

引用格式: 方斯顿, 王鸿东, 张军军. 船舶大容量储能系统应用研究综述[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 22–35.

FANG S D, WANG H D, ZHANG J J. A review of shipboard large-scale energy storage systems[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(6): 22–35.

船舶大容量储能系统应用研究综述



扫码阅读全文

方斯顿¹, 王鸿东^{2*}, 张军军³

1 香港中文大学 信息工程系, 香港 999077

2 上海交通大学 海洋智能装备与系统教育部重点实验室, 上海 200240

3 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: 储能系统是船舶中的重要设备, 可为各类船舶负荷提供能源。随着电力推进技术的成熟, 全电船舶已成为未来船舶设计的主要方向。在此背景下, 储能系统将由主要为辅助负荷供能逐步发展到为多类型船舶负荷供能, 特别是作为船舶动力系统的重要组成部分与各类船舶主/辅机配合, 在满足船舶各类负荷需求的前提下提高船舶的经济/环保特性。功能角色的转变加速了大规模储能系统接入船舶, 带来了储能系统的状态估计、能量管理、优化规划等一系列问题。首先, 对目前的储能技术进行分类; 然后, 介绍典型全电船舶的分类方法并指出储能系统的应用场景; 最后, 提出大容量储能系统接入船舶后带来的若干亟待解决的技术问题, 即船舶储能系统分布式控制、船舶储能系统适应性规划与优化, 以及船舶储能系统状态评估。所做研究可为未来大规模储能系统在电力化船舶上的应用研究提供参考方向。

关键词: 全电船舶; 大容量储能系统; 状态评估; 分布式控制; 适应性能量管理

中图分类号: U665.12

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02363

A review of shipboard large-scale energy storage systems

FANG Sidun¹, WANG Hongdong^{2*}, ZHANG Junjun³

1 Department of Information Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

2 Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment and System Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

3 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: The energy storage system is an essential piece of equipment in a ship which can supply various kinds of shipboard loads. With the maturity of electric propulsion technology, all-electric ships have become the main trend of future ship design. In this context, instead of being mainly responsible for auxiliary loads as in the past, the energy storage system will be responsible for multiple types of ship loads, especially acting as a part of the ship's power system and cooperating with the ship's main/auxiliary engines to improve its economic/environmental characteristics. This change in role will accelerate the integration of large-scale energy storage systems into ships, bringing a series of issues such as energy storage system state estimation, energy management and optimization planning. This paper first classifies current energy storage technologies, then introduces the structures of typical all-electric ships and points out the application scenarios of energy storage systems, and finally proposes several technical problems that need to be resolved after large-capacity energy storage systems are connected to ships, namely the distributed control of ship energy storage systems, adaptive planning and optimization of ship energy storage systems, and state estimation of ship energy storage systems. This study clarifies the future roadmap for large-scale energy storage integration into electrified ships.

Key words: all-electric ships; large-scale energy storage system; state estimation; distributed control; adaptive energy management

收稿日期: 2021-04-23

修回日期: 2021-07-09

网络首发时间: 2021-09-18 17:39

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51909162); 中核青年英才计划项目

作者简介: 方斯顿, 男, 1991年生, 博士。研究方向: 移动微电网能量管理。E-mail: sidunfang@cuhk.edu.hk

王鸿东, 男, 1989年生, 博士, 副研究员, 博士生导师。研究方向: 船艇智能控制与测试。E-mail: whd302@sjtu.edu.cn

*通信作者: 王鸿东

0 引 言

近年来, 远洋航运承担了世界近 90% 的物流需求^[1-2], 但同时也产生了约占全球排放量 3% 的二氧化碳和近 15% 的氮氧化物^[3]。国际海事组织 (IMO) 研究指出, 若对航运排放不予控制, 至 2050 年, 全球航运的排放量将增加 50%~250%^[4]。为控制航运排放, 第 70 届航运环境保护会议指出, 2025 年后建造下水船只的能效设计指标 (energy efficiency design index, EEDI) 应比 2005 年至少提高 30%^[5-6]。这些强制性的减排要求给船舶各功能分区的设计运行带来了巨大挑战, 促进了各类新技术的提出和应用, 全电船舶即是其中的代表^[7-9]。

作为近年来兴起的一种新型船舶, 全电船舶的主要特点是采用船载综合电力系统 (integrated power system, IPS) 为各类船舶负荷 (如推进器、雷达、船锚、空调等) 提供能源, 从而有效降低船舶设备冗余, 提高船舶运行效益。与此同时, 各类设备的电气化也对船舶能量/功率的实时平衡提出了更高要求, 即船载 IPS 发电侧需实时满足船舶负荷侧的需求。但因船舶的航行环境时刻处于变化中, 船载 IPS 的能量管理/功率控制会极大地影响船舶的可靠性、经济性和环保性, 因此成为近年来全电船舶领域研究的重点^[10-14]。

由于特殊的运行环境, 船载 IPS 相比陆地电力系统具有 3 类特点: 孤立运行特性、移动特性和负荷特性, 可将其看作是一种“移动型孤立微电网”。孤立运行特性, 是因为船舶在航行过程中无法与主电网进行能量交换; 移动特性, 是全电船舶作为交通工具的一种属性; 负荷特性, 由船舶所承担的任务决定, 不同任务类型的船舶通常具有不同的运行特性, 例如液化天然气船需要为再液化设备供能, 邮轮需要为其冷热负荷供能, 冷柜货轮则需要为其冷藏负荷供能^[10]。与此同时, 在各类全电船舶中, 推进负荷始终是主要的负荷类型, 而推进负荷又与船舶航行速度直接相关^[15-17], 因此船舶在不同运行状态 (如停泊、航行、动力定位等) 下的负荷峰谷差有可能高达 70% 以上^[17]。若只使用船舶发电机跟踪负荷, 有可能导致船舶发电机偏离其经济运行点或是频繁启停, 从而影响船舶动力系统的经济性和可靠性。同时, 随着各类高功率设备 (如电磁弹射器、电动船锚、有源雷达等) 在船舶上的应用^[18], 也给船舶运行带来了巨大的挑战。而储能系统因具有吸收/释放能量的能力, 可作为能量/功率缓冲器

来实现船载 IPS 发电侧和负荷侧的能量平衡, 因此在全时间尺度的全电船舶管理中具有应用前景^[18-20]。储能系统包括多种类型, 分别具有不同的技术特点, 在不同场景中其应用的特点也不尽相同, 因此有必要对其进行总结分析而为未来的研究打下基础。

储能系统的核心部件是储能设备, 目前已应用的储能设备类型包括铅酸电池、锂电池、液流电池、超级电容、超导电磁储能等, 全面分析其技术特点及其在船舶应用方面的潜力是后续研究的前提。全电船舶亦包括不同的类型, 如渡轮、邮轮、工程船舶、冷链运输船舶等, 分别包含不同类型的负荷和运行方式, 可为储能系统的应用提供不同的平台。综上所述, 本文拟针对大规模储能系统的船舶应用进行综述, 从储能类型划分、技术特点和场景应用这 3 个方面总结当前的研究现状, 并给出未来的关键研究问题。

1 储能技术研究综述

1.1 能量型与功率型储能技术

根据储能技术的能量/功率特性, 可以分为能量型和功率型 2 类。能量型储能具有较大的能量密度, 在实际应用中主要是利用其长期充放电能力。功率型储能具有较大的功率密度, 在实际中主要是利用其短时功率输出能力。图 1 给出了典型储能的能量密度、功率密度、功率投资成本及技术成熟度等数据, 数据总结自文献 [21-24]。

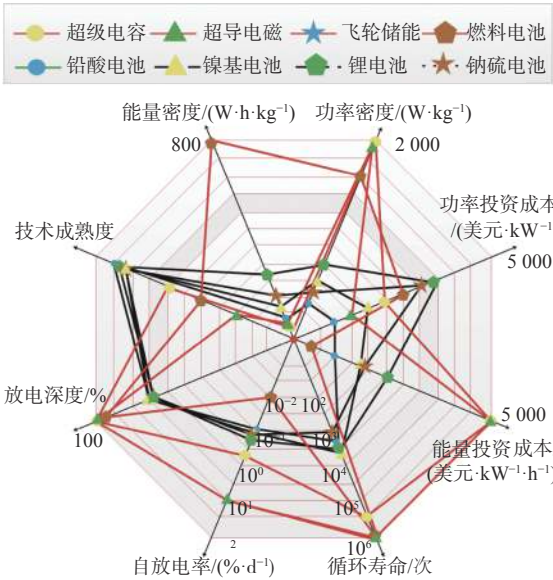


图 1 典型储能技术特性
Fig. 1 Characteristics of typical energy storage

在图 1 中, 红线代表功率型储能, 黑线代表能

量型储能。从图中可以看出,不同的储能技术其运行与经济特性不同。例如,超级电容器具有相当高的功率密度(黄色圆形, $>2\,000\text{ W/kg}$),但其能量密度非常小($<5\text{ (W}\cdot\text{h)/kg}$),因此只能应用于高功率场景中。再如锂电池(绿色五边形),其功率密度和能量密度均优于其他能量型储能设备,且自放电率极低,但其投资成本较高,因而在实际应用中受经济条件的限制。综上,在实际应用中需进行对比分析以确定储能设备各自的应用场景。

