

引用格式: 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 W B, HAO C H, GAO J J, et al. Overview of the development of shipboard integrated power system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(6): 1–11.

舰船综合电力系统发展综述



扫码阅读全文

李维波^{*1,2}, 郝春昊¹, 高佳俊¹, 邹振杰¹, 潘峻峰¹

1 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070

2 西藏大学 工学院, 西藏 拉萨 850012

摘 要:舰船综合电力系统(IPS)将传统船舶的机械推进系统和电力系统以电能的形式合二为一,代表了舰船动力系统的发展方向,因此,需深入分析并了解其组成特点、发展态势及构建途径。通过与陆地电力系统的对比分析,梳理舰船综合电力系统的特殊性,探究舰船综合电力系统相关技术的研究情况和发展动态,进而总结潮流计算分析、可靠性评估和风险评估等典型的分析与评估技术,用以为舰船综合电力系统的设计、构建、运维、管理和操控提供理论依据。研究结果表明,物联网技术、5G 通信技术和多核 CPU 技术和信息交互融合技术将是舰船综合电力系统迎接未来挑战的杀手锏。智能化传感量测技术、智能化能量管理技术、智能化故障重构技术等将作为舰船综合电力系统必不可少的技术基础,最大限度地提高全船的战斗力和生命力。
关键词:综合电力系统; 潮流计算分析; 故障重构; 可靠性评估; 能量管理
中图分类号: U665.13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.01682

Overview of the development of shipboard integrated power system

LI Weibo^{*1,2}, HAO Chunhao¹, GAO Jiajun¹, ZOU Zhenjie¹, PAN Junfeng¹

1 School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

2 Institute of Technology, Tibet University, Lasa 850012, China

Abstract: Shipboard integrated power systems (IPS) combine a traditional marine independent mechanical propulsion system and a power system in the form of electrical energy, which is an important trend of warship power systems at present. Hence, it is necessary to have an in-depth understanding of IPS's constitution, development trends and approach to construct. Compared with land power grid, this thesis tackles the significant characteristics of shipboard IPS, probes into the researches and development tendency of relative technologies, contrasts and summarizes typical analysis and evaluation techniques of shipboard IPS, such as power flow calculation analysis, reliability evaluation and risk assessment, to provide a theoretical basis for the design, construction, operation and maintenance, management and control. It indicates that internet of things technology, 5G communication technology, multi-core CPU technology and information interaction and fusion will be effective approaches in meeting all kinds of challenge faced by the future development of shipboard IPS. Moreover, the technologies including intelligent sensing measurement, intelligent energy management, intelligent fault reconstruction, etc., will be the essential foundation of shipboard IPS, to maximize the combat capability and survivability of warship.
Key words: integrated power system ; power flow calculation and analysis; fault reconstruction; reliability assessment; energy management

0 引 言

舰船综合电力系统(integrated power system,

IPS)可为推进系统、作战系统等提供全电能保障,实现舰船动力的机械化向电气化转变、舰船信息的网络化向集成化转变、舰船设备的数字化

收稿日期: 2019-07-21 修回日期: 2020-06-18 网络首发时间: 2020-10-28 14:44
基金项目: 国家部委基金资助项目
作者简介: 李维波,男,1973年生,博士,教授。研究方向: 电力电子技术与舰船能量管理技术。E-mail: liweibo@whut.edu.cn
郝春昊,男,1997年生,硕士生。研究方向: 电力电子技术在舰船综合电力系统中的应用。
E-mail: 1007818050@qq.com

*通信作者: 李维波

向智能化转变,从而确保全舰能量管理与控制的精、准、稳,因此,IPS代表了舰船未来的发展方向^[1-3]。舰船IPS的终极发展目标是确保全船电力系统的高效、安全和可靠运行,从而提升舰船移动作战平台的战斗力与生命力。美国舰船的IPS由发电、电力变换、能量储存、电力分配、推进动力、平台负载和电力管理7个部分组成,其中包含4个子系统模块(发电和推进子系统、舰船日常用电配电电子系统、区域配电电子系统、监视控制子系统),该配置模式既可以扩大模块在舰船上的通用性,还能最大程度地降低舰船设计方案的难度。然而,该配置模式也存在明显不足,例如系统功率密度偏低、电力系统总体尺寸偏大等。英国舰船的IPS则为推进系统和作战系统设计了一个专用供电电源,该配置模式具备结构简单、功率密度大等优势,但需配置大容量的电力电子器件和高变换效率的储能装置^[4]。

