的难题, 电池使用越久, 电池退役的问题会暴露得更加明显^[4-6]。其三, 传统的靠岸充电运营模式影响了船舶运营效率, 也制约了电动船舶的推广应用。一方面, 船舶能量需求大, 航行环境复杂, 里程焦虑问题比电动汽车更突出; 另一方面, 船舶搭载的动力电池容量大, 充电时间长, 长时间等待充电将严重影响船舶运营, 也占用宝贵的岸线资源, 不适用于电动船舶未来的发展。

解决这一问题的有效办法是“船电分离、换电租赁”的运营模式, 即船舶不配备固定电池动力组, 将电池动力组做成可移动的模块化集装箱式, 采用换装方式为船舶提供电池动力, 变传统船舶买油开船为电动船舶的租电航行。这一动力电池营运模式的变革具有重要意义。一来船东只用支付租金, 解决了船舶电池动力初始投资成本高的难题, 另外电池租赁模式下电池厂家负责电池日常维修保养, 船东无需承担电池退役风险, 此外, 由于换电操作时间相对短, 可实现快速续航, 可以提高船舶的运营效率和动力电池利用率, 实现交通网和能源网的协同优化。

1 船用模块化集装箱式动力电池运营模式设计

“船电分离、换电租赁”的新型船舶运营模式能有效解决电动船初始投资成本高的难题, 且具有方便快捷, 节约充电等待时间的优势, 对于电动船舶未来的发展有

很好适应性。

1.1 模块化集装箱式动力电池

模块化集装箱式动力电池因具有国际标准化尺寸和接口，适应于各种运输工具和装卸设备，且具有容量大，安全可靠的特点，在船用动力电池领域有广阔的应用前景。模块化集装箱式动力电池是指以磷酸铁锂电池为能源载体，采用 20 英尺标准集装箱为成组单元的高度集成、大容量、可移动的通用模块化电源系统。集装箱式动力电池包括电池管理系统、空调系统、消防系统、配电系统等，可实现模块与电网间便捷、安全地快速接通与脱离，从而使这种更换模块实现船舶能量快速补充的换电模式得以实施。近年来，宁德时代、亿纬锂能、国轩等许多动力电池龙头企业都在积极研发生产船用集装箱式动力电池。

以亿纬锂能公司为例，研发的 20 英尺船用集装箱动力电池容量为 1080kWh 左右，采用两层钢板中间填充 A 级防火阻燃岩棉的集装箱壳体，集装箱尾部配置 2 个内嵌式 10kW 空调，内部温度实时监测，在超过限制温度 35℃后启动空调运行，电池箱额定输出电压 576V，额定输出频率 50Hz，容量 1890AH，防护等级为 IP67，采用主动式七氟丙烷消防系统，能量密度为 170Wh/kg 左右，一个标箱的动力电池重量在 15t 左右。

1.2 模块化集装箱式动力电池运营

本文设计了一种船电分离的模块化集装箱式动力电池运营模式，船舶上不配备固定电池包，而是装载模块化集装箱式动力电池，当电池电量不足时船舶航行至换电站，进行换电作业，待充电电池运送至充电站充电，满电电池运送至换电站，考虑各充换电站用电需求的随机性，满电电池也可以在不同的换电站进行调运，运营模式示意图如图 1 所示。