1.2 储能设备类型

1.2.1 铅酸电池

铅酸电池最早于 1890 年提出,是目前技术条件最成熟、应用时间最久的能量型储能技术^[24]。铅酸电池最大的优势是价格低廉、自放电率低(平均每天 $0.1\%\sim 0.5\%$),其功率成本仅 $300\sim 600\text{ 美元/kW}$,能量成本仅 $150\sim 500\text{ 美元/(kW}\cdot\text{h)}$,仅相当于镍基电池的 $1/2$,锂电池的 $1/4$ ^[25]。但铅酸电池的能量密度较低,仅 $30\sim 50\text{ (W}\cdot\text{h)/kg}$,大规模应用会导致巨大的体积和重量。因此,铅酸电池被广泛应用于各类对投资较敏感的小规模储能场景中^[26-27]。

1.2.2 镍基电池

镍基电池主要分为 2 类:镍镉电池和镍氢电池^[28]。这 2 种电池的原理相似,但镍氢电池不含有剧毒的镉元素,对环境更友好^[28-29]。相比其他类型的电池技术,镍基电池在低温($-40\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)下具有良好的电气性能^[30],并具有比铅酸电池更高的能量密度($50\sim 75\text{ (W}\cdot\text{h)/kg}$)和更高的循环寿命($2\,500\sim 3\,000$ 次)。同时,镍基电池也具有明显的记忆效应,若长期浅充浅放,会影响电池的使用寿命。近年来,由于环境原因,部分国家地区已禁止使用镍镉电池^[29]。改进型的镍氢电池的记忆效应要弱于镍镉电池,但其效率偏低($50\%\sim 65\%$)^[22],因而制约了这类电池的进一步使用。

1.2.3 锂电池

锂电池兴起于 2000 年后,是钴酸锂(LiCoO_2)、磷酸铁锂(LiFePO_4)、锰酸锂(LiMnO_2)等锂元素电极材料电池的统称。该电池的能量密度远高于铅酸电池和镍镉电池,可达 $80\sim 200\text{ (W}\cdot\text{h)/kg}$,同时还具有极高的能量效率($>97\%$)和极低的自放电率($<0.3\%/天$)^[22],无明显的记忆效应,是目前研究最多的一种电池技术。锂电池的缺陷主要在于高投资成本及其安全性。随着锂电池技术的进步和锂电池组规模化、集成化生产的推广,锂电池的价格由 2010 年的 $1\,000\text{ 美元/(kW}\cdot\text{h)}$ 下降到了 2016 年的 $300\text{ 美元/(kW}\cdot\text{h)}$ ^[31]。有研究表明,锂电池的成本至 2025 年会降低到 $109\text{ 美元/(kW}\cdot\text{h)}$,至

2030 年会降低到 $73\text{ 美元/(kW}\cdot\text{h)}$,这意味着在未来,投资成本将不再是限制锂电池应用的首要因素。对于锂电池的安全性问题,由于其采用的是金属电极材料,在高温下电极有可能会融化而导致短路进而造成安全事故,且锂电池的寿命又受放电深度和电流大小的影响,长期深度放电和大电流放电都会严重损耗电池寿命^[24],因此,锂电池在运行过程中需安装限流器和温度控制器,防止因大电流和温度造成的损耗^[32]。

尽管如此,因其优异的电气特性,锂电池仍是目前最具前景的能量型储能技术,众多研究聚焦于提升锂电池的能量密度和功率密度并降低其投资成本。其中,掺杂有石墨烯的锂电池表现出了优异的特性^[33]。石墨烯导热性良好,同时具有相当大的比表面积,可以有效提高锂电池电极的导热、导电性能,从而增加锂电池的容量并延长寿命^[34]。

1.2.4 钠硫电池

钠硫电池提出于 1960 年,是一种针对大型固定储能电站的储能技术^[21]。该电池的工作温度范围为 $300\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$,用以确保电极处于液态,从而保持电池的导电效率^[21]。钠硫电池的能量密度和功率密度与锂电池接近,可达 $200\text{ (W}\cdot\text{h)/kg}$ 和 200 W/kg ,理论最大设计容量可达 $244\text{ MW}\cdot\text{h}$ ^[22]。钠硫电池具有维护方便、效率高($75\%\sim 90\%$)^[23]、循环寿命长($>4\,000$ 次)等优点,但其初始投资成本高($300\sim 500\text{ 美元/(kW}\cdot\text{h)}$, $1\,000\sim 3\,000\text{ 美元/kW}$),并具有一定的危险性(电极短路会导致爆炸),因此在实际应用过程中需要高精度温度、电流控制设备来保证电池处于稳定工作状态。

1.2.5 超级电容

超级电容又称电化学双层电容器,是一种新型储能技术,其主要通过电极之间的电场储存能量。相比普通电容器,超级电容具有更大的比表面积和更短的间隙,因此具有更大的容量^[22]。相比各种能量型储能技术,超级电容具有更大的功率密度(可达 $5\,000\text{ W/kg}$)、极长的寿命($>100\,000$ 次)和极快的响应速度($<5\text{ ms}$)。但其缺陷也同样明显:能量密度低($<5\text{ (W}\cdot\text{h)/kg}$),难以支撑长时间放电,能量成本高($300\sim 1\,000\text{ 美元/(kW}\cdot\text{h)}$)。基于上述特性,一般将超级电容作为功率型储能设备,用于需要短时高功率输出的场景中。另一方面,由于超级电容在运行过程中不涉及化学变化,因此在充放电时不存在热量管理问题,更加环保。这些特点使得超级电容在实际项目中成为研究的热点^[22-32]。

1.2.6 超导电磁储能

超导电磁储能是一种基于超导线圈的储能设

备,其主要利用导体在超低温下的超导特性,利用大电流产生的磁场储存能量^[35]。超导电磁储能最大的优势是效率极高(>97%),并具有很高的功率密度(>2 000 (W·h)/kg)。超导线圈本身没有任何损耗,其损耗主要来自外部的电力电子器件。超导电磁储能主要的缺陷是,要维持超导状态需要极低的温度(<-100 ℃),因而运行维护成本较高。尽管如此,随着高温超导技术的进步,超导电磁储能仍将是相当具有潜力的功率型储能设备。目前,美国海军正在研究分析将超导电磁储能应用于电磁轨道炮、潜艇高能武器等中的可行性^[36-37]。

1.2.7 飞轮储能

飞轮储能主要是利用大质量物质的高速旋转来储存能量(6 000~60 000 r/min)^[22]。当需要储存能量时,电能会驱动电动机以使飞轮加速。当需要飞轮储能放电时,飞轮会反向驱动电动机发电以向外界提供电能,同时,旋转设备减速。相比其他储能设备,飞轮储能兼具能量密度和功率密度,其能量密度可达 100 (W·h)/kg,功率密度可达 1 500 W/kg。同时,其使用寿命也很长(>10 000 次)。飞轮储能主要的缺陷是自放电率高(100%/天),即飞轮不能长期储存能量,能量必须在短时间内使用^[38-41]。同时,飞轮储能因包含有大量的旋转设备,因此需要进行较为精细的运行维护。

1.2.8 燃料电池

虽然燃料电池从能量转换的角度来看更类似于电源,即直接将燃料的化学能转化为电能^[22],但本文仍将其纳入讨论范围,原因如下:1)燃料电池的运行特性与储能系统类似,均是直接输出电能而无传统的旋转设备,且状态估计、能量控制与管理等均与储能系统类似;2)将燃料电池与各类能量转换设备(Power to X, P2X)相配合来充当“广义储能系统”是目前的研究热点,即由 P2X 设备完成能量吸收,燃料电池完成能量释放的功能。针对这一组合的研究已有众多公开的文献^[42-43],其在交通电气化中有着广阔的应用前景。