鉴于舰船IPS的特殊性,本文将以典型特点和硬件架构作为切入点,重点研究潮流计算、可靠性评估模型、风险评估算法等应用于IPS的典型分析与评估技术,总结其经典理论和固有缺陷。目前,泛在电力物联网(ubiquitous electric internet of things, UEIOT)思想为电力系统各环节的万物互联、人机交互指明了长远的发展方向^[5-6],因此,应基于舰船IPS的各个环节,在能量管理、故障重构等领域借助具有状态全面感知、信息高效处理、应用便捷灵活等优点的物联网技术,结合移动互联网、人工智能等现代信息技术和先进通信技术,构建以大数据作为评价和分析手段的舰船IPS智慧服务系统。同时,还需利用数据传输与汇集的实时性、CPU数据运算的快速性,来准确完成逻辑分析、风险决策、操纵控制等重要处置动作,从而全面提升舰船传感量测、信息处理、网络传输和分析决策的智能化程度,为舰船IPS未来发展过程中的瓶颈问题提供新的解决思路。

1 舰船IPS介绍

1.1 舰船IPS的显著特点

与陆地电网相比,舰船IPS具有5个显著特点^[7]:1)舰船IPS是一个独立的电力系统,无需外界电力系统协助,仅靠自身动态调控即可维持稳定运行;2)鉴于有限的舰船空间,电力系统的输电距离较短,线路损耗也较小,但系统各部分的结构紧密,容易相互影响;3)舰船IPS的负载切换非常频繁,而单个负载的容量较大,所以总负载的波动变化量也较大;4)舰船IPS的运行工况较

为恶劣(例如,海洋环境的湿度、盐雾等),这就对设备的可靠性提出了严苛的要求,当舰船电力系统受损时,应最大限度地维持关键设备的正常供电,以确保舰船战斗力和生命力;5)舰船IPS安装于密闭狭小的空间内,而电力设备种类繁多、数量庞大,故其电磁环境非常复杂,这也增加了舰船IPS抗电磁干扰设计的难度。

1.2 舰船IPS的硬件架构

舰船IPS主要由6个部分组成,分别为发电分系统、输电分系统、储能分系统、变配电分系统、推进分系统和用电设备。根据不同的电网结构,可以将舰船IPS分为2种:1)第1代舰船IPS,其显著的特点是中压交流与高频交流相结合,例如美国海军的“朱姆沃尔特”级导弹驱逐舰,英国海军的45型导弹驱逐舰和“伊丽莎白”级航空母舰;2)第2代舰船IPS,其是以中压直流供电为标志,其电网功率密度和运行可靠性均有所提高,这也是未来舰船IPS的发展趋势。

随着日益严苛的舰船电能质量要求,分布式能源的应用已逐渐普及,通过将发电、输电、储能、变配电和推进等IPS分系统和用电设备整合到一个总系统中^[8],即可对全船用电实现集中调控,其硬件架构如图1所示。

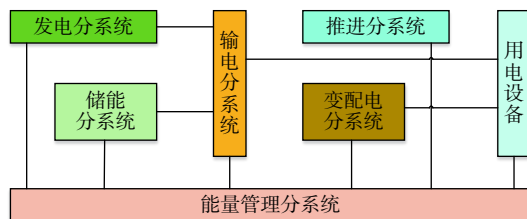


图1 舰船IPS的硬件架构

Fig. 1 Structural block diagram of shipboard IPS

舰船IPS以设计高可靠性、大容量、智能化的新型IPS为核心,涵盖了发电、变电、用电和管理等多个环节。与传统的电力系统相比,IPS的最大改进之处在于新能源的获取与变换、超能武器电源的转换与使用等方面,具体包括信号交互、传感量测、外围设备、舰员操控与决策支持等多个应用场合^[9-11],充分发挥了5G通信技术在信息链控制能量链方面的潜在优势,如图2所示。

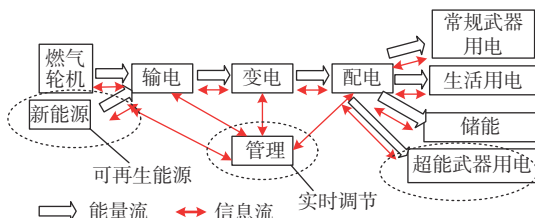


图2 舰船IPS能量链与信息链的相互作用

Fig. 2 Interaction between energy chain and information chain of shipboard IPS

2 舰船 IPS 的典型分析与评估技术

2.1 潮流计算分析

潮流计算是舰船 IPS 中非常重要的一种分析计算技术, 据此可以获取电力系统的整体状态, 通过综合分析系统各节点的电压及支路的功率分布, 即可实时判断电力系统工况。随着分布式电源的大规模实船应用, 不仅改变了配电系统单向潮流的技术特点, 还将传统舰船的单电源辐射电力网络变成了多电源电力网络, 但舰船 IPS 统一规划和使用安全的新问题也随之而来, 这将打破传统舰船输配电保护设备之间的既定配合关系, 进而影响继电保护的动作行为和动作性能。因此, 针对舰用大容量分布式电源的保护算法研究, 已成为继电保护设计的关键性技术。就潮流计算本身而言, 舰船 IPS 与陆地电力系统的共同点是其拓扑结构均为辐射状或环状, 不同点是舰船 IPS 是一个独立的电力系统, 囿于狭小的安装

