

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211204

船舶综合能源管理系统研究综述

周荔丹^{1,2}, 许健¹, 姚钢^{1,2}, 赵敏³

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海交通大学电气工程系电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240; 3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 随着传统能源日益短缺, 船舶动力系统正向新能源化升级转型, 但新能源输出的不确定性也为系统的经济、安全运行带来挑战。基于此, 传统船舶能源管理已不再适用, 综合型能源管理系统亟需归纳梳理。针对以上情况, 从国内外新型智能船舶政策入手, 对比分析了各国船舶能源管理系统发展情况。对典型能源管理拓扑和船舶微网拓扑进行梳理, 并基于“互联网+智慧能源”的架构阐明船舶能源管理模式变革。总结分析了船舶综合能源管理的上层能源优化调度、底层协调控制策略以及与智能算法的应用结合。归纳了油-电混合动力推进、柴油机余热混合式推进、新能源电力混合动力推进3种典型船舶动力系统的应用架构。最后指出船舶的不确定性能源管控、多能源协同机制、数据驱动以及多层次EMS设计才是未来的发展趋势。

关键词: 综合能源管理系统; 分布式发电; 多目标优化; 智能算法; 配电网

Review of integrated energy management systems for a marine microgrid

ZHOU Lidan^{1,2}, XU Jian¹, YAO Gang^{1,2}, ZHAO Min³

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the increasing shortage of traditional energy, ship power systems are upgrading and transforming to new energy. However, the uncertainty of new energy output also brings challenges to the economic and safe operation of the system. Based on this, traditional ship energy management is no longer applicable, and a comprehensive energy management system needs to be established. Given this, starting from the new smart ship policies at home and abroad, the development of ship energy management systems in various countries is compared and analyzed. The typical energy management topology and ship micro-grid topology are analyzed, and a major change in the model of energy management is clarified based on the architecture of "Internet + smart energy". The upper-layer energy optimization scheduling, the bottom-layer coordinated control strategy and the application combination with intelligent algorithms of ship comprehensive energy management are analyzed. Oil-electric, diesel engine waste heat, and new energy electric hybrid propulsion schemes are summarized. Finally, it is pointed out that with uncertain energy management and control of ships, establishing a multi-energy coordination mechanism, and using data-driven and multi-level EMS design are the future development trends.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077135).

Key words: integrated energy management system; distributed generation; multi-objective optimization; intelligent algorithm; distribution network

0 引言

近年来, 风能、太阳能等清洁能源构成的分布

式发电模块应用到船舶上^[1], 组成船舶微电网。同时, 以电力推进系统为标志性技术特征的综合电力船舶, 具有快速机动能力、低噪声、低油耗、低维护费用以及高可靠性的优点, 已成为未来船舶的重要发展方向^[2]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077135)

区别于陆地的传统微网结构，船舶微网与陆地微电网相比，主要具有如下 3 个特点：一是船舶电站容量小，负载启动时可能会对系统造成巨大冲击^[3]；二是系统电力设备集中、输电线路短、

冗余线路多，导致微网结构更加复杂^[4]；三是船舶长期处于孤岛运行，工作环境恶劣，对系统稳定性提出了更高的要求^[5]。典型船舶微网拓扑结构如图 1 所示。

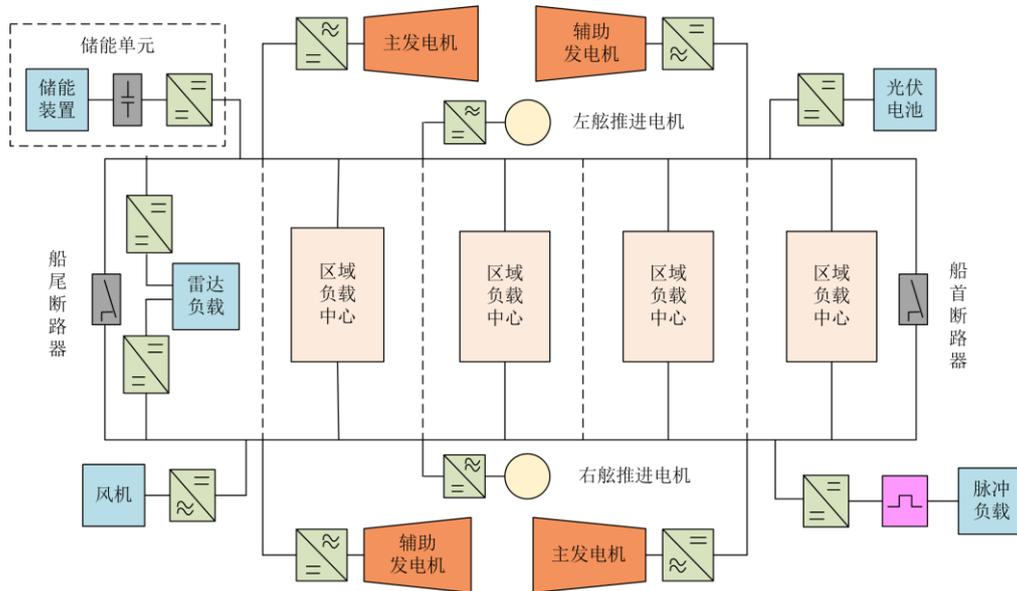


图 1 典型船舶微网拓扑结构

Fig. 1 Typical ship microgrid topology

与常规微网相比，船舶微电网更为脆弱，为此需要一个可靠、有效的智能控制策略，在能够完成发电优化调度、负荷管理、实时监测、保证系统安全稳定运行的基础上，对系统工作状态拥有高度的适应性，能够持续检测船舶运行状态并使系统的动态特性维持在理想的工作区间内，以此在协助系统运行时可从突发事件中恢复能源供应^[6]。

本文针对上述船舶微网特性，从船舶微电网在国内外的应用现状出发，对船舶能源管理系统 (Energy Management System, EMS) 的拓扑结构、优化控制、典型动力架构 3 个层面进行归纳与总结，最后对目前船舶能源管理系统亟待解决的问题和下一步的研究方向进行展望。

1 国内外政策形势分析与 EMS 应用现状

近年来船舶 EMS 主要的优化目标聚焦在节能低碳领域，即船舶能效管理。中国船级社于 2020 年发布了新版《智能船舶规范》，该规范体系主要包括自主操作、远程控制、智能航行、智能能效管理等方面^[7]。其中，智能能效管理可通过大数据、云计算、智能优化新技术为船舶航行提供实时评估与辅助决策，是《智能船舶规范》体系的重要组成部分^[8]。此外，《船舶智能能效管理检验指南》针对智

能效优化的一般要求、能效智能在线监控、航速优化、基于纵倾优化的最佳配载等几方面也做了相关要求^[9]，如图 2 所示。

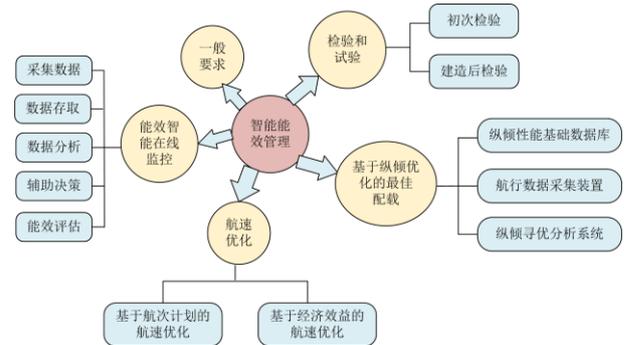


图 2 智能能效管理检验指南

Fig. 2 Inspection guide for intelligent energy efficiency management

除此之外，2018 年国际海事组织海洋环境保护委员会 (IMO MEPC) 指出要在 2050 年将航运业的二氧化碳总排放量减半。在内外双重压力影响下，国内外造船企业纷纷开始重视船舶能源管理问题^[10]。如何安全、稳定、经济、绿色地管理全船综合能源系统的能量流动，成为国内外研究的焦点。

欧洲方面，冰岛、芬兰、德国、英国都以优化船舶航线、航程作为首要目标^[11]。如德国劳氏船级

社通过船舶吃水及其他因素对油耗的影响, 对船舶能源进行实时监控。芬兰 NAPA 公司则研发了多种匹配船舶能源运营软件, 能够根据外界环境的数据信息, 规划最佳航线与最优航速。

亚洲方面, 日韩两国在船舶智能化上已取得一定进展^[12]。日本造船社利用精密的数据采集与远程数据传输, 对航行数据、航行计划进行优化分析。韩国的三星重工、现代重工、大宇造船三大造船企业都在智能能源管理的船舶上进行产品研发与升级。而在国内, 中国船级社与武汉理工大学、集美大学、中船重工 711 研究所等部门也开展了相应的研发工作, 旨在提供面向船舶航行能源的综合智能优化方案, 各类能源管理系统皆已具备远程监控、能源评估、航线优化等功能, 已经形成了较完备的产品, 目前已有多艘船舶安装使用^[13]。