由于不存在燃烧过程,燃料电池相比传统内燃机具有更高的发电效率,是未来极具前景的电源技术。目前,基于质子交换膜技术的氢能源燃料电池是一种相对成熟的技术,并已在潜艇供能中得到应用^[44]。在商业应用中,液化天然气(LNG)和船用柴油(maritime diesel oil, MDO)是目前主要的燃料类型,基于这 2 类燃料的熔融碳酸盐燃料电池(molten carbonate fuel cell, MCFC)和固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)具有较高的商业价值^[45-47]。在目前的绿色航运发展趋势

下,对含碳燃料的重度依赖已成为限制航运业减排的关键,各类零碳燃料技术(如氢、氨)将具有广阔的应用前景。英国环境保护基金项目针对氢、氨燃料对航运减排的影响进行了系统研究^[48-49],并提出了以港口为供应链中心的可再生能源固化体系,即可再生能源经过 P2X 固化为氢或氨,在加注于船舶后再利用燃料电池进行利用。由于各类零碳燃料的燃烧条件复杂,导致传统热机应用受限,从而驱动了燃料电池在船舶上的应用。

1.3 适合船舶应用的储能类型

船舶由于其自身的特点,具有和陆地应用不同的工作场景,主要区别在于:1)船舶的移动特性。因移动而导致的船舶摇摆、振动会给储能系统的运行带来不确定影响,也导致部分储能技术不适合应用于船舶,如液流电池就不适合运行在摇摆和振动的场景中。2)船舶的孤立特性。这一特性为船舶储能带来了包含多适应性的负荷需求,例如由于船舶缺乏如陆地电力系统中的主电网的支撑,储能系统在船舶航行中需要扮演多种类型的角色,其包括但不限于直接提供推进动力和辅助各类运行负荷,这就要求船舶储能系统同时兼具能量型的特点和功率型特点。3)船舶的运行环境。船舶在航行中处于高温、高湿和高盐度等环境中,且运行区间宽,与陆地储能系统良好的环境控制能力差异巨大,这就对船舶储能系统的可靠性提出了更高要求。

综上所述,在当前技术条件下,以锂电池为代表的蓄电池技术是承担船舶基础负荷的主要手段,其类型主要包括三元锂电池^[50]和磷酸铁锂电池^[51],该类锂电池具有较高的能量密度、较宽的温度运行区间(0~35 ℃)及相对可靠的安全管理方法^[52]。与此同时,在船舶运行过程中也存在多种类型的高功率负荷,如雷达、武器等,使得采用锂电池进行供能很难满足其功率需求,需要配合多种类型的高功率储能技术。在当前技术条件下,适宜在船舶上承担高功率负荷的储能设备主要有飞轮储能和超级电容储能,这两者在船舶中的应用前景已得到很多学者的关注^[18-20]。

同时需指出的是,各类型零碳燃料的提出及应用为船舶动力系统运行带来了许多困难,例如,氨燃料在传统热机中很难保持稳定燃烧。这也驱动了在未来的研究中燃料电池与多种类型能量转换设备(P2X)的配合,通过组建船舶的“广义储能系统”并为船舶提供能量供应,减小航运业对含碳燃料的重度依赖,即 P2X 设备完成能量吸收,燃料电池完成能量释放。

2 全电船舶的分类与特点

2.1 全电船舶的分类

根据承担任务的不同,船舶可分为若干种类型,如表 1 所示。

表 1 全电船舶的类型
Table 1 Classifications of all-electric ships

类型	主要代表
游客型船舶	渡轮、邮轮
商业型船舶	散货运输船、集装箱运输船、冷链供应集装箱运输船、液化天然气船、离岸工作平台、其他特种船舶
军用船舶	航空母舰、水面舰艇、潜艇、海警船

从船舶的“动力系统-负荷”类型角度来看,全电船舶可以分为 3 种主要类型: 1) 以蓄电池为主要动力源的全电船舶, 主要为各类短途及近岸的船舶, 包括渡轮、港口拖轮等, 这类船舶的电力容量小, 可以直接利用陆地电力系统进行充电, 而其全电池运行也会带来极高的环保效益。2) 以

电力为主要负荷类型的混合动力船舶, 其动力系统通常由热机和储能系统共同构建而成, 这类船舶(如集装箱运输船、散货运输船等)将成为未来商业船舶的主流。3) 包含多种能源负荷的混合动力船舶, 如冷链运输船和大型邮轮等, 其在运行中需提供足够的冷/热功率。军用船舶的构成比较复杂, 多属第 2 类混合动力船舶, 部分类型(如航空母舰)因需要供应数千人长时间生活, 故需提供多能源负荷, 因而属于第 3 类。下面将对这 3 类船舶的特性进行介绍。

2.2 电池驱动全电船舶

电池驱动的全电船舶通常为小型船舶(排水量< 2 000 t), 渡轮是其经典的代表。渡轮的典型电气结构如图 2 所示。该船常采用 690 V 的交流供电, 可载数百人至上千人, 往返距离数十公里。例如, 世界上首艘全电渡轮“安培”号已实现全电化设计运行, 该船装设有动力电池 2.6 MW·h, 每年可减少 1 百万升航用柴油的使用^[53]。这类船舶的特点是动力系统的能源来源为储能系统, 在靠泊时充电, 航行时使用存储的能量进行航行。

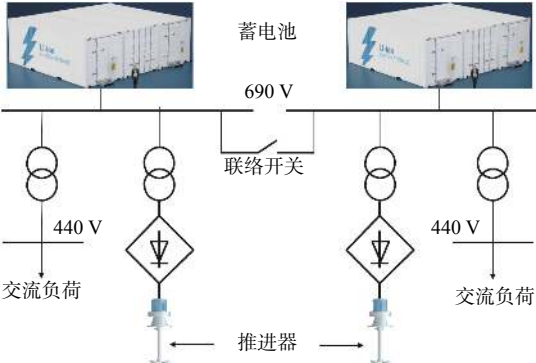


图 2 全电轮渡典型的电气结构图

Fig. 2 Typical electrical structure diagram of all-electric ferry

2.3 单一负荷混合动力船舶

该类型的船舶包括目前大部分的商业运行船, 如各类集装箱船、散货船、工程船等。作为其中的代表, 工程船的典型电气结构图如图 3 所示。工程船通常用于远洋作业, 包括挖泥船、疏浚船、光缆铺设船等, 这类船舶需要良好的操纵性能, 因而需要大容量的推进设备, 特别是需要方向推进器, 以满足船舶的转向、掉头等操作。

该类型船舶的主要特点是混合动力及单一电力负荷, 即动力系统由船舶主机和储能系统共同构成, 而船舶的主要负荷类型是电力负荷。这类船舶可以视为一种“移动电力微电网”, 即船舶动力系统通过发出电力来满足船舶的各类电力负荷,

其能量管理问题可类比于陆地电力系统中的电力微电网能量管理。

2.4 多能源混合动力船舶

该类型船舶与 2.3 节所述的单一负荷混合动力船舶的主要区别是, 多能源混合动力船舶的负荷类型融合了多种能量形式, 如冷链运输船需要提供冷负荷以保存货物, 而大型邮轮则需要提供中央空调及热水等服务, 其典型的电气结构图如图 4 所示。

邮轮是一种大型的旅游船舶, 可载数千人甚至是上万人持续航行数周, 通常采用 11 kV 的交流供电, 装设有 4 台或 6 台发电机。船上拥有各类餐厅、游乐场、电影院、赌场等, 主要采用 440 V