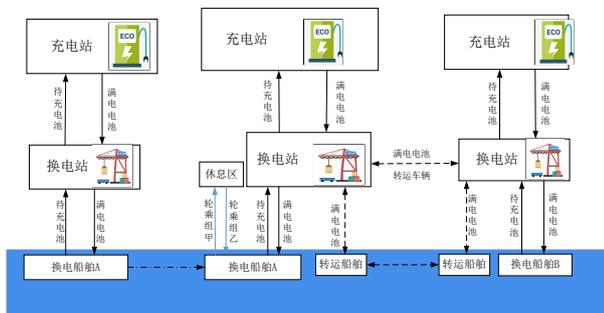


图 1 模块化集装箱式动力电池运营模式图

1.2.1 模块化集装箱式动力电池换装

船舶航行至换电站，利用港口装卸设备将亏电（待

充）电池箱从船上卸下至换电站，再将换电站的满电电池箱更换至船上，转运工具将亏电电池转运至充电站进行充电，在保证电池正常周转的前提下，结合区域分时电价合理规划充电时间，一方面节约充电成本，另一方面给能源网进行削峰填谷。满电电池箱提前运送至换电站，并利用正面吊、叉车等辅助设备对集装箱的堆叠和运输作业；亏电电池箱从船上卸下后再通过集装箱汽车转运至就近充电站充电。由于模块化集装箱式动力电池装卸过程中要进行集装箱接口对准、电池箱网线拔插、接口保护等环节，装卸时间会略长于普通集装箱货物，换电时间约 30min。

1.2.2 箱式电池的站内配置和站间调度

综合考虑船舶换电需求、换电站和充电站容量、转运时间等因素，采用联合储备的方式，合理规划满电电池箱在换电站、充电站的储备量。船舶通航环境复杂，充电需求随机性较大，电池箱需要在各充换电站间进行调运，调运包括水上调运船舶和陆上调运车辆两种形式，考虑经济性和便捷性，可将过路船、顺路车作为调运交通工具，支付调运费用，委托完成调运。

1.2.3 充电模式

按照充电站的位置，电池充电模式可细分为岸边充电、集中充电（充电站），两种方式。岸边充电是指充电站建设在该换电站内或附近岸边，充电在换电站内或附近完成，通过正面吊或者叉车即可完成亏电和满电电池箱运输作业。集中充电是一个充电站覆盖若干换电站，通常充电站建设在港口内陆地区，将多个换电站电池集中起来充电，完成充电后统一配送。现阶段尤其是少量电动船通行时，换电站间距较大，动力电池调运时间长，调运成本高，不适合集中充电，多在换电站附近岸边建设充电站，随着充电网密度增大，可考虑集中充电产生规模效益。关于充电速度，目前 200A 左右的充电电流的充电桩，理论可以在 5h 左右完全充满单个集装箱。

1.2.4 电池租赁的商业运营模式

船东是船舶所有者，是电动船推广应用的主角。从商业运营的角度，船电分离的运营模式可使得船东无需承担动力电池的初装费用，购船成本低，且从换电站租赁电池同时享受换电站的专业服务和专业技术支持，换下来的亏电电池由厂家收集并负责后期维护保养，这种“船电分离、换电租赁”的新型船舶运营模式变传统船舶买油开船为电动船舶的租电航行，节省船舶充电等待时间，

船舶运营效率高，且随着电池使用寿命下降和性能价值降低这种租赁需求会显得更加迫切和明显。

2 实践案例

2.1 项目概况

内河 64TEU 集装箱绿色智能船舶是国家重点研发计划“综合交通运输与智能交通”专项的示范工程。浙江省湖州市安吉县是习总书记“两山”重要理论的发源地，湖州市也是全国首个获批建设生态文明先行示范区的地级市和国内唯一一个国家内河水运转型发展示范区。2020 年湖州港集装箱吞吐量达 55.8 万标箱。

示范船为 64TEU 集装箱的敞口集装箱纯电动动力船舶，主要航行于浙江湖州安吉县上港川达码头（位于湖梅线暨长湖申西延航道）至上海外高桥航线，该航线全程约为 274 公里，年吞吐量接近 25 万 TEU，航线上有 25 艘柴油动力集装箱船在长期定点营运，其中单船月平均航次为 7~8 次。

2.2 64TEU 集装箱绿色智能示范船舶运营模式设计

64TEU 集装箱绿色智能示范船舶设计航速 6kn，载重量 1803t，额定功率为 $2 \times 150\text{kW}$ ，船上可同时搭载 4 个标准 20 尺集装箱动力电池，单个电池箱容量为 1083kWh。船舶在目标航线上航行的典型工况为下行载重量 800t，26.4h 到港；上行载重量 930t，30.8h 到港。

2.2.1 充换电站的选址

从起始港安吉上港到外高桥码头沿途水上服务区、码头 4 座，可考虑布局充换电服务站，但基于各充换电站建设可行性，包括政策、经济、配套基础设施等方面的因素^[7-8]，且为满足 64TEU 纯电动动力船舶航行需求，示范船岸基充换电站建设一期工程的选址为安吉上港码头（简称安吉站）和闵行吴泾电厂（简称闵行站），如图 2 所示。