当前国内外船舶能源管理已经取得了较好的成果, 大多都已具备能效评估、航速优化、故障诊断等功能, 同时已经在各种不同船型上得到了一定程度的应用, 但在应用领域, 国外机构产品化程度更高, 国内仍需加强智能监测与分析方面的软硬件技术攻关。同时结合人工智能与云计算等新技术, 使船舶能源管理向智能化、在线化、远程化方向发展。国内外 EMS 发展现状对比如表 1 所示。

表 1 国内外船舶 EMS 发展情况

Table 1 Development of ship energy management system at home and abroad

国家	代表单位	系统特色	应用情况
中国	中国船级社	各类能源管理系统皆已具备远程监控、能源评估、航线优化等功能	多船型可应用
日本	日本船级社	利用精密的数据采集与远程数据传输, 对航行数据、航行计划进行优化分析	部分运输船型已运用
韩国	三星重工 现代重工 大宇造船	智能能源监控 大数据 EMS 技术 LTE 网络	部分已批量生产
英国	Rolls Royce	利用数字化技术, 对机舱内部单元进行优化分析	可批量生产
挪威	Kongsberg	把独立的数据和通信基础设施统一起来, 实现数据安全可维护的解决方案	“海洋魅力”号邮轮
冰岛	Marorka	提出航线、航速、纵倾的优化方案	可量产
芬兰	NAPA	根据外界环境的数据信息, 规划最佳航线与最优航速	可量产

2 船舶 EMS 的拓扑结构分析

为提高船舶电力系统运行的稳定性, 需要发电

单元与负荷间进行频繁的能源流动与信息交互, 而拓扑结构设计是能源管理调度的基础, 合理的拓扑结构设计对简化系统控制复杂性、提高系统运行的可靠性起着关键作用。因此, 船舶 EMS 拓扑结构的优化设计已成为能源管理技术体系的重要一环。

2.1 典型 EMS 拓扑结构分析

目前, 国内外针对长期运行下的船舶微电网 EMS, 共有 4 种基本拓扑结构: 集中式、分散式、分布式、分层式^[14], 如图 3 所示。

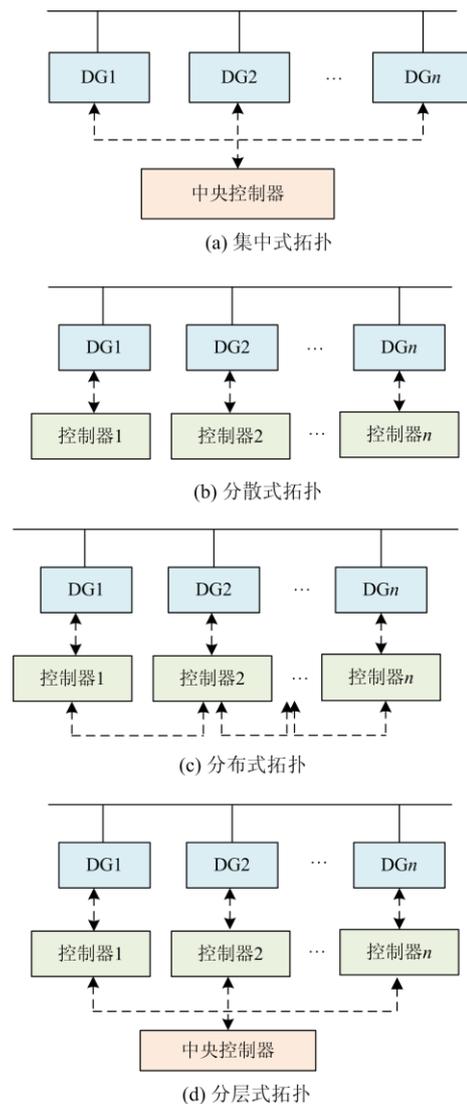


图 3 EMS 拓扑结构

Fig. 3 Topology of distributed EMS

2.1.1 集中式

集中式控制是通过中央控制器从微网各处采集信息, 处理后发出控制指令, 进行全船的集中控制和管理^[15], 这种控制方式结构简单, 操作便捷, 成本低廉。但可靠性差、对中央控制器依赖性强。同

时由于船舶向着大型化、新能源化、智能化发展，其大功率设备多，耦合性强，信息数据交互更加紧密多元，中央能源管理器在计算速度上无法满足船舶微网能源调度的实时要求^[16]。

2.1.2 分散式

分散式控制是将控制器分散在机舱各个部位，对局部系统进行控制^[17]。其特点是不需要控制器之间进行通信，分布式电源自行分配功率，因此系统响应速度快，可扩展性很高。但由于缺少各单元之间的通信，无法进行感知调节，难以进行系统层面的优化调节；而且易受系统参数的影响，控制效果较差^[18]。

2.1.3 分布式

分布式控制原则上依旧属于分散式控制，但是其使用控制器通过网络连接，每个单元之间局部互联，当某个单元处于不正常运行甚至发生故障时，可以通过向邻近的单元发出信号，由其他单元进行能源调节，使系统能够维持安全稳定运行^[19]。这种

方式在稳定性上优于集中式或无通信式分散拓扑结构，但由于缺少全局信息，分布式结构难以实现全局的优化目标，且这种结构控制复杂度更高。

2.1.4 分层式

上述拓扑的控制方式都有其局限之处，而分层控制采用集中管理、分散控制的原则，将集中式与分散式拓扑进行结合，对系统进行分层、分级式管理。通过采集数据，中央控制器实时调整运行计划，下达给子控制器进行就地管理。这类控制运行可靠性高，同时能实现全局控制，是未来船舶 EMS 的长期发展方向。但是相对来说，分层控制成本高，控制也较为复杂，并不适用于所有船型。

相对于陆地微电网，船舶微电网本身是一个有源电力系统，设备种类繁多。海上运行时，工况复杂，其动态过程的时间常数跨度非常大，每一时间级别都对 EMS 所实现的系统目标有不同要求^[20-22]。因此船舶分层控制多利用不同时间尺度对各级控制进行划分，典型结构及控制如图 4 所示。

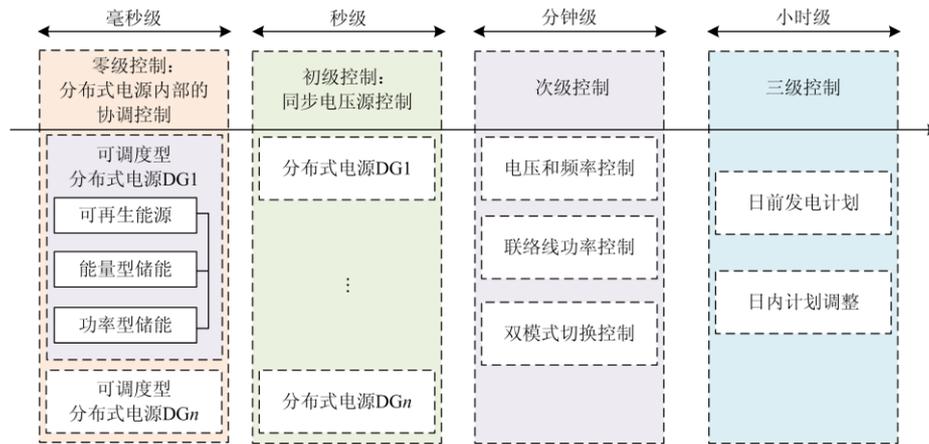


图 4 典型分层结构

Fig. 4 Typical hierarchical structure

通过以上分析，本文将 4 种拓扑结构的优缺点进行了总结，如表 2 所示。

2.2 微网拓扑结构的能源管理系统分析

微电网的基本特征能从其拓扑结构设计上凸显出来，可以说微电网的拓扑结构是搭建能源管理系统架构的重要前提，EMS 拓扑研究需致力于微网的拓扑结构设计。文献[23]提出了直流微电网、交流微电网及交直流混合微电网组网拓扑。文献[24]则介绍了目前广受关注和研究的直流电网的环型、辐射型、两端供电型等几种拓扑，如图 5 所示。这也是目前微网最常用的几种拓扑结构。

以上述 3 种拓扑为例，从应用场景来看，辐射型拓扑是常规的船舶配电方式，结构简单，技术成

表 2 船舶 EMS 4 种拓扑结构的优缺点

Table 2 Pros and cons for the four topologies of EMS

拓扑结构	优点分析	缺点分析
集中式	结构简单	稳定性较差
	控制复杂性较低	可扩展性受限
	经济性较好	计算量大
分散式	结构稳定性好	控制效果差
	可扩展性强	难以实现全局优化
	不易出现信息泄露	
分布式	稳定性高	难以实现全局优化
	可扩展性强	控制较为复杂
	信息通信能力较好	
分层式	稳定性好	控制复杂
	扩展性高	成本高
	全局优化	