空间, 且其输电线路一般较短。

在潮流计算的发展历程中, 国内外学者曾尝试将前推回代潮流算法和节点法改进之后应用于舰船 IPS, 具体如表 1 和表 2 所示。

除此外, 以下 3 个方面的潮流计算问题将是未来的研究热点:

- 1) 现阶段潮流计算所依据的拓扑结构较为简单, 未来将重点关注更复杂、更契合 IPS 实际工况的拓扑结构。
 - 2) 基于仿真模型进行潮流算法分析时, 由于仿真模型的局限性, 一般无法充分体现 IPS 的实际状态, 因此需研究精细化建模方法。
 - 3) 目前, 潮流计算的主要对象为已确定的舰船电力系统, 未来将针对 IPS 的不确定性开展潮流计算算法研究。
- 此外, 如果将交流配电网与直流配电网分开, 利用基于改进牛顿-拉夫逊法引申而来的交替迭代法单独对其进行求解, 直至均收敛, 可以适用于任何交、直流混合系统的潮流计算问题。

表 1 陆地电网潮流计算算法对比分析

Table 1 Comparative analysis of power flow calculation algorithms for land power grid

文献	来源	算法	优 点
Baldwin等 ^[12]	前推回代法	改进前推回代法	计算耗时少, 算法收敛
Alfred ^[13]		改进前推回代法	补偿了系统的不接地特性
Medina等 ^[14]		改进前推回代法	解决了辐射状和环状电网拓扑的多电源问题
康军等 ^[15]		改进前推回代法	利用PV节点电流补偿方法, 解决了系统的多电源问题

表 2 节点法改进算法对比分析

Table 2 Comparative analysis of improved nodal algorithm

文献	来源	算法	优 点	缺 点
冀欣等 ^[16]	节点法	改进节点电势法	计算步骤清晰, 算法精度高, 收敛速度快	模型为确定性模型
Yeleti等 ^[17]		牛顿-拉夫逊法	求解了中压交、直流混合系统的潮流计算	建模较为简单
Su等 ^[18]		交、直流分析法	分析了发电机和负荷的变化规律	不适用于交、直流混合系统
兰海等 ^[19]		改进牛顿-拉夫逊法	求解了交、直流混合系统的潮流计算	算法较为复杂

2.2 可靠性评估模型

可靠性评估对舰船航行任务的顺利开展和舰员安全保障起着至关重要的作用。所谓可靠性, 即该系统正常运行时在规定时间内完成指定任务的能力。军用舰船的可靠性还需对其生命力开展进一步研究。所谓生命力, 即舰船在外界作用力影响下可以继续维持供电的能力。

随着电磁炮、电磁发射器、激光武器等新型武器系统的列装上舰, 必将对舰船 IPS 的正常运行产生较大冲击^[20], 而如何检测并有效平抑控制

这些冲击对其他武器装备的影响、谨慎处理导弹类敏感装备之间的耦合作用, 是当前可靠性评估领域的一个技术难题。

根据实际电磁环境的测量数据, 如果采用传统方法评估设备之间的相互耦合作用, 对传统舰船电力系统而言是适用的; 然而鉴于舰船 IPS 的复杂性和特殊性, 其测量成本、测量工作量和数据处理量都将显著增加, 这会导致传统测量评估方法的风险很高。根据调研结果, 对于负载点而言, 陆地电力系统将重点关注 3 个可靠性指标, 即年故障率、年停电时间和年平均停电时间。基于

舰船 IPS 的特殊性, 还需要重点关注 6 个可靠性指标, 即平均断电频次、平均断电持续时间、平均用电有效度、平均用电无效度、总电量不足和平

均电量不足^[21]。国内外学者基于这 9 个可靠性指标, 采用不同的算法开展了大量卓有成效的研究工作, 如表 3 所示。

表 3 可靠性评估的研究成果
Table 3 Research achievements in reliability assessment

文献	算法	研究成果
李红江等 ^[22]	最小割集法	区域配电系统的可靠性最高
Stevens等 ^[23]	马尔科夫法	基于一个半断路器的电力拓扑更可靠
Dubey等 ^[24]	连续最小路径生成算法	电力拓扑所用的导体器件越少, 其可靠性越高
Capasso等 ^[25]	直流孤岛算法	优化储能系统可以提高系统效率