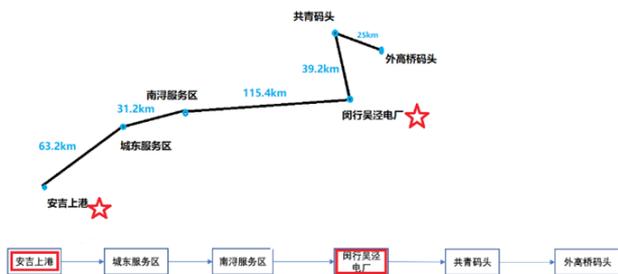


图 2 充换电站布局图

通过在传统柴油船舶上进行随船测试得到实时柴

油消耗数据，并运用海军系数法折算为电能需求，测算船舶上下行分段航行能耗需求，并考虑配置电池时需要有 20% 的富余量，最终得到船舶典型工况下电池容量需求如表 1 所示。

表 1 典型工况下电池容量需求表

能耗需求	安吉-闵行	闵行-外高桥	合计
航行距离 (km)	210	64	274
下行 (kW-h)	2173	754	2926
上行 (kW-h)	2850	995	3845
		合计 (kW-h)	6771

注：下行为安吉到外高桥方向，上行为外高桥到安吉方向

2.2.2 集装箱式动力电池营运作业

示范船模块化集装箱式动力电池舱位有四个，即最多同时装载 4 个模块化箱式电池，考虑磷酸铁锂电池的放电深度不能超过 80%，即单个模块化集装箱式动力电池的可用电量约为 860kWh 左右，结合船舶典型工况下电池容量需求表 1，设计集装箱式动力电池营运作业如图 3 所示。

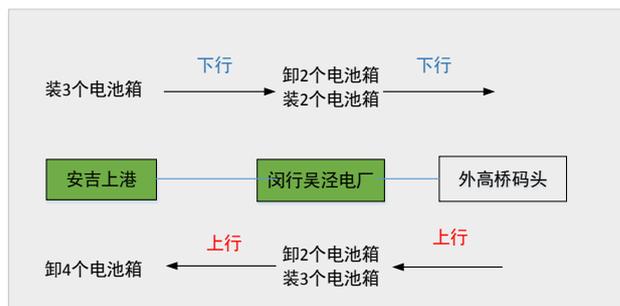


图 3 换电示意图

分析各航段的电池运营作业情况如下：

安吉站闵行站：船舶在安吉站装 3 个满电电池箱航行至闵行站时，两个电池箱的可用电量用完，第三个电池箱预计剩余电量为 639kWh。

闵行站外高桥闵行站：在闵行站卸 2 个耗尽电的电池箱，装 2 个满电电池箱航行至外高桥并折返回闵行站，两个满电电池箱用完，第三个电池箱预计剩余电量为 620kWh。

闵行站安吉站：在闵行站卸 2 个耗尽电量电池箱，装 3 个满电电池箱航行至安吉港，航行至安吉站，完成整个往返航次，预计剩下电池余量为 365kWh。

综上，示范船从安吉站出发后，下行到闵行站租赁换电一次，到达外高桥折返上行，上行至闵行站租赁换电一次，继续上行至安吉站。若考虑提高集装箱式动力电池利用率，船舶下行至闵行站卸下 2 个亏电电池箱能在船舶返航至闵行站时充好电，则可配置 6 个电池箱保

证一艘示范船营运周转,实现交通网和能源网的协同优化。

2.3 效益分析

2.3.1 船舶运营效率分析

与传统的充电模式相比,换电模式的运营效率大幅提升。换电运营模式下,示范船往返一个航次,需要进行三次换电作业,换电时间合计约1.5h;若采用传统靠岸充电的方式,假设岸基配备3个充电桩,往返一个航次也需要10h,船舶营运效率下降,且船舶充电占用岸线资源,影响泊位作业计划和船舶调度。