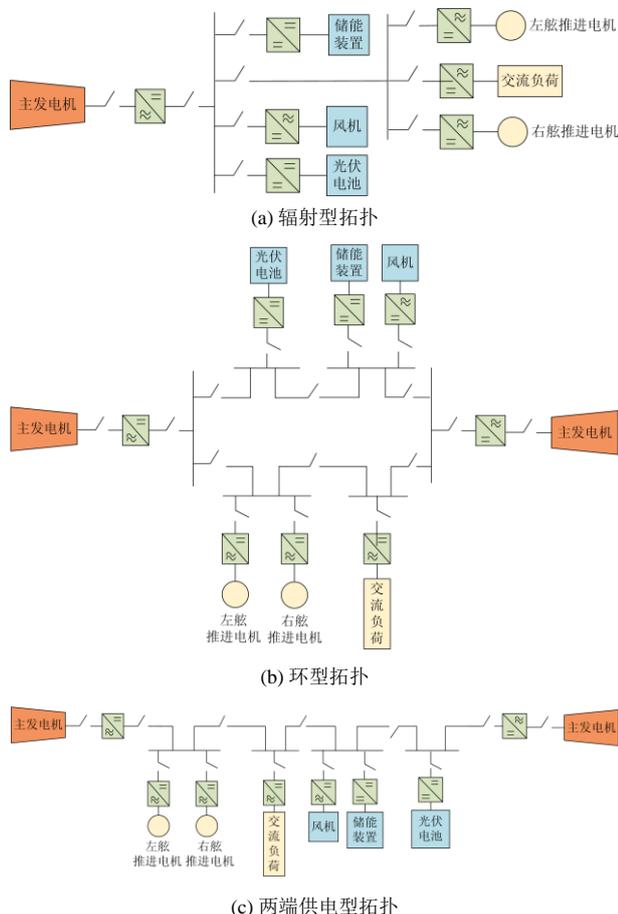


图5 典型船舶微电网拓扑结构

Fig. 5 Typical ship microgrid topology

熟, 应用广泛, 但其供电可靠性不高, 供电生命力不强, 多应用于小型舰船(大型驱逐舰也有应用), 建议考虑 EMS 集中式拓扑结构, 其通信和计算成本低, 而集中式拓扑有利于根据负荷变化和电网的联络要求, 统一对可调分布式电源进行规划调节、降低成本以及提高综合效益。而两端配电型及环形拓扑结构供电可靠性更强, 尤其是环网型拓扑, 仅应用于大、中型航空母舰的超大型电力系统, 在这种多个分布式发电机和负载组成的船舶微网中, 稳定运行和控制是一个重要问题。由于集中控制方法通常需要精确的参数设置, 当系统结构发生变化时, 需要重新计算, 因此最好采用分层级的控制方法来实现发电机和负载自由连接或断开。

另外, 文献[25]根据拓扑结构与单元位置选择对微网系统进行能源管理的经济性分析, 对比发现不同拓扑结构下的微电网系统所需的经济成本有所不同, 而在同一拓扑结构下, 分布式发电单元(Distributed Generation, DG)放置位置不同, 也会影响微电网系统的经济性分析。采用双电网并入式环

状结构的微电网成本最低, 辐射状拓扑结构的微电网成本最高。

2.3 基于“互联网+智慧能源”的架构分析

为落实国家“互联网+智慧能源”的产业政策, 特别是在第75届联合国大会期间, 我国提出的争取2060年前实现碳中和的奋斗目标, 在应对我国船舶目前绿色、经济、可持续发展的需求上, 需着眼于船舶微网中多种能源有机集成、高效转换等关键技术的集成创新, 形成一套以风电、光伏、储能等分布式能源为主的智慧型船舶综合能源管理系统。其中, EMS 是“互联网+智慧能源”系统的智能中枢, 采用大数据挖掘、服务化架构等云计算关键技术, 可为船舶建立统一的开发、运行和管理服务平台。文献[26]对“互联网+智慧能源”下 EMS 可实现的几个架构功能进行了说明, 包括信息融合、运行管理、决策支持、负荷侧分析及故障保护。

除此之外, 文献[27]概述能源互联网下数据中心的能源管理方法, 其将 EMS 分为本地设备级、数据服务级、能源网络级3个部分, 并对各个管理方法进行了详述。文献[28]通过云计算实现了微网负荷预测的优化运行。文献[29]针对小型船舶, 构建“互联网+AIS系统”, 利用通信设备实现 AIS 相应功能, 可有效减少船舶发生碰撞, 优化航线, 更为其他船型发展提供借鉴。

可见在能源互联网环境下, 数据中心将会拥有更多样化的供能选择, 将会发掘更灵活高效的能源管理方式, 其仅依靠电能的能源管理模式将发生根本性变革, 综合能源管理将是未来极其重要的发展方向。此时传统的 EMS 会面临哪些挑战? 船舶供应商应该如何把握互联网带来的机遇, 创新船舶 EMS 优化运行、减少能耗成本? 更多问题等待国内外学者进一步研究分析。

3 船舶 EMS 的优化与控制

能源管理策略的目标是保证船舶各类混合动力系统实现船舶的期望响应, 以此实现船舶能源流的最优分配, 维持系统稳定。不同的能源管理策略对燃油经济性、电源的动态性能及其服务期限有很大影响。

传统的 EMS 通常依赖经验调试, 如逻辑门限值控制、状态机控制等。我国第一艘新能源混合动力船“尚德国盛”号采用的就是逻辑门限值控制, 但其动态性能很差, 工作效率低, 无法满足现在大容量、多工况、不确定性的船舶要求。状态机控制则是将每种状态对应一种能源分配决策, 特点是简单有效, 但滞环控制会影响 EMS 对负载变化的响

应速度，与逻辑门限控制相同，其面对复杂环境，无法做出动态响应。

由此可看出，当航行过程中，需要解决的优化问题无法明确表达；或有多个目标优化，使目标函数或约束条件不连续、不可微、高度非线性，则这类传统优化方法会受到限制。

优化与控制是船舶 EMS 的核心内容^[30]。本节将从上层能源调度与底层就地控制两个层次展开分析。在能源调度上，以实施过程中是否引入被控对象动力学模型作为标准，分为基于模型控制和数据驱动控制两种^[31-32]，其优化目标一般为船舶的成本、航线优化、发电效率等。在就地控制上，本文主要考虑系统的电压-频率-负荷稳定、电源间功率的精确分配和环流抑制层面的协调控制。考虑到控制过程中常遇到非凸、组合优化、多目标优化等最优参数选取问题，本节整理了与智能算法相结合的优化控制方法，以保证控制结构的合理及收敛性。

3.1 基于模型的上层能源调度与优化

基于模型的控制是基于被控对象的行为，通过数学模型描述对系统进行动态控制，如图 6 所示。传统的能源管理与调度，往往以动力学或电路基本规律为基础，建立 EMS 物理模型，再通过参数优化计算得到运行数据，如电压、频率、相位等。该类常用的控制算法有最优控制 (Optimal Control, OC)、模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 和自适应控制 (Adaptive Control, APC) 等。

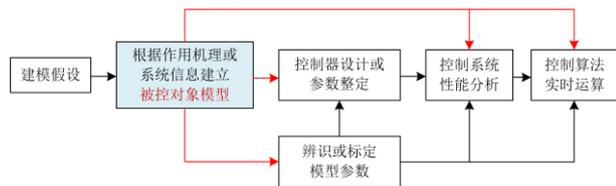


图 6 基于模型的控制流程

Fig. 6 Model based control flow

其中，当微网的数学模型较为精确，多采用最优控制。如文献[33]基于最优控制，通过主辅机油耗建立船舶综合经济性模型，确定最佳航速；文献[34]则通过 OC 直接优化了柴油机油耗；而文献[35]针对欠驱动船舶系统，通过 OC 提高了船舶航线规划的稳定性。

当面对不确定性问题，系统难以给出明确的动力学模型时，部分研究学者尝试采用自适应的控制方法，根据处理数据的数据特征自动调整参数与约束条件，使其与所处理数据的统计分布特征、结构特征相适应。文献[36]中提出了一种基于 APC 的负荷预测管理，该方法与单独使用负荷预测相比，能

够提供更高效的能源管理。文献[37]提出了基于不确定负荷下的自适应控制方法，该方法尤其在高频航行下自适应能力优越。然而 APC 对系统的这种模糊化处理会使控制精度降低，其动态稳定性分析同样较为困难。

模型预测是在船舶领域中最常用的控制预测的方法之一。该类控制其实是控制与优化两个领域的交叉，类比传统 PID (Proportional Integral Derivative) 控制，其善于处理多变量与约束，类比最优控制，MPC 考虑多个时间步，在对非线性系统有较好的适应性的同时，对模型精度要求不高。因此对于非线性复杂系统，文献[38-39]采用约束非线性模型预测控制算法最小化成本函数。而文献[40]结合了启发式算法和模型预测算法，其中启发式算法用于区分系统的状态转换，MPC 则用于实现每个状态的控制目标功能。文献[41]利用 MPC 成功完成船舶动力定位控制。

虽然 MPC 能有效地处理多变量、有约束的问题^[42]，但是其采用的是滚动优化策略，而非全局优化，因此其优化结果并不是最优解。表 3 针对上述 3 种算法进行了对比。

表 3 基于模型控制算法对比

Table 3 Comparison of model based control algorithms

算法	适用情形	特点	控制目标	缺陷
OC	精确模型	全局最优解	最优经济 ^[33] 最优航线 ^[35] 最优稳定 ^[35]	模型要求高 计算难度大
IPC	不确定模型	参数模型 自适应	动态跟踪 ^[36] 系统稳定 ^[37]	稳定性较低
MPC	模糊模型 多变量	多时间步 滚动优化	最优成本 ^[38-39] 多目标优化 ^[40] 定位控制 ^[41]	非全局优化