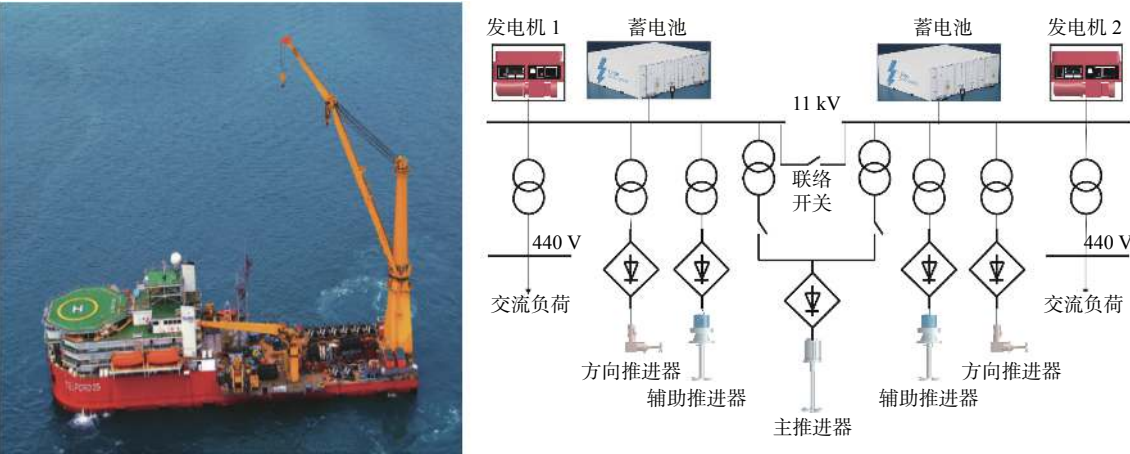
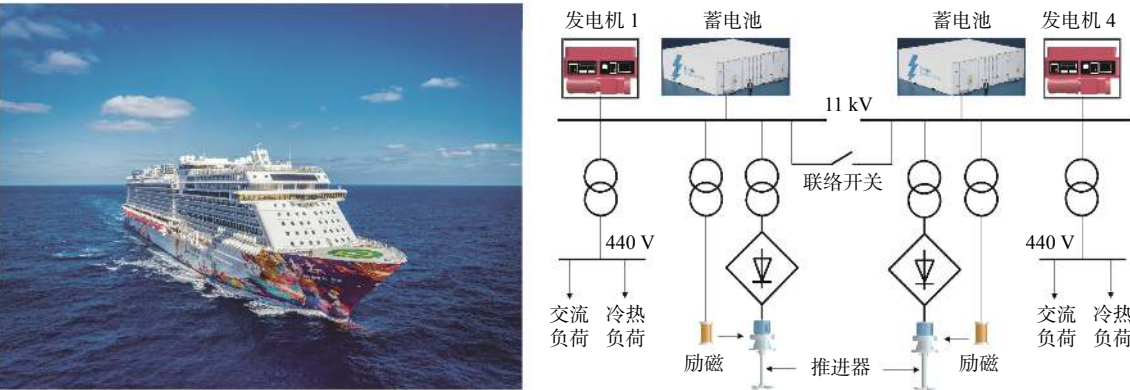
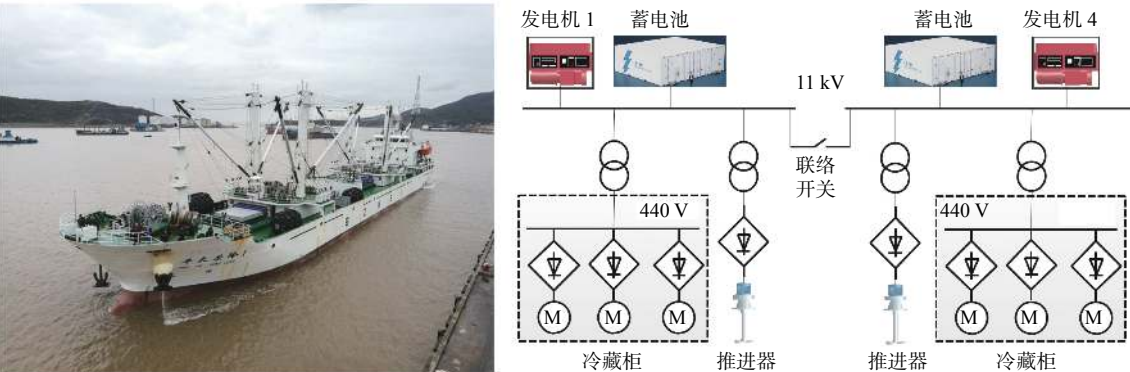


图 3 工程船舶的典型电气结构图

Fig. 3 Typical electrical structure diagram of working ship



(a) 邮轮及其单线图



(b) 冷链运输船及其单线图

图 4 邮轮及冷链运输船的典型电气结构图

Fig. 4 Typical electrical structure diagram of cruise and cold-chain supply ship

的低压供电。由于其体量巨大, 单个推进器的功率可达 20 MW, 如皇家加勒比公司旗下的“海洋魅丽”号邮轮的总推进功率达 97 MW^[54]。冷链运输船通常运输冷藏集装箱货柜, 用以保存各类生鲜, 这类运输船在航行过程中需要提供大量的制冷负荷^[10]。多类型的能量服务将带来各种类型的能量转化问题, 如电转热及热转电等, 融合船舶自身的电力调度将形成较复杂的多能源管理问题, 这是船舶能量管理中的难点。该类型的问题类比于陆地电力系统中的多能源微电网管理。

3 全电船舶储能应用研究综述

3.1 储能应用场景分类

储能系统在船舶应用方面的需求来自 2 个方面: 第 1 个方面是对储能设备的能量需求, 如减小船舶负荷巨大的峰谷差以保障船舶的经济运行 (主要由航速变化引起推进负荷变化引起)^[55], 同时, 储能系统也可作为船舶的不间断电源 (uninterruptible power source, UPS) 辅助船舶运行; 第

2 个方面是对各类船舶设备的功率需求,如平抑海浪随机性 etc 对推进器的影响,调整船舶的电压和频率。根据不同的需求类型,图 5 给出了部分船舶储能设备的应用场景,主要可分为短时间尺度和长时间尺度 2 类。

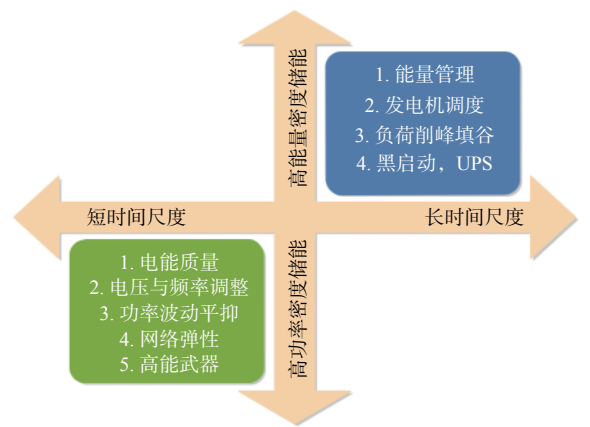


图 5 储能设备在全电船舶中的应用场景

Fig. 5 Operating scenarios of energy storage system in all-electric ships

如图 5 所示,在长时间尺度场景中(分钟到小时级),全电船舶需要高能量密度储能系统,主要是动力电池,以满足负荷的能量需求,如削峰填谷、辅助发电机调度^[15-17]、为冷藏负荷供能、驱动各类电机等;而在短时间尺度场景中(毫秒到秒级),全电船舶需要高功率密度储能系统,用以调整船舶电力系统的电能质量,平抑功率波动等^[18]。

3.2 功率型储能应用

与陆地微电网的运行环境相比,全电船舶微电网的不同之处在于: 1) 会受到各种不确定性因素的影响,如海浪、洋流、风向等,造成船舶负荷的波动; 2) 为节省设备空间,全电船舶中安装了大量的电力电子器件,在运行过程会产生大量谐波^[10]; 3) 存在大量产生高功率冲击负荷的设备,如锚机、武器系统、液压设备等。这些因素给全电船舶带来了高频的功率波动或高幅度的冲击负荷,带来了电能质量甚至是稳定性方面的问题。针对船舶电能质量问题,不同国家与地区的行业协会提出了相应的船舶电能质量标准,如表 2 所示^[56]。文献 [36-57] 针对由冲击负荷带来的船舶微电网稳定性问题已进行相关研究,下面将针对电能质量和稳定性问题进行综述。

3.2.1 电能质量问题

在传统方法中,为减小由推进功率的波动引起的船舶电能质量问题,采取让 2 台推进器以一定的角度运行,以将部分推进功率相互抵消从而减小推进功率的波动,这一方法称为偏移推进^[58]。

表 2 船舶电能质量标准
Table 2 Shipboard power quality standards

名称	总谐波畸变/%	单次谐波畸变/%
挪威船级社 (DNV)	8	5
英国劳氏船级社 (LRS)	8	1.5
美国电子和电气工程师协会 (IEEE)	5	3
国际电工委员会 (IEC)	5	3
美国船级社 (ABS)	5	3

近年来,随着船舶技术的不断进步,船舶负载组成日益复杂,单独调整推进功率的波动仍不足以解决船舶的电能质量问题,且偏移推进会带来额外的功率损耗,不利于提高船舶运行的经济性。