2.3.2 经济效益分析

据统计,该航线上船舶年航次数78次。传统64TEU柴油动力船舶往返一个航次的能耗为1612L,按照柴油6.5/L的价格计算,船舶每年的能耗费用是81.73万元;电池动力船舶往返一个航次所需的能耗为5642kW·h,按照当地政府提供的优惠岸电电价0.33元/kW·h,加上岸电服务费0.7元/kW·h,船舶每年的能耗费用是45.32万。因此,与传统的柴油机船舶相比,一艘64TEU船电池动力船舶一年可节约36.41万元的能耗费用,未来航线上的25艘燃油船舶都更新为电池动力船舶,每年可节约910.25万元。

2.3.3 社会效益分析

单艘传统在航64TEU船舶年耗油量为108.55t,参考发改委、环保部颁发的污染物排放计算公式,可得传统64TEU柴油机船舶年二氧化碳排放量GCO₂为336t,年二氧化硫排放量为GSO₂为140kg,年氮氧化物排放量为GNO_x为1044kg,年颗粒物排放量为GPM为258kg。由于64TEU集装箱绿色智能示范船舶为纯电池动力船舶,不存在油污水污染、大气污染,将大幅度减少噪声污染,跟传统的柴油机船舶相比,每年可减少二氧化碳排放336t,硫氧化物和氮氧化物排放1184kg,最小颗粒物排放258kg,且无油污水污染,具有较好的市场前景。该示范船舶也可在我国其他内河水网地区推广应用。

3 结论

国内外电动船舶运营管理处于起步阶段,尚未建立成熟的电动船舶运营管理模式。基于船东初始投资、电池保养维护、船舶运营效率等因素考虑,传统靠岸充电的方式不适应未来电动船舶发展需求。如何科学规划组

织电动船舶运行,提出适用于电动船舶发展的动力电池的充换电运营管理模式,是电动船舶实际运营中亟待解决的现实问题。本文提出了“船电分离、换电租赁”的新型船舶运营模式,试图解决电动船初始投资大、充电等待时间长等难点。随着电动船舶批量下水运营,在充换电设备接口标准化、电源接口拔插、多站点融合一体化管理、船员值班制度、现代船员培训等方面仍面临着诸多挑战^[9-10],需要相关从业人员和科技工作者统筹谋划、精准施策,为电动船舶发展创造更加和谐的运营环境。

参考文献:

- [1] 张文芬,严新平.基于事故树法的船舶动力电池充换电安全分析[J].交通信息与安全,2018,v.36;No.215(06):45-52
- [2] 瞿小豪,袁裕鹏,范爱龙.动力电池系统在运输船舶上的应用现状与展望[J].船舶工程,2019,v.41;No.272(10):117-123
- [3] 瞿小豪,袁裕鹏,严新平.发展电池动力船舶技术 助推长江经济带绿色航运发展[J].中国水运(上半月),2018,(09):14-16
- [4] 孙玉伟,胡克容,严新平,等.新能源船舶混合储能系统关键技术问题综述[J].中国造船,2018,59(01):226-236
- [5] Hui Chen, Zehui Zhang, Cong Guan, et al. Optimization of sizing and frequency control in battery/supercapacitor hybrid energy storage system for fuel cell ship[J]. Energy, 2020, 197(1):117285
- [6] Peng Wu, Julius Partridge, Richard Bucknall. Cost-effective reinforcement learning energy management for plug-in hybrid fuel cell and battery ships[J]. Applied Energy, 2020, 275:115258
- [7] 孙秉珍,杨佳楠,白军成等.充电中断情景下电动汽车充电站两阶段多目标区间选址优化决策[J].2021.03:1-10
- [8] 张海静,杨雍琦,赵昕等.计及需求响应的区域综合能源系统双层优化调度策略[J].中国电力,2021,54(4):141-150
- [9] 严新平,实施自立自强科技创新 开拓长江航运高质量发展新局面[N].中国水运报,2021.08-25
- [10] 吕卫国,加快电动船舶发展 助力交通行业碳达峰[N].中国水运报,2021.04-09.

基金项目:湖北省发展战略咨询项目 HB2021B09;湖北省教育厅哲学社会科学基金项目 20Q070;湖北省高等学校人文社会科学重点研究基地企业决策支持研究中心项目 DSS20190104。