3.2 基于数据驱动的上层能源调度与优化

由于高比例可再生能源接入船舶微网，能源管理的不确定性分析、控制与优化更加复杂，建立模型的难度越来越高。随着大数据时代的到来，数据的获取、分析与处理技术迎来巨大发展，而船舶微网发展至今，海量的发电数据、先进的存储装置，为数据驱动提供了应用条件^[43-45]。

如图 7 所示，与基于模型的控制方法相比，数据驱动控制方法直接从系统可用数据出发，摆脱了对被控对象模型的依赖，由此提高了控制系统的鲁棒性，并能够有效地处理难以建模的被控对象的控制问题。这种方法在电力系统中常被用在元件参数或网络拓扑这种微观辨识上，而在宏观层面，也可通过对运行数据的学习，避开建立模型的步骤，直接表述系统的不确定性。常见的基于数据驱动的

控制算法有 PID 控制、无模型自适应控制(Model-Free Adaptive Control, MFAC)、机器学习(Machine Learning, ML)等。

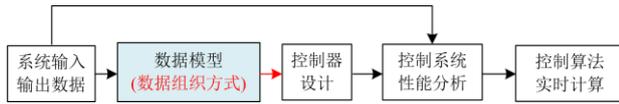


图 7 基于数据驱动的控制流程

Fig. 7 Control flow based on data driven

目前 PID 控制作为最早发展的控制策略之一, 应用最为广泛。但是其仅适用于非线性、非时变的对象, 动态性能很差; MFAC 使用当前在线数据进行优化控制, 可适用于时变、不确定性模型, 但面对时延较大的系统控制效果不佳。

在云计算、大数据等新理论、新技术的驱动下, ML 在能源管理领域发展迅速。以马尔科夫决策过程为基础的强化学习(Reinforcement Learning, RL)可以将最优潮流控制中的约束和目标转换成算法中的状态与奖励进行动态寻找, 又可以利用其良好的实时性与鲁棒性进行系统稳定控制^[46]。在负荷预测、故障诊断等能源管理领域, 深度学习(Deep Learning, DL)可通过多层的网络结构和非线性变换, 组合低层特征, 形成抽象的、易于区分的高层表示, 以发现数据的分布式特征, 进而对电力系统进行保护与监测^[47-49]。而当船舶微网遇到经济调度、无功优化等具有高维非线性规划问题时, 则可利用混合学习(Hybrid Learning, HL)通过对过去所学到的经验和结果, 应用到相似但不相同的目标领域中进行学习, 可有效提高新任务的学习效率和算法的收敛性^[50-51]。

近年来, 相关学者提出了更多的 ML 框架, 如 HL、对抗学习(Adversarial Learning, AL)、集成学习(Ensemble Learning, EL)等, 也对船舶 EMS 发展起到了一定的推动作用^[52]。

值得注意的是, 一些常见的数据驱动方法如回归法、最大似然估计法、矩阵分解法等, 也可直接求得目标函数最优参数, 以达到降低运行成本、提高系统稳定性的目的。尽管目前机器学习、深度神经网络这类数据驱动方法已经成功地应用到外部环境感知、推理决策、故障诊断及预测等不同环节中, 但其在动态控制中的应用、理论分析仍有待进一步发展。

3.3 底层协调控制

在船舶大型化以及新能源接入下, 船舶微网稳定性降低, 为了保证系统稳定工作, 底层单元快速就地补偿、协调运行, 控制电压-频率-负荷的稳定以及

电源间功率的精确分配和环流抑制显得极为重要。

一般按照控制策略划分, 电源就地控制可以分为恒功率控制(PQ 控制)、恒压恒频控制(V/f 控制)以及下垂控制 3 类。一般恒功率控制用于靠岸并网, 此时陆地电网承担船舶微网电压、频率支撑; 恒压恒频控制则用于离岸模式, 此时会利用分布式电源提供电压、频率支撑, 保证负载发生变化时微网输出的有功、无功功率会随之变化; 下垂控制较常见的是根据母线电压、频率调整逆变器输出电压, 这类下垂控制以恒压恒频控制为基础, 使微网可切换至靠岸、离岸两种工作模式。

就地协调控制一般居于分层控制的零级-次级控制, 是上层能源优化调度的基础。基本的控制方式有两种: 主从控制、对等控制。主从控制需要中央控制器, 依赖通信, 可以较容易地实现较为复杂的控制算法, 但可靠性较低; 对等控制基于下垂控制, 没有中央节点, 任何发电单元退出都不影响系统控制, 不需要通信, 但是很多控制策略实现起来较为困难。

针对传统主从控制策略响应速度慢、抗负荷波动能力不足导致的三相不平衡等问题, 需结合相应算法进行优化。文献[53]结合模糊 PI 算法, 优化下垂参数, 提高了系统鲁棒性, 该方法可为船舶微网提供借鉴; 针对电压-电流波动问题, 文献[54]提出一种基于相角和电压跟踪的新型无缝切换方式, 可保证微网并网、孤岛运行切换时电压相角的连续平滑; 针对微网频率的协同控制, 文献[55]提出了基于频率变化率和基于参与因子的协调控制方法, 能够有效提高系统频率稳定。

传统对等控制无功分配精度较差, 为提高航行时功率流能精确分配, 可从下垂系数入手, 分析系统改进方法。部分学者通过引入积分环节^[56-57]或在下垂方程中引入无功功率扰动项^[58]来消除功率稳态误差, 但是有功会受影响。目前最常用的是“虚拟阻抗”法。在闭环控制中引入虚拟阻抗, 可有效改变系统阻感比, 由于其动态性能差, 文献[59-60]利用自适应虚拟阻抗法对参数进行实时调整; 还有部分学者采用低频电流注入法用于船舶直流微网, 进行线路阻抗的检测^[61]。

3.4 智能算法在能源管理上的应用研究

与地面微电网不同, 由于船舶 EMS 受动态负荷影响更加严重, 研究人员需将经济、环保、可靠性等多个目标作为主要目标函数, 这种复杂性与不确定性使得上述控制需结合参数智能优化算法, 提高 EMS 动态信息的处理以及系统的运算^[62]。

智能算法的相关理论不完善, 但是对航行数据

的不确定性具有很强的适应能力。如针对上述传统的PID对于非线性系统以及动态系统控制效果不佳的难题,可将PID参数选取与智能算法相结合,提高船舶EMS的效率和精确性。文献[63]提出了一种基于多目标遗传算法和多属性决策的PID参数设计方法,通过一个二阶船舶控制的数值算例,调整了PID的控制参数。文献[64]借鉴免疫系统的免疫响应调节机制,对PID控制器进行改进,使该控制器能很好地根据船舶动态特性的变化,可自适应性免疫调节,其跟踪速度快,航向控制超调小、抗扰性强。

有关学者也将DL、RL与启发式智能算法相结合,形成了多种高级HL算法,用于优化和控制。如文献[65]使用深度自适应动态规划D-ADP算法,可对船舶微网进行一体化智能控制与优化,具有较强的鲁棒性。文献[28]使用计算机技术实现并行计算,通过ML改进算法优化核函数极限学习机,能够提高负荷预测精度,并且缩短执行时间。文献[66]提出了一种基于蚁群算法的模型参数寻优和基于改进核函数极限学习机的预测模型综合算法。该算法能够在得到较优模型参数和较少计算量的同时,提高预测精度。

针对不同智能优化算法特性差异,本节对几种较为常用的算法进行分析比较^[67]。

模糊算法(Fuzzy algorithm, FA)模拟人脑非精确判断时的处理能力,通过对输入模糊化处理并调用知识库以规则的形式输出^[68]。文献[69]针对潜艇的不同工况,设计了智能模糊积分环节和权限模糊决策系统。文献[70]针对传统PID控制,设计了一个船舶航向模糊控制器,可有效提高系统控制精度与鲁棒性。不过为了提高该算法的动态品质,需与其他算法相结合。

集群智能算法由于其简单、可扩展、收敛速度快、分布式等优点,也常用于船舶的优化调度中。主要有粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)和蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)两种。文献[71]提出了一种基于模糊的粒子群优化(FPSO)作为舰船电力系统的电力管理策略,能够协调正常的全电力推进、能源存储及岸上电力供应。该方法在运营成本和温室气体排放方面有较好的优化效率。文献[72]研究了基于ACO和AIS的航线规划方法,使航线里程缩短了接近3%。两种集群算法也可相互结合,实现多层次综合优化。文献[73]将PSO和ACO结合,利用PSO对ASO网络的空间布局进行优化,可有效提高网络资源的调度效率。

除此之外,遗传算法(Genetic Algorithm, GA)以

及模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)也是中压直流船用电力系统中常用的功率优化解决方案^[74],文献[75]采用GA确定柴电混合动力系统中柴油机的启动/停止临界值,在解空间中寻求成本函数的最优解。文献[76]引入SA对模糊变量的量化因子和比例因子进行优化,以寻找最优的航行路线。表4是上述几种智能算法的优缺点对比。