针对以上问题,众多研究者提出通过功率型储能设备的快速充放来实现对船舶各类状态变量的快速或者实时调整,以改善全电船舶的电能质量问题。Farhadi 等^[59] 对各类功率型储能设备的应用场景予以综述,指出了高能储能设备在调整电压、频率等问题中的应用价值,并强调了其在交通领域的作用。Samineni 等^[60] 采用飞轮储能改善了因船舶重要负荷而导致的电压暂降。Fan 等^[61] 采用飞轮储能改善了由船舶冲击负荷所带来的电压质量问题。Mo 等^[62] 通过控制多电平 DC-DC 变流器的阻抗特性,调整了全电船舶的电能质量。Scuiller^[63] 通过超级电容改善了船舶微电网的频率特性。Jin 等^[64] 提出了一种针对船舶微电网的多层次控制方法,仿真结果表明,该方法可方便各类储能设备的接入,能改善船舶微电网的电能质量问题。Faddel 等^[65] 提出了一种分布式控制方法,可有效接入各类储能设备,用以解决电能质量、功率控制等问题。

3.2.2 微电网稳定性问题

一般而言,基于旋转设备的发电机的爬坡能力最快只能达到 20~50 MW/min^[18, 36],而船舶的各类冲击负荷可能需要>50 MW/s 的功率需求,其中舰载高能武器系统甚至需要达到 100 MW/s。可见,单独依靠船舶发电设备难以满足各类冲击负荷需求,冲击负荷甚至还会影响到船舶微电网的稳定性。

Díaz-González 等^[40] 针对各类船舶微电网的稳定性问题予以了综述,指出储能系统是解决稳定性问题的一种重要方式。Alafnan 等^[36] 提出采用超导电磁储能来为高能武器系统供能,在满足船舶冲击负荷要求的前提下亦保障了船舶微电网的稳定性。Kulkarni 等^[66] 通过对比装设飞轮储能前、后船舶微电网的稳定性,分析了功率型储能

元件的重要作用。Khan 等^[67]提出了一种模糊控制方法并将其应用于船舶微电网中,用以提高其稳定性。针对多种船舶负荷波动问题,Hou 等^[18]提出采用混合储能的方法进行平抑,以保障船舶微电网的稳定性。

3.3 能量型储能应用

随着船舶电力化程度的提高,对储能设备的需求日渐增加,储能设备将成为重要的船舶动力来源^[15-17]。一般而言,作为船舶动力源的储能设备需要持续放电数小时及以上,因此,储能设备主要以能量型储能为主,如各类蓄电池。由目前的研究发现,能量型储能设备主要可以改善船舶微电网 2 个方面特性: 经济环保特性和运行灵活性。

3.3.1 经济环保特性

能量型储能设备通过充放电对船舶发电侧和负荷侧进行调整,可有效改善船舶的经济特性和环保特性。Kanellos^[15]首次提出了考虑蓄电池的全电船舶能量管理模型并进行了仿真分析,结果证明蓄电池对降低船舶运行费用很重要。Kanellos 等^[16]在此基础上分析得出蓄电池对降低船舶温室气体排放同样具有重要作用。Shang 等^[17]在多目标优化框架下,研究了蓄电池在运行费用和碳排放方面的变化规律。Fang 等^[68]提出了船舶混合储能系统能量管理方法,即在满足船舶负荷需求的情况下利用高功率储能设备延长蓄电池的寿命。Boveri 等^[69]对船舶最优储能容量进行了规划,提出作为动力源的储能设备应占船舶总负荷的 10%~12%。当前储能容量受制于多种因素,如初始投资成本、储能系统体积和船舶运行维护水平等,随着电池技术及运维方法的进步,储能容量在船舶容量中的占比有可能进一步提高,这又将增加船舶电池管理的难度。

3.3.2 运行灵活性

储能设备接入为船舶微电网带来的运行灵活性主要体现在可使各类设备方便接入。Lan 等^[70-71]利用蓄电池平抑因船舶光伏设备接入所带来的功率波动问题,有效提高了船舶的能量效率。Fang 等^[72]在考虑船舶甲板摇摆、运行位置变动的情况下,提出了一种基于数据驱动的、含光伏设备的船舶储能系统能量管理方法。Wen 等^[73-75]提出了一种针对光伏接入的蓄电池容量规划方法,确定了消纳船舶光伏功率的最佳储能容量。Fang 和 Xu 等^[76-77]研究了随机洋流和风速场景下蓄电池和船舶发电机的协调能量管理问题,发现在保证船舶能量效率的同时可确保船舶准点运行。针对船舶废气洗涤设备问题,Fang 等^[78]提出了一种

储能容量规划方法,可在保障气体洗涤系统运行功率的同时最小化船舶运行费用。

3.4 混合储能的应用

在实际运行过程中,由于船舶负荷的多样性,单独的功率型储能和能量型储能都难以满足所有负荷。而混合储能可以综合各类储能技术的优势,从而提供更具适应性的运行方案。目前,船舶混合储能的应用主要针对以下 3 个方面的内容。

3.4.1 经济性

结合本文第 2 节对储能技术的综述,在当前储能技术中,以蓄电池为代表的能量型储能设备的循环寿命一般远小于功率型储能设备,且其初始投资成本较高。因此,延长蓄电池寿命对储能设备的经济性影响较大。Fang 等^[68]提出了一种 2 层的船舶混合储能调度方法,第 1 层模型求解混合储能设备与发电机的出力,第 2 层将混合储能设备功率分配至功率型储能设备和能量型储能设备。仿真结果表明,所提方法能够有效延长能量型储能设备的使用寿命,从而提高船舶储能设备运行的经济性。

3.4.2 安全性

除经济性外,安全性也是储能系统运行需要考虑的重要因素,全电船舶作为一种孤立运行的微电网,对安全运行的需求相比陆地电网更加迫切^[40]。而不同的储能系统其运行安全性亦存在较大差异,例如,超级电容储能运行不包含化学过程,充放电过程放热不明显,具有较高的安全性。因此,采用超级电容与蓄电池相配合,不仅可以避免蓄电池过度充放电,还可提高蓄电池运行的安全性。此外,锂电池在受到撞击和处于高温等情况下时自燃现象频发,因此其热管理一直是工业界和学术界关心的重要课题^[79-81]。同样作为能量型储能,铅酸电池技术成熟度高,电池回收性好,具有非常优异的安全记录^[22]。因此,采用铅酸电池和锂电池相配合的混合储能,可以有效兼顾运行经济效益和安全性。

3.4.3 适应性

全电船舶在运行过程中可以视为一种特殊的“移动孤立微电网”。除靠泊状态外,在大多数运行场景中全电船舶都很难与主电网进行能量交换。这一特性要求储能系统作为一种能量/功率缓冲器,必须具有多适应性的运行特性,即在船舶运行中承担多种角色,而这必将促进混合储能系统在船舶微电网中的应用。Hou 等^[18]提出采用飞轮与蓄电池相配合的混合储能,这样不仅能平抑推进器的功率波动,还能对推进器功率进行较

长时间尺度的削峰填谷。

3.5 燃料电池的应用

如第 2 节所述, 燃料电池是一种直接将燃料化学能转化为电能的装置。该过程不包含燃烧过程, 热量损失小, 因此具有相比传统内燃气更高的能量效率, 是 21 世纪极具潜力的能源技术^[82]。同时, 燃料电池还具有噪声小、安全、易维护的优点, 在对安全性、可靠性要求极高的船舶应用中具有广阔的发展前景。

目前, 基于质子交换膜技术的氢燃料电池已应用于潜艇, 该类潜艇共安装有 9 台 30~50 kW 的燃料电池^[44]。由文献 [45] 可知, 氢燃料电池已首次被应用于客运船舶中。2009 年, 丹麦制造了世界上首台基于燃料电池的“维京少女”号近海支援船 (off-shore support vessel, OSV), 该船的燃料电池容量达 330 kW。截至目前, 世界部分采用燃料电池的船舶如表 3 所示。随着燃料电池技术的不断进步, 未来燃料电池在船舶领域的应用必然更多。

表 3 部分基于燃料电池船舶实例		
Table 3 Projects of some selected fuel cell based ships		
船名	功率/kW	燃料
Viking Lady ^[83]	330	液化天然气
SF-Breeze ^[84]	120	液氢
PA-X-ELL ^[85]	30	甲醇
MV Undine ^[86]	250	甲醇
US SFC ^[87]	2.5×10 ³	甲醇
MC-WAP(概念研究) ^[88]	500	柴油
MS Forester ^[89]	100	柴油
212 submarine U31 ^[90]	330	氢气
212 submarine U32 ^[90]	240	氢气
S-80 submarine ^[91]	300	乙醇

4 重点问题分析

如前文所述, 储能设备在船舶上的应用已展现出广阔的应用前景, 但目前船舶微电网相比陆地微电网仍存在若干问题制约着储能设备的应用。

4.1 储能设备分布式控制

不同于陆地微电网通常能对储能设备进行集中运行管理, 船舶储能系统通常具有分布式和冗余规划的特点^[10, 92-93]。分布式的特性代表在船舶设计过程中各类型设备需要分成若干组, 然后装设