表4 几种常用智能优化算法比较

Table 4 Comparison of several commonly used bionic optimization algorithms

算法	优点分析	缺点分析
FA	鲁棒性强、有较高容错性	控制精度低、动态品质差
PSO	收敛速度快、计算量小、有记忆性、容易实现	搜索精度不够高;无法保证全局最优解
ACO	鲁棒性强、局部寻优能力强	计算量大、收敛速度慢、易陷入局部最优
GA	求解覆盖面广,全局寻优能力强	搜索时间较长,早熟收敛;初始种群的选择影响较大
SA	全局寻优能力强、计算简单实用	收敛速度慢,性能受初始参数影响大

总的来说,针对船舶航线的经济性、可靠性等多种优化目标,智能算法都可以达到可观的优化效率。面对单一算法的局限性,近年多数研究是从算法融合的角度出发,将收敛性算法与泛化性算法结合,提高系统寻找全局优化的能力或是加快收敛速度,抑或是将算法初始解通过其他算法生成以提高优化精度等。表5总结了针对船舶微电网提出能源管理优化策略的最新研究进展。

4 各类动力系统EMS应用架构分析

根据第1节所述,国内外政策形势使得新能源在船舶上的应用迫在眉睫。而化石燃料仍将在未来很长时间作为主要供给能源。本节将对传统油-电混合动力船舶、柴油机余热混合式推进、新能源电力混合动力推进等3个类型的EMS进行分析对比。

4.1 传统油-电混合动力船舶

传统油-电混合动力系统常见的有3种EMS基本运行模式,即轴带发电模式(Power Take Off, PTO)、轴带电动联合驱动模式(Power Take In, PTI)以及轴带电动单独驱动模式(Power Take Me Home, PTH),如图8所示。其中,PTO通过轴带发电机从主机轴获取能源,向储能系统输入能源,PTI通过轴带发电机由储能系统获取能源向主机轴输入能源,而当主机处于故障或失效的状态时,PTH将会发挥作用,通过储能系统向发电机输送电能,而轴带发电机代替主机带动轴系,推动船舶运行^[77]。

表 5 船舶 EMS 优化运行方法汇总表

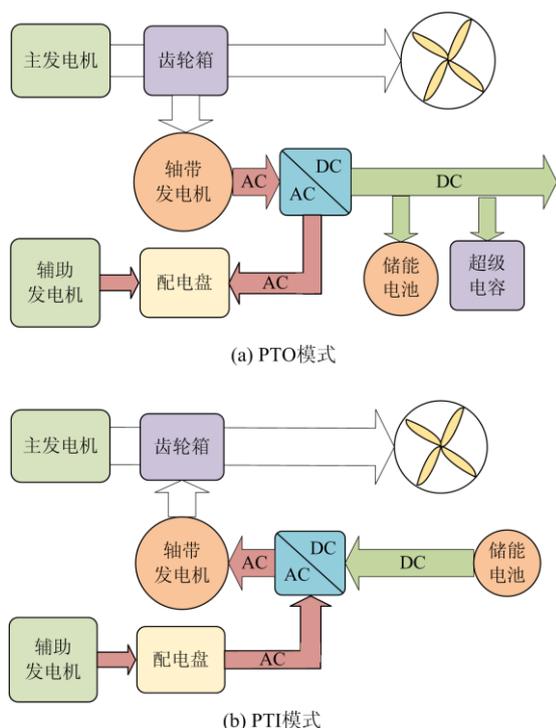
Table 5 Summary of optimization methods for EMS

文献序号	控制目标					控制框架	优化算法	成果转化情况
	GHG	TC	SI	RS	GE			
33	—	✓	—	—	—	OC	—	仿真
36	—	✓	✓	—	✓	IPC/MPC	—	仿真
38	—	—	✓	—	✓	MPC	IPA-SQP	半实物平台
63	—	—	✓	—	—	PID	GA	仿真
65	—	—	✓	—	✓	D-ADP	—	仿真
66	—	—	✓	—	—	HL	ACO	仿真
70	—	—	✓	—	—	PID	FA	仿真
71	✓	—	—	—	—	FC	PSO	仿真
72	—	—	—	✓	—	—	ACO	仿真
75	—	—	—	—	✓	—	GA	仿真
76	—	—	—	✓	—	FC	SA	仿真

注: GHG 为温室气体排放; TC 为总成本; SI 为系统稳定性; RS 为航线/航速; GE 为发电效率。

4.2 柴油机余热混合式推进式船舶

在船舶朝着大型化发展的今天, 船舶主机柴油机的额定功率高, 耗油量大, 排气温度高且排气量大, 为提高船舶一次能源的利用效率, 实现船舶节能环保以及有效地减少船舶燃油消耗量, 需对柴油机余热进行充分利用, 此时可将船舶看作是一个小型的分布式联供系统, 通过船舶余热发电技术实现船舶冷、热、电三联供, 构成柴油机余热混合式推进系统, 如图 9 所示。



(c) PTH模式

图 8 油-电运行方式示意图

Fig. 8 Schematic diagram of oil-power operation mode

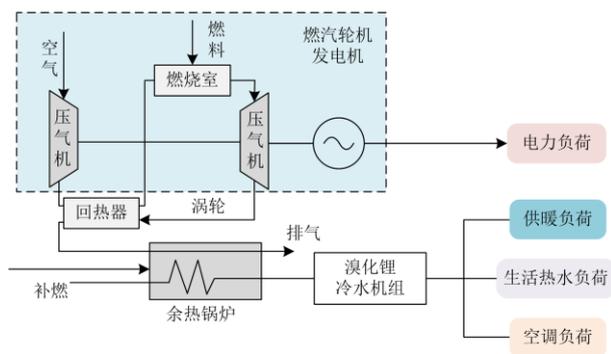


图 9 微型燃气轮机联供方案

Fig. 9 Cogeneration scheme of micro gas turbine

目前对于联供系统的研究主要集中在系统的设计优化和运行优化两方面, 即根据实际情况合理配置系统, 采用相应的控制策略使系统运行实现经济性。

文献[78]针对热电联产型微电网,采用模糊遗传算法进行多目标优化。文献[79]则针对联供系统中不同的分布式电源配置,使用机会约束规划理论的方法提高了系统经济性。文献[80]应用混合整数规划方法,在与传统遗传算法比较后发现其求解速度和精度都有一定优势。

另外,船舶的应急工况下以及船舶进、出港和停泊工况下,主机基本处于停止工作状态,主机余热很少,并且此类工况时间相对较短,系统较为复杂,是否需要设计并网运行模式下以电定热的运行策略,根据工况进行模式切换,如何切换,有待研究。

4.3 新能源电力混合动力推进式船舶

以风能、太阳能等为典型代表的新能源在节能减排方面具有的独特优势和所能产生的显著效益,其在船舶交通运输行业的应用和推广已呈汹涌之势。目前,新能源混合动力船舶多以柴油-太阳能-储能或柴油-风能-储能为主。该类系统仍以柴油发电机作为主电源,太阳能、风能根据负荷要求,通过 EMS 统一管理。为了对能源进行高效、经济、可靠运行,国内外学者提出了不同的能源管理优化策略。文献[81]基于混合动力船舶的能源管理系统提出了间隔变量方法,以确定该混合船舶电力系统中储能系统的最佳分配,以降低储能成本,减少 CO₂ 的排放。文献[82]提出了一种基于太阳能/柴油混合动力船舶能源管理系统,将多目标粒子群算法与非支配排序遗传算法结合起来,优化了投资成本、燃料成本和二氧化碳排放量。文献[83]则基于柴油-风能系统,提出了运用变速定桨距控制作为风力发电机的功率捕获方法。该船舶能源管理系统采用调节风力发电机的转速来智能地获取最优化的功率。

5 未来展望与设想

5.1 海上恶劣环境下的不确定性能源管控

随着船舶电网规模的扩大、新能源的接入,电网的安全稳定性与脆弱性问题越来越严重,而海上恶劣的极端环境对电网安全稳定工作提出了更大的挑战^[84]。此时考虑不确定性因素的 EMS 应得到重视。能源调度层面,在大数据和大能源思维下,为准确分析海上不确定性环境下综合能源系统的运行规律,可基于数据分析建立较为准确的不确定性因素模型,进而研究综合能源系统的不确定性管理方法,如鲁棒优化、自适应优化等。而在单元级就地控制层,需解决由电力电子器件本身的非线性特性

导致的系统不稳定、谐波以及其他的系统级问题^[85]。这类研究尚处于起步阶段,亟需进行开展与推广。

5.2 多能源协同运行机制

根据 2.3 节所述,在“互联网+”的大背景下,船舶 EMS 将会拥有更多样化的供能选择,然而目前,现有文献对于电价、碳排放等指数受到多种能源互相影响的情况,一般都假设无影响或者线性变化;而目前以多能源联供系统为研究对象的文献,多是在并网运行状态下对微网经济运行、模型建模、新能源出力不确定性处理等方面做了大量工作,但船舶长期处于孤岛模式,因此如何改进调度策略并建立模型优化孤岛运行时多电源及交互功率的出力,需要进一步研究。另外,在能源互联的背景下,由于多能源的广泛互动,多能源间的耦合关系也需要进行考虑。

5.3 数据驱动型的优化前景

根据 3.2 节所述,基于动力学的数学建模研究多数从内在物理机理出发,推导显式解析表达式。然而未来船舶综合能源系统会呈现复杂的多层级结构,难以建立精确、完整的数学模型。数据驱动型 EMS 则可通过非解析型模型来建立能耗模型,尤其是不确定性变量的特性,可从历史数据中得到,不再使用某种固定的概率密度函数类型,在此基础上进行能源管理会是一种全新思路,当然,数据驱动型 EMS 仍不能够替代系统参数与拓扑信息在计算中的作用,需要结合模型算法对系统进行整体能源管理设计。

5.4 多时间尺度的 EMS 前景分析

船舶 EMS 的设计要能“实时”、“跟踪”、“递归”地反映不同事件之间的变化。因此,时间维度为能源管理设计的重中之重。这里以动力源为永磁同步电机(PMSG)和储能电池的微网系统为例,对构建多时间尺度的 EMS 进行展望。如图 10 所示。

1) 超短时-速度和短时控制-精度的目标应在电力电子器件设备故障和外部扰动引起系统振荡时,采取有效的控制策略,实现系统电能平衡,电压快速精确恢复。针对船舶在孤岛和并网运行模式下进行建模,采用最先进的时域仿真法与解析法相结合的方式,分析船舶综合电力系统稳定性并研究其稳定域,实现系统安全稳定运行。

2) 长期控制则以最小化系统网损、运行费用,绿色环保、可靠运行等为目标,为系统提供需求侧管理,配置适当的备用容量,满足系统的供电可靠性要求。

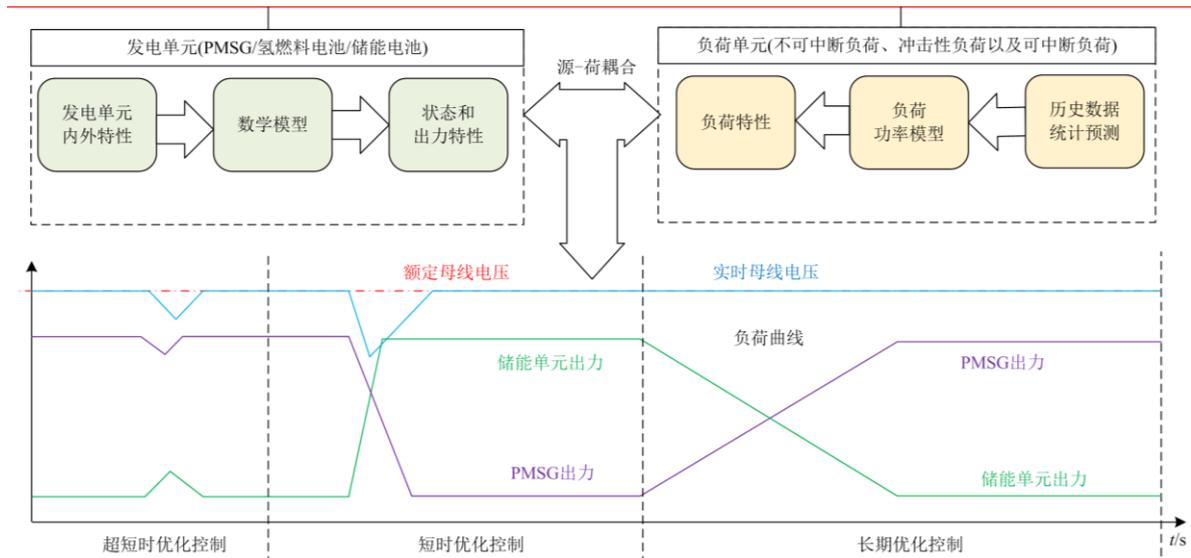


图 10 EMS 总体运行策略

Fig. 10 Overall operation strategy of EMS

5.5 基于多层次运行控制体系的 EMS 设计分析

根据船舶电力系统的内涵特点以及运行中的多时间尺度需求分析, 研究人员应加大对不同层级运行控制体系 EMS 的技术攻关, 对就地自治层、全局优化层、目标决策层等各层级进行深入研究分析。

为消除船舶实际运行中受到的扰动, 通过就地自治层进行实时校准, 对运行中系统受到的扰动大小进行量化, 制定短时间尺度下的功率和电压调整策略, 依据扰动临界切换指标进行主动切换控制。全局优化层研究长时间尺度下的多目标优化设计方法, 从运行控制的角度出发, 建立电压水平最佳、网损最小、能源消耗最低、电池充放电次数最少的多目标协调优化模型, 在不同场景下验证。目标决策层灵活确立在不同场景下的优化目标, 分析系统的核心需求。

6 结论

本文针对船舶综合能源管理系统的应用现状、拓扑结构、调度与控制优化策略、动力系统典型应用架构进行了分析, 研究发现:

- 1) 我国船舶智能能效系统发展迅速, 但仍需在智能化、产业化、远程化方向进行更深入的研究;
- 2) EMS 拓扑选择与船舶微网结构息息相关, 而在能源互联网时代, 需要综合考虑分布式能源接入后的系统结构、能源需求、碳排放等问题, 选择最合适的能源供应;
- 3) 面对海上航行所产生的大量不确定性模型, 基于模型与基于数据驱动相结合、系统控制与智能

算法相结合、收敛性算法与泛化性算法相结合等等, 都是未来的重要研究方向;

4) 不同动力系统拥有不同的能源协同难题, 后续研究应加强新能源接入、余热利用、能源耦合、纯电推进等技术攻关, 使能源管理与工程应用更加贴合。

最后本文对不确定能源管控, 多能源协同机制, 数据驱动优化前景, 多能源、多层次船舶 EMS 设计提出了未来设想与展望, 希望为船舶微电网在能源管理系统下的发展提供帮助。

参考文献

- [1] 杨荣峰, 于雁南, 俞万能, 等. 新能源船舶并网逆变器电网支撑协调控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2141-2154.
YANG Rongfeng, YU Yannan, YU Wanneng, et al. New energy ship grid-connected inverter grid support and cooperative control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2141-2154.
- [2] 顾思宇, 施伟锋, 兰莹, 等. 基于灰云证据推理规则的电力推进船舶电能质量在线评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 17-24.
GU Siyu, SHI Weifeng, LAN Ying, et al. Power quality online assessment of all-electric ship based on grey cloud evidential reasoning[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 17-24.
- [3] 孙强, 仇晨. 船舶直流微电网的分层控制[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(27): 10979-10988.
SUN Qiang, QIU Chen. Hierarchical control of direct

- current microgrid on ship[J]. Science, Technology and Engineering, 2020, 20(27): 10979-10988.
- [4] 马伟明. 舰船综合电力系统中的机电能源转换技术[J]. 电气工程学报, 2015, 10(4): 3-10.
MA Weiming. Electromechanical power conversion technologies in vessel integrated power system[J]. Electrical Manufacturing, 2015, 10(4): 3-10.
- [5] 李维波, 郝春昊, 高佳俊, 等. 舰船综合电力系统发展综述[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(6): 1-11.
LI Weibo, HAO Chunhao, GAO Jiajun, et al. Overview of the development of shipboard integrated power system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(6): 1-11.
- [6] CUPELLI M, PONCI F, SULLIGOI G et al. Power flow control and network stability in an all-electric ship[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(12): 2355-2380.
- [7] 熊胜. 智能船舶的发展现状及趋势[J]. 船舶物资与市场, 2020(10): 1-2.
XIONG Sheng. Current status and trends of intelligent ship development[J]. Marine Equipment Materials & Marketing, 2020(10): 1-2.
- [8] 封波. 智能船舶发展战略规划研究[J]. 船舶工程, 2020, 42(3): 1-8.
FENG Bo. Research on intelligent ship development strategic planning[J]. Ship Engineering, 2020, 42(3): 1-8.
- [9] 张继光, 高阳, 陶子健, 等. 智能船舶创新发展思考[J]. 船舶设计通讯, 2019, 48(2): 8-10.
ZHANG Jiguang, GAO Yang, TAO Zijian, et al. Thinking on innovation and development of smart ship[J]. Journal of Ship Design, 2019, 48(2): 8-10.
- [10] 王东, 于三强, 汪伟奎, 等. 多船型船舶管理效能提升探索[J]. 世界海运, 2019, 42(4): 42-45.
WANG Dong, YU Sanqiang, WANG Weikui, et al. Exploration of multi vessel ship management efficiency improvement[J]. World Shipping, 2019, 42(4): 42-45.
- [11] 王凯, 胡唯唯, 黄连忠, 等. 船舶智能能效优化关键技术研究现状与展望[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 181-192.
WANG Kai, HU Weiwei, HUANG Lianzhong, et al. Research progress and prospects of ship intelligent energy efficiency optimization key technologies[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 181-192.
- [12] 曹博, 谭松, 王庚. 日韩造船业智能化之路[J]. 船舶物资与市场, 2016(4): 9-12.
CAO Bo, TAN Song, WANG Geng. The intelligent way of shipbuilding industry in Japan and South Korea[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2016(4): 9-12.
- [13] 贺亚鹏, 严新平, 范爱龙, 等. 船舶智能能效管理技术发展现状及展望[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(3): 317-324.
HE Yapeng, YAN Xinping, FAN Ailong, et al. Development status and prospects of ship intelligent energy efficiency management technology[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(3): 317-324.
- [14] 韩旗, 黄一民, 张纪元, 等. 船舶能源管理系统技术[J]. 船舶工程, 2009, 31(增刊 1): 102-104.
HAN Qi, HUANG Yimin, ZHANG Jiyan, et al. Ship energy management system technology[J]. Ship Engineering, 2009, 31(S1): 102-104.
- [15] NGUYEN D D, NGUYEN D H, TA M C, et al. Sensorless feedforward current control of dual-active-bridge DC/DC converter for micro-grid applications[J]. IFAC Papers Online, 2018, 51(28): 102-104.
- [16] 宋波. 船舶能源管理系统设计研究[J]. 中国舰船研究, 2011, 6(2): 93-97.
SONG Bo. Design research on ship energy management system[J]. Research on Chinese Ships, 2011, 6(2): 93-97.
- [17] 刘兴华, 张潇月, 曹晖, 等. 多端直流输电系统分散式二次频率恢复及功率协调控制[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5): 1-8.
LIU Xinghua, ZHANG Xiaoyue, CAO Hui, et al. Decentralized secondary frequency restoration and power sharing control for MTDC transmission systems[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 1-8.
- [18] ZHENG Z, XU Y, WANG N, et al. Adaptive energy control strategy for a hybrid energy storage system in a DC micro-grid of an unmanned surface vehicle[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2019, 23(2): 287-292.
- [19] 薛帅, 高厚磊, 郭一飞, 等. 大规模海上风电场的双层分布式有功控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 1-9.
XUE Shuai, GAO Houlei, GUO Yifei, et al. Bi-level distributed active power control for a large-scale wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 1-9.
- [20] 叶林, 张慈杭, 汤涌, 等. 多时空尺度协调的风电集群有功分层预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3767-3780.
YE Lin, ZHANG Cihang, TANG Yong, et al. Active power stratification predictive control approach for wind power cluster with multiple temporal and spatial scales coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3767-3780.
- [21] 张志文, 李华强. 考虑灵活性的孤岛微电网群分层能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20):