在不同的水密舱和电气分区中以降低运行风险^[92-93]。而冗余度则代表各类型船舶设备容量需要预留相比陆地电网更多的余量, 以保证极限运行状态下船舶的生存能力。以上特点使得船舶储能设备的集中控制在硬件和软件上均存在较多困难。因此, 基于分布式控制的船舶储能设备管理是提高未来船舶运行效益的重要手段, 特别是当不断成熟的 5G 技术使得海量数据的快速无线传输成为可能时, 亦为船舶储能设备的分布式控制提供了硬件基础。Gheisarnejad 等^[94]对含 5G 通信设备的船舶储能系统控制进行了研究分析, 表明了船舶储能分布式控制的有效性。Fang 等^[77]提出采用多电池调度来对分布式的船舶储能系统进行控制, 其分析结果证明了多电池调度对提高船舶运行经济性的作用。Faddel 等^[95, 95]利用分布式控制的方法对船舶微电网的频率和电压等进行了调整。在未来的研究中, 船舶储能的分布式管理还应更多地考虑船舶的运行特性, 如推进负荷受海浪、风速影响的波动, 以及各类船舶冲击负荷等。同时, 考虑混合储能不同响应时间尺度的分布式控制方法亦是值得尝试的研究方向。

4.2 多适应性储能设备的规划与运行

相比陆地微电网较为稳定的运行环境, 船舶微电网由于位置不断变化, 其运行环境也时常发生变化, 如由船舶摇摆引起船载光伏设备出力波动^[72], 由随机洋流和风速引起的船舶失速^[77]。这些特点使得船舶储能设备的规划与运行需要具有更多的适应性。在陆地电网的规划与运行中, 多场景规划与运行是一种提高规划/运行方案适应性的有效手段。同样, 船舶的运行状态也可以分为各类场景, 如靠泊、加/减速、全速航行、限速航行、动力定位等^[96]。若能在船舶储能设备的规划与运行中考虑不同的场景, 必然可以提升船舶储能设计方案的适应性。适应性的另一个方面是囊括各类储能技术, 例如蓄电池+超级电容、蓄电池+飞轮等^[18, 32, 38, 68]。但截至目前, 尚无全面考虑各类储能特性的有关船舶混合储能设备规划与运行方法的研究, 这也是未来研究的重点方向。对于燃料电池的船舶应用, Abkenara 等^[97-98]对其能量管理问题进行了分析, 但未考虑与其他储能设备的配合问题, 在接下来的研究中, 这也是值得尝试的一个方向。

4.3 储能设备状态评估

储能设备状态评估是储能科学研究的核心问题, 主要包括功率状态 (SOP)、能量状态 (SOE)、

荷电状态 (SOC)、热状态 (SOT)、健康状态 (SOH) 及安全状态 (SOS), 状态评估的关系如图 6^[99] 所示。

在以上状态评估中, SOP, SOE 和 SOC 受运行环境影响较小^[100], SOT, SOH 和 SOS 则与运行环境强相关^[99]。其中前者可通过船舶实际测试数据对模型参数进行调整, 从而直接移植陆地应用的方法, 这里不再赘述; 而后者则需考虑船舶的实际运行情况, 并通过实验测试明确运行环境对储能的影响, 最终建立可靠的船舶储能状态评估体系。相比陆地应用, 船舶的移动特性、孤立特性和运行环境变化特性均需要考虑, 特别是船舶长期运行于高温、高盐和高湿环境, 明确这些因素对储能系统状态评估的影响是储能状态评估的研究基础。

目前, 有关储能系统状态评估的研究主要集

中在陆地领域, 尚无专门针对船舶的专题研究。Ma 等^[101]提出了一种半电池模型, 用以研究储能设备的老化机理。Zhang 等^[102]提出 Box-Cox 变换法, 建立了储能寿命的线性模型。Hu 等^[103]利用信息熵方法评估了储能设备的寿命。近年来, 随着大数据技术的进步, 基于数据驱动的储能设备寿命预测成为该领域的研究重点之一^[104-107]。但上述研究均是针对陆地储能的应用, 虽然对船舶应用有一定的借鉴意义, 但在船舶微电网中, 负荷的剧烈变动和不稳定的运行环境会给储能的健康运行带来更大的挑战。振动、高湿度和高盐度等运行环境均有可能增加储能设备的运行损耗^[106]。因此, 海洋运行环境下储能设备的健康状态评估研究是未来的重点方向。

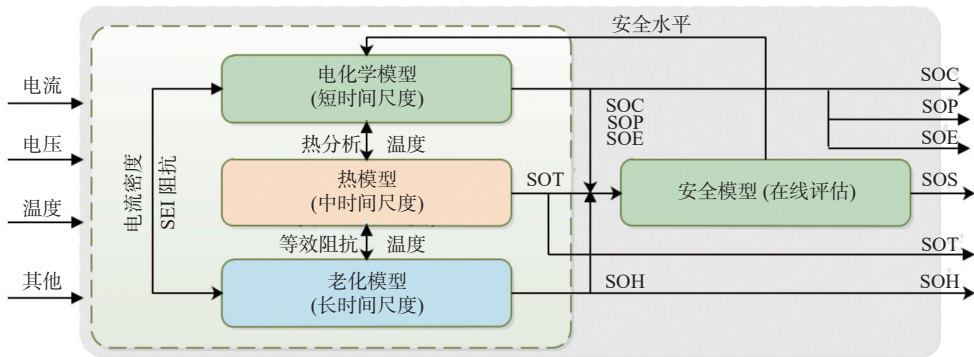


图 6 储能状态评估^[99]
Fig. 6 State estimation of energy storage^[99]

5 结 论

本文针对储能系统的船舶应用问题, 对当前各类储能技术、主要船舶电气结构、储能设备在船舶中的应用场景, 以及当前研究现状和未来的重点研究问题进行了综述, 主要得到如下结论:

- 1) 相比陆地应用, 船舶具有移动特性、孤立特性及运行环境多变的特点, 在此背景下, 当前储能技术中以锂电池为代表的蓄电池技术是承担船舶基础负荷的合适方法。
- 2) 为应对船舶多种类型的功率负荷需求, 在当前技术条件下, 飞轮储能、超级电容与锂电池的混合储能方案是船舶储能系统配置的理想方式。
- 3) 功率型储能设备, 如超级电容、飞轮储能等在船舶中的主要应用场景是各类短时间尺度及高功率运行场景, 例如, 各类电能质量问题 and 电网稳定性问题。
- 4) 能量型储能设备, 如各类蓄电池和燃料电池, 在船舶中的主要应用场景包括长时间尺度的能量管理问题, 例如, 船舶经济/环境调度、运行

灵活性。

5) 基于船舶储能设备特点、储能设备的分布式控制、多适应性规划和健康状态评估是未来船舶储能设备运行与控制的主要研究方向, 在这些研究中, 需重点考虑船舶的移动特性、孤立特性和运行环境多变的特点, 研究高温、高盐度和高湿场景下的储能系统管理问题。

6) 燃料电池具有能源效率高、噪音小、易于控制、占地面积小的特点, 适于船舶应用。未来的研究方向需考虑与多种类型的能量转换设备 (P2X) 相配合, 形成“广义储能系统”, 固化可再生能源承担航运的能量需求, 从而减小航运对含碳燃料的重度依赖。

参考文献:

[1] United Nations Conference on Trade and Development. Review of maritime transport 2020[EB/OL]. <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2020>.
[2] United Nations Conference on Trade and Development. Review of maritime transport 2019[EB/OL]. <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2019>.

- [3] FANG S, WANG H. Optimization-based energy management for multi-energy maritime grids [M]. Singapore: Springer, 2021.
- [4] International Maritime Organization. Revised MARPOL Annex VI: regulations for the prevention of air pollution from ships[R]. London: Marine Environment Protection Committee, 2008.
- [5] International Maritime Organization. 2012 guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP)[R]. London: Marine Environment Protection Committee, 2012.
- [6] International Maritime Organization. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI)[R]. London: Marine Environment Protection Committee, 2009.
- [7] APSLEY J M, GONZALEZ-VILLASENOR A, BARNES M, et al. Propulsion drive models for full electric marine propulsion systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, 45(2): 676–684.
- [8] 汪致洵, 林湘宁, 刘畅, 等. 含换电船舶电能运输航路的远洋海岛群混合电能传输网络规划 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(12): 3420–3433.
WANG Z X, LIN X N, LIU C, et al. Hybrid power transmission network planning in pelagic islands based on power exchanging watercraft transport route[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(12): 3420–3433 (in Chinese).
- [9] 随权, 魏繁荣, 武涛涛, 等. 面向生态友好型远洋海岛群的储电概念船舶及其供能路径优化策略研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(1): 168–181.
SUI Q, WEI F R, WU C T, et al. Research on electric conceptual vessel and energy supply path optimization strategy for ecology-friendly pelagic clustering islands[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(1): 168–181 (in Chinese).
- [10] KUMAR D, ZARE F. A comprehensive review of maritime microgrids: system architectures, energy efficiency, power quality, and regulations[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 67249–67277.
- [11] JIN Z M, SULLIGOI G, CUZNER R, et al. Next-generation shipboard DC power system: introduction smart grid and DC microgrid technologies into maritime electrical networks[J]. *IEEE Electrification Magazine*, 2016, 4(2): 45–57.
- [12] NI K, HU Y H, LI X H. An overview of design, control, power management, system stability and reliability in electric ships[J]. *Power Electronics and Drives*, 2017, 2(37): 5–29.
- [13] GEERTSMA R D, NEGENBORN R R, VISSER K, et al. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: a review of developments[J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 30–54.
- [14] AL-FALAHI M D A, TARASIUK T, JAYASINGHE S G, et al. AC ship microgrids: control and power management optimization[J]. *Energies*, 2018, 11(6): 1458.
- [15] 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.
- [16] KANELLOS F D, TSEKOURAS G J, HATZIARGYRIOU N D. Optimal demand-side management and power generation scheduling in an all-electric ship[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, 5(4): 1166–1175.
- [17] SHANG C, SRINIVASAN D, REINDL T. Economic and environmental generation and voyage scheduling of all-electric ships[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(5): 4087–4096.
- [18] HOU J, SUN J, HOFMANN H F. Mitigating power fluctuations in electric ship propulsion with hybrid energy storage system: design and analysis[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 43(1): 93–107.
- [19] JAUROLA M, HEDIN A, TIKKANEN S, et al. Optimising design and power management in energy-efficient marine vessel power systems: a literature review[J]. *Proceedings of the Institute of Marine Engineering & Technology*, 2018, 18(2): 92–101.
- [20] HEIN K, XU Y, WILSON G, et al. Coordinated optimal voyage planning and energy management of all-electric ship with hybrid energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 2355–2365.
- [21] CHEN H S, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: a critical review[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(3): 291–312.
- [22] ARGYROU M C, CHRISTODOULIDES P, KALO-GIROU S A. Energy storage for electricity generation and related processes: technologies appraisal and grid scale applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2018, 94: 804–821.
- [23] CHATZIVASILEIADI A, AMPATZI E, KNIGHT I. Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings[J]. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2013, 25: 814–830.
- [24] IBRAHIM H, ILINCA A, PERRON J. Energy storage systems —characteristics and comparisons[J]. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2008, 12(5): 1221–1250.
- [25] VAZQUEZ S, LUKIC S M, GALVAN E, et al. Energy storage systems for transport and grid applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(12): 3881–3895.
- [26] DUFO-LÓPEZ R, LUJANO-ROJAS J M, BERNAL-AGUSTÍN J L. Comparison of different lead–acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems[J]. *Applied Energy*, 2014, 115: 242–253.
- [27] MOHOD S W, AWARE M V. Micro wind power generator with battery energy storage for critical load[J]. *IEEE Systems Journal*, 2012, 6(1): 118–125.
- [28] HADJIPASCHALIS I, POULIKKAS A, EFTHIMIOU V. Overview of current and future energy storage

- technologies for electric power applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2009, 13(6/7): 1513–1522.
- [29] International Electrotechnical Commission (IEC). Electrical energy storage whitepaper[EB/OL]. [https://www.iec.ch/basecamp?populate_search=Electrical%20energy%20storage&resource_type\[3\]=3](https://www.iec.ch/basecamp?populate_search=Electrical%20energy%20storage&resource_type[3]=3).
- [30] NAIR N K C, GARIMELLA N. Battery energy storage systems: assessment for small-scale renewable energy integration[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(11): 2124–2130.
- [31] HAN X B, LU L G, ZHENG Y J, et al. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle[J]. *eTransportation*, 2019, 1: 100005.
- [32] JU C Q, WANG P, GOEL L, et al. A two-layer energy management system for microgrids with hybrid energy storage considering degradation costs[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 6047–6057.
- [33] CAI X Y, LAI L F, SHEN Z X, et al. Graphene and graphene-based composites as Li-ion battery electrode materials and their application in full cells[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(30): 15423–15446.
- [34] LU L G, HAN X B, LI J Q, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 226: 272–288.
- [35] BOOM R, PETERSON H. Superconductive energy storage for power systems[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1972, 8(3): 701–703.
- [36] ALAFNAN H, ZHANG M, YUAN W J, et al. Stability improvement of DC power systems in an all-electric ship using hybrid SMES/Battery[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(3): 5700306.
- [37] BAIK S, KWON Y, PARK S, et al. Performance analysis of a superconducting motor for higher efficiency design[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, 23(3): 5202004–5202004.
- [38] PARK J D, KALEV C, HOFMANN H F. Control of high-speed solid-rotor synchronous reluctance motor/generator for flywheel-based uninterruptible power supplies[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(8): 3038–3046.
- [39] CHENG M, SAMI S S, WU J Z. Benefits of using virtual energy storage system for power system frequency response[J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 376–385.
- [40] DÍAZ-GONZÁLEZ F, SUMPER A, GOMIS-BELLMUNT O, et al. Energy management of flywheel-based energy storage device for wind power smoothing[J]. *Applied Energy*, 2013, 110: 207–219.
- [41] SPIRYAGIN M, WOLFS P, SZANTO F, et al. Application of flywheel energy storage for heavy haul locomotives[J]. *Applied Energy*, 2015, 157: 607–618.
- [42] KOTOWICZ J, WĘCEL D, JURCZYK M. Analysis of component operation in power-to-gas-to-power installations[J]. *Applied Energy*, 2018, 216: 45–59.
- [43] BUTTLER A, SPLIETHOFF H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2440–2454.
- [44] U212/U214 submarines[EB/OL]. [2018-08-27]. https://www.naval-technology.com/projects/type_212/.
- [45] Fuel cell ship Alsterwasser[EB/OL]. [2018-08-27]. <https://www.drewsmarine.com/en/references/passenger-ferries/fcs-alsterwasser>.
- [46] SYMINGTON W P, BELLE A, NGUYEN H D, et al. Emerging technologies in marine electric propulsion[J]. Part M: *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2016, 230(1): 187–198.
- [47] CARLTON S, ALDWINKLE J, ANDERSON J. Future ship powering options: exploring alternative methods of ship propulsion[M]. London: Royal Academy of Engineering, 2013.
- [48] ASH N, SCARBROUGH T. Sailing on solar: could green ammonia decarbonise international shipping[R]. London: Environmental Defense Fund, 2019.
- [49] ASH N, CARPENTER-LOMAX O. Zero-carbon for shipping: propelling investment in South and Central America with hydrogen-based shipping fuels [R]. Washington: Ocean Conservancy, 2020.
- [50] HE S G, WANG S F, CHEN H D, et al. A new dual-ion hybrid energy storage system with energy density comparable to that of ternary lithium ion batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(5): 2571–2580.
- [51] YANG X G, LIU T, WANG C Y. Thermally modulated lithium iron phosphate batteries for mass-market electric vehicles[J]. *Nature Energy*, 2021, 6(2): 176–185.
- [52] AN Z J, JIA L, DING Y, et al. A review on lithium-ion power battery thermal management technologies and thermal safety[J]. *Journal of Thermal Science*, 2017, 26(5): 391–412.
- [53] Norway electric ferry cuts emissions by 95%, costs by 80%[EB/OL]. [2019-09-09]. <https://reneweconomy.com.au/norway-electric-ferry-cuts-emissions-95-costs-80-65811/>.
- [54] HANSEN J F, WENDT F. History and state of the art in commercial electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 103(12): 2229–2242.
- [55] FERNÁNDEZ I A, GÓMEZ M R, GÓMEZ J R, et al. Review of propulsion systems on LNG carriers[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 1395–1411.
- [56] MUTARRAF M U, TERRICHE Y, NIAZI K A K, et al. Energy storage systems for shipboard microgrids—a review[J]. *Energies*, 2018, 11(12): 3492.
- [57] CUPELLI M, PONCI F, SULLIGOI G. Power flow