- 97-105.
ZHANG Zhiwen, LI Huaqiang. A hierarchical energy management strategy for an island microgrid cluster considering flexibility[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 97-105.
- [22] 贾云璐. 全电力船舶能源管理智能决策系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
JIA Yunlu. Research on energy management and intelligent decision system for all-electrical ship[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [23] 郑跃胜, 钟小燕, 缪希仁, 等. 交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2756-2767.
ZHENG Yuesheng, ZHONG Xiaoyan, MIAO Xiren, et al. Overview on topologies and basic control strategies for hybrid AC/DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2756-2767.
- [24] 王森, 刘勇. 直流配电网及其在舰船区域配电的应用[J]. 船电技术, 2014, 34(11): 77-80.
WANG Sen, LIU Yong. DC power distribution network and its applications to zonal power distribution of warships[J]. Ship Power Technology, 2014, 34(11): 77-80.
- [25] 占晓友, 文水泉, 邵华. 基于拓扑结构与单元位置选择的微电网系统经济性分析[J]. 分布式能源, 2016, 1(3): 49-54.
ZHAN Xiaoyou, WEN Shuixiao, SHAO Hua. Economic analysis of microgrid system based on topology and cell location selection[J]. Distributed Energy, 2016, 1(3): 49-54.
- [26] 顾玉新, 茅大钧, 代宪亚, 等. 基于“互联网+智慧能源”的冷热电联供系统的架构分析[J]. 上海电机学院学报, 2017, 20(3): 181-186.
GU Xuxin, MAO Dajun, DAI Xianya, et al. Architecture of combined cooling heating and power system based on internet plus smart energy[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2017, 20(3): 181-186.
- [27] 冯成, 王毅, 陈启鑫, 等. 能源互联网下的数据中心能源管理综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 1-9.
FENG Cheng, WANG Yi, CHEN Qixin, et al. Review of energy management for data centers in energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 1-9.
- [28] 苏丹, 杨鲲鹏. 云计算和机器学习算法下的微电网负荷预测效果分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(1): 187-190.
SU Dan, YANG Kunpeng. Analysis of microgrid load forecasting based on cloud computing and machine learning algorithm[J]. Automation & Instrumentation, 2019(1): 187-190.
- [29] 董勇. 小型船舶“互联网+AIS系统”通信技术的研究[C] // 中国智能交通年会, 2018年11月7日-9日, 天津: 120-125.
DONG Yong. A study on communication technology of online AIS system for small vessels[C] // Annual Meeting of China ITS, November 7-9, 2018, Tianjin, China: 120-125.
- [30] 黄靖, 张晓锋, 陈雁, 等. 船舶综合电力系统多目标故障恢复模型及应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 130-137.
HUANG Jing, ZHANG Xiaofeng, CHEN Yan, et al. Multiobjective optimal model of service restoration for integrated ship power system and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 130-137.
- [31] 冯宜伟, 毋智军, 王鑫. 智能微网能源管理系统研究综述[J]. 智能电网, 2020, 10(6): 312-328.
FENG Yiwei, WU Zhijun, WANG Xin. A review of energy management systems research on smart micro networks[J]. Smart Grid, 2020, 10(6): 312-328.
- [32] 邵振国, 许昊铂, 肖颂勇, 等. 新能源电网中的谐波问题[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 178-187.
SHAO Zhenguo, XU Haobo, XIAO Songyong, et al. Harmonic problems in a new energy power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 178-187.
- [33] 王凯. 基于最优控制理论的内河船舶经济航速研究[C] // 中国人工智能学会, 2015, 8月8日-10日, 台湾, 中国: 184-191.
WANG Kai. Economic voyage study of inner river vessels based on optimal control theory[C] // Chinese Society of Artificial Intelligence, August 8-10, 2015, Taiwan, China: 184-191.
- [34] 兰熙, 沈爱弟, 高迪驹, 等. 混合动力船舶能源管理系统的最优控制[J]. 电源技术, 2016, 40(9): 1859-1862.
LAN Xi, SHEN Aidi, GAO Diju, et al. Optimal control of hybrid ship energy management system[J]. Power Technology, 2016, 40(9): 1859-1862.
- [35] 张琦, 姚其家, 贺敬良. 水面船舶航迹稳定性的最优控制研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(10): 374-378.
ZHANG Qi, YAO Qijia, HE Jingliang. Research on optimal control for trajectory stability of surface vessels[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 35(10): 374-378.
- [36] HOU J, SUN J, HOFMANN H. Adaptive model predictive control with propulsion load estimation and prediction for all-electric ship energy management[J]. Energy, 2018, 43: 877-889.
- [37] 张涛. 不确定负荷下船舶微网功率自适应控制方法[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(16): 68-70.

- ZHANG Tao. Adaptive power control method for ship microgrids under uncertain loads[J]. *Ship Science and Technology*, 2018, 40(16): 68-70.
- [38] PARK H, SUN J, PEKAREK S, et al. Real-time model predictive control for shipboard power management using the IPA-SQP approach[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(6): 2129-2143.
- [39] STONE P, OPILA D F, PARK H, et al. Shipboard power management using constrained nonlinear model predictive control[C] // *Proceedings of the 2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, July 7-16, 2015, Old Town Alexandria, VA, USA: 1-7.
- [40] VU T V, GONSOLIN D, DIAZ F, et al. Predictive control for energy management in ship power systems under high-power ramp rate loads[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(2): 788-797.
- [41] 王刚. 船舶动力定位系统模型预测控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- WANG Gang. Research on model predictive control of ship dynamic positioning system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [42] SEENUMANI G, SUN J, PENG H. Real-time power management of integrated power systems in all electric ships leveraging multi time scale property[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(1): 232-240.
- [43] 邓征欧. 基于数据驱动的船舶动力系统运行状态分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- DENG Zheng'ou. Analysis of operational state of ship power system based on data driven[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [44] 刘羽霄, 张宁, 康重庆. 数据驱动的电力网络分析与优化研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 157-167.
- LIU Yuxiao, ZHANG Ning, KANG Chongqing. A review of data driven power network analysis and optimization research[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 157-167.
- [45] 鲁卓欣, 徐潇源, 严正, 等. 不确定性环境下数据驱动的电力系统优化调度方法综述[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(21): 172-183.
- LU Zhuoxin, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Review of data driven optimization scheduling methods for power systems under uncertainty circumstances[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(21): 172-183.
- [46] 余涛, 周斌, 甄卫国. 强化学习理论在电力系统中的应用及展望[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(14): 122-128.
- YU Tao, ZHOU Bin, ZHEN Weiguo. Application and development of reinforcement learning theory in power systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(14): 122-128.
- [47] CHENG L, TAO Y. Dissolved gas analysis principle-based intelligent approaches to fault diagnosis and decision making for large oil-immersed power transformers: a survey[J]. *Energies*, 2018, 11(4).
- [48] ZHOU Z H, FENG J. Deep forest: towards an alternative to deep neural networks[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [49] 丁石川, 厉雪衣, 杭俊, 等. 深度学习理论及其在电机故障诊断中的研究现状与展望[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(8): 172-187.
- DING Shichuan, LI Xueyi, HANG Jun, et al. Deep learning theory and its application to fault diagnosis of an electric machine[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(8): 172-187.
- [50] ZHANG X, CHEN Y, YU T, et al. Equilibrium-inspired multiagent optimizer with extreme transfer learning for decentralized optimal carbon-energy combined-flow of large-scale power systems[J]. *Applied Energy*, 2017, 43: 157-176.
- [51] LI Guoyuan, KAWAN B, WANG Hao, et al. Neural-network-based modelling and analysis for time series prediction of ship motion[J]. *Ship Technology Research*, 2017, 64(1): 30-39.
- [52] 程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 机器学习在能源与电力系统领域的应用和展望[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(1): 15-31.
- CHENG Lefeng, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Application and prospect of machine learning in energy and power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(1): 15-31.
- [53] 崔屹, 周建萍, 王涛, 等. 基于模糊PI算法的微电网主从控制策略[J]. *广东电力*, 2017, 30(6): 36-39.
- CUI Yi, ZHOU Jianping, WANG Tao, et al. Master-slave control strategy for micro-grid based on fuzzy PI algorithm[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(6): 36-39.
- [54] 陈杰, 陈新, 冯志阳, 等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(19): 3089-3097.
- CHEN Jie, CHEN Xin, FENG Zhiyang, et al. A novel micro network system with grid/isolated operation modes seamlessly switched control strategy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(19): 3089-3097.
- [55] 柳伟. 孤立微电网分布式协同频率控制[D]. 南京: 东