- control and network stability in an all-electric ship[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 103(12): 2355–2380.
- [58] VEKSLER A, JOHANSEN T A, SKJETNE R. Thrust allocation with power management functionality on dynamically positioned vessels[C]//*Proceedings of the 2012 American Control Conference (ACC)*. Montreal: IEEE, 2012: 1468–1475.
- [59] FARHADIM, MOHAMMED O. Energy storage technologies for high-power applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, 52(3): 1953–1961.
- [60] SAMINENI S, JOHNSON B K, HESS H L, et al. Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for voltage sag correction[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, 42(1): 42–52.
- [61] FAN B, WANG C, YANG Q M, et al. Performance guaranteed control of flywheel energy storage system for pulsed power load accommodation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(4): 3994–4004.
- [62] MO R, LI H. Hybrid energy storage system with active filter function for shipboard MVDC system applications based on isolated modular multilevel DC/DC converter[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(1): 79–87.
- [63] SCUILLER F. Study of a supercapacitor energy storage system designed to reduce frequency modulation on shipboard electric power system[C]//*IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal: IEEE, 2012: 4054–4059.
- [64] JIN Z M, MENG L X, GUERRERO J M. Hierarchical control design for a shipboard power system with DC distribution and energy storage aboard future more-electric ships[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(2): 703–714.
- [65] FADDEL S, SAAD A A, YOUSSEF T, et al. Decentralized control algorithm for the hybrid energy storage of shipboard power system[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, 8(1): 720–731.
- [66] KULKARNI S, SANTOSO S. Impact of pulse loads on electric ship power system: with and without flywheel energy storage systems[C]//*2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. Baltimore: IEEE, 2009: 568–573.
- [67] KHAN M M S, FARUQUE M O, NEWAZ A. Fuzzy logic based energy storage management system for MVDC power system of all electric ship[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(2): 798–809.
- [68] 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.
- [69] BOVERI A, SILVESTRO F, MOLINAS M, et al. Optimal sizing of energy storage systems for shipboard applications[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, 34(2): 801–811.
- [70] 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.
- [71] WEN S L, LAN H, HONG Y Y, et al. Allocation of ESS by interval optimization method considering impact of ship swinging on hybrid PV/diesel ship power system[J]. *Applied Energy*, 2016, 175: 158–167.
- [72] FANG S D, XU Y, WEN S L, et al. Data-driven robust coordination of generation and demand-side in photovoltaic integrated all-electric ship microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(3): 1783–1795.
- [73] WEN S L, LAN H, YU D C, et al. Optimal sizing of hybrid energy storage sub-systems in PV/diesel ship power system using frequency analysis[J]. *Energy*, 2017, 140: 198–208.
- [74] YAO C, CHEN M Y, HONG Y Y. Novel adaptive multi-clustering algorithm-based optimal ESS sizing in ship power system considering uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 307–316.
- [75] DOLATABADI A, MOHAMMADI-IVATLOO B. Stochastic risk-constrained optimal sizing for hybrid power system of merchant marine vessels[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(12): 5509–5517.
- [76] FANG S D, XU Y. Multi-objective robust energy management for all-electric shipboard microgrid under uncertain wind and wave[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 117: 105600.
- [77] FANG S D, XU Y, WANG H D, et al. Robust operation of shipboard microgrids with multiple-battery energy storage system under navigation uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 10531–10544.
- [78] FANG S D, XU Y, LI Z M, et al. Optimal sizing of shipboard carbon capture system for maritime greenhouse emission control[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(6): 5543–5553.
- [79] ZHU C, LU F, ZHANG H, et al. A real-time battery thermal management strategy for connected and automated hybrid electric vehicles (CAHEVs) based on iterative dynamic programming[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(9): 8077–8084.
- [80] ZHU C, LU F, ZHANG H, et al. Robust predictive battery thermal management strategy for connected and automated hybrid electric vehicles based on thermoelectric parameter uncertainty[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, 6(4): 1796–1805.
- [81] ZHANG J N, ZHANG L, SUN F C, et al. An overview on thermal safety issues of Lithium-ion batteries for electric vehicle application[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 23848–23863.
- [82] ELLIS M W, VON SPAKOVSKY M R, NELSON D J. Fuel cell systems: efficient, flexible energy conver-

- sion for the 21st century[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2001, 89(12): 1808–1818.
- [83] Viking Lady offshore supply vessel. [EB/OL]. [2018-08-27]. <https://www.ship-technology.com/projects/viking-lady/>.
- [84] PRATT J W, KLEBANOFF L E. Feasibility of the SF-BREEZE: a zero-emission, hydrogen fuel cell, high-speed passenger ferry [EB/OL].[2018-08-27]. <https://www.maritime.dot.gov/sites/marad.dot.gov/files/docs/innovation/meta/9841/sf-breeze-ferry-feasibility-study-report-sandia-national-laboratory-2.pdf>.
- [85] Pa-x-ell[EB/OL]. [2018-08-27]. <https://www.e4ships.de/english/maritime-shipping/pa-x-ell-2/>.
- [86] METHAPU prototypes methanol SOFC for ships[J]. *Fuel Cells Bulletin*, 2008, 2008(5): 4–5.
- [87] SFC fuel cells for US army, major order from German military[J]. *Fuel Cells Bulletin*, 2012, 2012(4): 6.
- [88] JAFARZADEH S, SCHJØLBERG I. Emission reduction in shipping using hydrogen and fuel cells[C]//*Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Trondheim: ASME, 2017: 25–30.
- [89] LEITES K, KRUMMRICH S, NEHTER P, et al. SchIBZ – application of solid oxide fuel cells for oceangoing ships[C]//*5th Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells*. Karlsruhe, Germany, 2013.
- [90] 212A class submarine[EB/OL]. [2018-08-27]. <http://www.seaforces.org/marint/German-Navy/Submarine/Type-212A-class.htm>.
- [91] SSK S-80 class submarine[EB/OL]. [2018-08-27]. <https://www.naval-technology.com/projects/ssk-s-80-classsubmarine>.
- [92] DUBEY A, SANTOSO S. Availability-based distribution circuit design for shipboard power system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(4): 1599–1608.
- [93] XU Q M, YANG B, HAN Q N, et al. Optimal power management for failure mode of MVDC microgrids in all-electric ships[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 1054–1067.
- [94] GHEISARNEJAD M, KHOOBAN M H, DRAGIČEVIĆ T. The future 5G network-based secondary load frequency control in shipboard microgrids[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(1): 836–844.
- [95] HE L, YONG L, SHUAI Z, et al. A flexible power control strategy for hybrid AC/DC zones of shipboard power system with distributed energy storages[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(12): 5496–5508.
- [96] ZHANG G Q, CAI Y Z, ZHANG W D. Robust neural control for dynamic positioning ships with the optimum-seeking guidance[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(7): 1500–1509.
- [97] ABKENARA T, NAZARI A, JAYASINGHE S D G, et al. Fuel cell power management using genetic expression programming in all-electric ships[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(2): 779–787.
- [98] GHENAI C, BETTAYEB M, BRDJANIN B, et al. Hybrid solar PV/PEM fuel cell/diesel generator power system for cruise ship: a case study in Stockholm, Sweden[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2019, 14: 100497.
- [99] MISYRIS G S, MARINOPOULOS A, DOUKAS D I, et al. On battery state estimation algorithms for electric ship applications[J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 151: 115–124.
- [100] HU X S, FENG F, LIU K L, et al. State estimation for advanced battery management: key challenges and future trends[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 114: 109334.
- [101] MA Z Y, WANG Z P, XIONG R, et al. A mechanism identification model based state-of-health diagnosis of Lithium-ion batteries for energy storage applications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 379–390.
- [102] ZHANG Y Z, XIONG R, HE H W, et al. Lithium-ion battery remaining useful life prediction with Box–Cox transformation and Monte Carlo simulation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(2): 1585–1597.
- [103] HU X S, JIANG J C, CAO D P, et al. Battery health prognosis for electric vehicles using sample entropy and sparse Bayesian predictive modeling[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2645–2656.
- [104] SAXENA S, HENDRICKS C, PECHT M. Cycle life testing and modeling of graphite/LiCoO₂ cells under different state of charge ranges[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 327: 394–400.
- [105] VORONOV S, FRISK E, KRYSSANDER M. Data-driven battery lifetime prediction and confidence estimation for heavy-duty trucks[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, 67(2): 623–639.
- [106] NUHIC A, TERZIMEHIC T, SOCZKA-GUTH T, et al. Health diagnosis and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries using data-driven methods[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 239: 680–688.
- [107] 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*, 2019, 69(1): 207–219.