- 南大学, 2015.
- LIU Wei. Isolated microgrid distributed cooperative frequency control[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [56] 陈燕东, 罗安, 龙际根, 等. 阻性逆变器并联环流分析及鲁棒下垂多环控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 18-29.
- CHEN Yandong, LUO An, LONG Jigen, et al. Circulating current analysis and robust droop multiple loop control method for parallel inverters using resistive output impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 18-29.
- [57] 王逸超, 罗安, 金国彬. 微网逆变器的改进鲁棒下垂多环控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 116-123.
- WANG Yichao, LUO An, JIN Guobin. Improved robust droop multiple loop control for parallel inverters in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 116-123.
- [58] HE J, LI Y W. An enhanced microgrid load demand sharing strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3984-3995.
- [59] MA H H, MICHAELSON D, JIANG J. Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1605-1617.
- [60] 郭倩, 林燎源, 武宏彦, 等. 考虑自适应虚拟阻抗的微电网分布式功率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 23-29.
- GUO Qian, LIN Liaoyuan, WU Hongyan, et al. Distributed power control strategy for microgrids considering adaptive virtual impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 23-29.
- [61] 张勤进, 张博, 刘彦呈, 等. 基于低频电流注入的船舶直流微电网线路阻抗检测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 134-140.
- ZHANG Qinjin, ZHANG Bo, LIU Yancheng, et al. A line impedance detection of a ship DC microgrid based on low frequency current injection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 134-140.
- [62] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等. 提高负荷功率均分和电能质量的微电网分层控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 106-114.
- BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. Hierarchical control of microgrid to improve power sharing and power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 106-114.
- [63] 张彦. 基于多目标遗传算法和多属性决策的船舶 PID 控制器参数整定[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(3): 42-45.
- ZHANG Yan. Multi-objective optimization and multi-attribute decision making for PID controller parameters tuning in ship design[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(3): 42-45.
- [64] 刘宏达, 李殿璞, 马忠丽. 一种新型船舶航向智能 PID 控制器优化设计[J]. 船舶工程, 2007, 29(4): 36-39.
- LIU Hongda, LI Dianpu, MA Zhongli. Optimization design of a novel ship heading intelligent PID controller[J]. Ship Engineering, 2007, 29(4): 36-39.
- [65] 殷林飞, 余涛, 张孝顺, 等. 基于深度自适应动态规划的孤岛主动配电网发电控制与优化一体化算法[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(2): 169-183.
- YIN Linfei, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Deep adaptive dynamic programming based integration algorithm for generation control and optimization of islanded active distribution network[J]. Control Theory and Applications, 2018, 35(2): 169-183.
- [66] 齐庭庭. 基于改进机器学习算法的微电网短期负荷预测[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2016, 28(3): 57-61.
- QI Tingting. Microgrid short-term load prediction based on improved machine learning algorithm[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology), 2016, 28(3): 57-61.
- [67] ZHAO Huang, BA Lingfang, JIN Deng. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 48-55.
- [68] 江玮, 刘鸣, 陈瑶琴, 等. 基于模糊 PI 和重复控制的逆变器复合控制研究[J]. 电子器件, 2020, 43(6): 1273-1277.
- JIANG Wei, LIU Ming, CHEN Yaoqin, et al. Composite control of inverter with fuzzy PI and repetitive control[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2020, 43(6): 1273-1277.
- [69] 甘浪雄, 邓巍, 周春辉, 等. 船舶航向模糊控制器优化设计及仿真[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(3): 398-403.
- GAN Langxiong, DENG Wei, ZHOU Chunhui, et al. Ship heading fuzzy controller optimization design and simulation[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(3): 398-403.
- [70] 黄斌, 吕帮俊, 彭利坤, 等. X 舵潜艇掉深挽回决策与控制方法[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(4): 108-115.
- HUANG Bin, LÜ Bangjun, PENG Likun, et al. X-rudder submarine falling deep recovery strategy and control method[J]. Research on Chinese Ships, 2021, 16(4):

- 108-115.
- [71] KANELLOS F D, ANVARI-MOGHADDAM A, GUERRERO J M. A cost-effective and emission-aware power management system for ships with integrated full electric propulsion[J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 41: 63-75.
- [72] 姚肖肖, 胡勤友, 杨春. 基于蚁群算法与海量 AIS 数据的船舶航线规划[J]. *交通信息与安全*, 2019, 37(3): 79-85.
- YAO Xiaoxiao, HU Qinyou, YANG Chun. Route planning of vessels with ant colony algorithm and massive AIS data[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2019, 37(3): 79-85.
- [73] 赵占坤, 郭春雷, 耿兴隆. 蚁群和粒子群优化融合算法在船舶网络资源调度中的应用[J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(20): 46-48.
- ZHAO Zhankun, GUO Chunlei, GENG Xinglong. Application of ant colony and particle swarm optimization fusion algorithm in the ship network resource scheduling[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(20): 46-48.
- [74] ERDINC O, VURAL B, UZUNOGLU M. A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(1): 369-380.
- [75] PANDAY A, BANSA H O. Energy management strategy for hybrid electric vehicles using genetic algorithm[J]. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 2016, 8(1): 1-13.
- [76] 张军, 彭海云. 模糊最优化算法在船舶控制中的应用研究[J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(2): 73-75.
- ZHANG Jun, PENG Haiyun. Application of fuzzy optimization algorithm in ship control[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(2): 73-75.
- [77] 柴经纬. 船用油电混合动力系统应用浅析[J]. *航海技术*, 2020(3): 59-61.
- CHAI Jingwei. A light on the application of oil and electricity hybrid power system for boats[J]. *Navigation*, 2020(3): 59-61.
- [78] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 微网多目标经济调度优化[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(19): 57-66.
- CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(19): 57-66.
- [79] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(8): 22-27.
- WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Economic operation optimization of thermoelectric power supply micronetworks containing renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(8): 22-27.
- [80] 吴雄, 王秀丽, 王建学, 等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(28): 1-8.
- WU Xiong, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed integer programming[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(28): 1-8.
- [81] WEN Shuli, LAN Hai, HONG Yingyi, 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, 42: 158-167.
- [82] LAN Hai, WEN Shuli, HONG Yingyi, et al. Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system - ScienceDirect[J]. *Applied Energy*, 2015, 158: 26-34.
- [83] 段树华. 应用于船舶的自动化风力发电系统研究[J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(2): 40-42.
- DUAN Shuhua. Research on automated wind generation systems applied to ships[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(2): 40-42.
- [84] 余正东, 王硕丰, 王良秀, 等. 船舶直流综合电力系统小信号稳定性分析[J]. *船舶工程*, 2019, 41(1): 53-57.
- YU Zhengdong, WANG Shuofeng, WANG Liangxiu, et al. Small signal stability analysis of marine DC integrated power system[J]. *Ship Engineering*, 2019, 41(1): 53-57.
- [85] MOUSAVIZADEH S, ALAHYARI A, GHODSINYA S R M, et al. Incorporating microgrids coupling with utilization of flexible switching to enhance self-healing ability of electric distribution systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(3): 300-310.

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2022-01-14

作者简介:

周荔丹(1973—), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为电能质量分析与治理, 动态无功补偿与有源滤波技术, 综合能源管理技术; E-mail: zhoulidan@sytu.edu.cn

许健(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为船舶能源管理系统; E-mail: 1615587818@qq.com

姚钢(1977—), 男, 通信作者, 博士, 研究员, 研究方向为柔性交流输电系统 FACTS 技术, 新能源并网接入技术, 储能技术. E-mail: yaogangth@sytu.edu.cn

(编辑 周金梅)