通过调研还发现, 未来需重点关注以下 3 个方面的问题:

- 1) 应借鉴陆地电网的拓扑结构进行可靠性评估分析, 并选择有利于提高舰船 IPS 可靠性的拓扑结构, 进而研究相关的评估规律。
- 2) 当前的可靠性评估策略与评估指标都是基于陆地电网发展而来, 应针对舰船 IPS 自身的特殊性, 例如负载功率大、设备干扰强等, 提出适用于实船工况的评估指标。
- 3) 随着新兴武器的列装上舰, 需相应调整可靠性评估策略。此外, 如何根据不同的运行状况对可靠性评估策略进行切换, 也是未来的研究热点。

2.3 风险评估算法

风险评估理论的兴起虽然晚于可靠性评估, 但其继承和完善了可靠性评估的发展理念, 并将研究重点放在了舰船风险评估与系统应对方案上, 这一点完全不同于可靠性评估技术^[26-27]。作为舰船 IPS 安全分析的研究重点, 近年来, 我国开展了电力系统风险评估方面的研究, 主要分为以下 3 种^[28]:

- 1) 元件级风险评估, 即针对某一种器件进行风险评估, 通过定量分析电力系统中的器件功能, 研究器件故障对舰船电力系统的影响。
- 2) 系统级风险评估, 其主要对象是系统运行时的不确定性因素, 是对舰船 IPS 整体运行风险的一种综合性评估。
- 3) 风险评估体系, 即基于成熟风险体系已有的风险指标, 根据研究对象的特点, 建立合理的风险评估体系。

因此, 舰船 IPS 的风险评估过程为:

- 1) 基于舰船 IPS 的各个器件, 构建全船的风险评估体系;
- 2) 采用层次分析法, 得出 IPS 各个子系统的

风险权重(系数);

- 3) 基于系统设备和技术项目的风险度, 求解全船的总风险等级, 如图 3 所示。

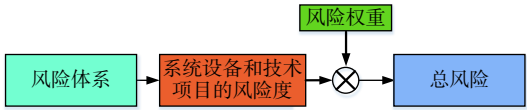


图 3 舰船 IPS 的风险评估过程
Fig. 3 Risk assessment process of shipboard IPS

如图 4 所示, 舰船 IPS 的风险评估体系分为目标层、分目标层和指标层 3 个层次。目标层是舰船运行时的总评估目标, 即电力系统风险评估。作为评估体系中的具体目标分类, 分目标层具体包括 3 个风险指标: 电压越限、功率不匹配和频率偏移。指标层是对各个分目标层具体状态的进一步细分, 包括过电压指标和低电压指标、过载指标和轻载指标, 以及频率偏移指标等。

随着精确制导武器的大量应用, 舰船遭受攻击而受损的概率急剧增加。轻微时, 船体受损, 进而导致推进系统、电力系统、武器系统、电子系统等受损; 严重时, 舰船完全丧失战斗力甚至倾覆、沉没。因此, 需要通过风险评估技术来对舰船战损时的生命力进行实时计算, 从而快速掌握战损舰船的浮性和稳性参数, 准确评定损伤等级, 并据此制定科学的抢修方案。

在风险评估方面, 未来的研究重点如下:

- 1) 风险评估指标的选取问题。现有的风险评估指标仅对舰船电力系统进行了一个比较简单的分类, 在后续研究中, 风险指标的分类将越来越多, 也将更为详细。
- 2) 系统设备的权重参数和故障概率不够精确的问题。目前, 由于舰船数据库还不够完善, 所以相关指标的计算结果也不够准确。但随着我国对舰船电力系统相关数据的进一步积累, 将逐渐提高风险评估结果的可靠性。
- 3) 随着舰船大功率作战系统的投入使用, 大

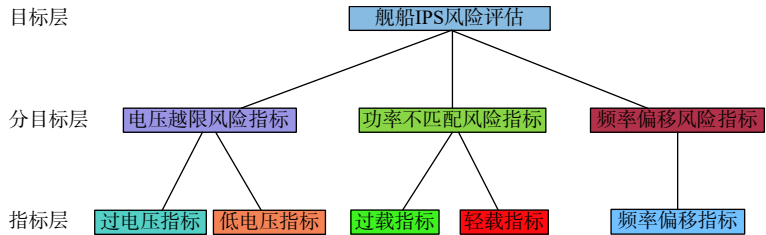


图 4 舰船 IPS 的风险评估体系

Fig. 4 Risk assessment system of shipboard IPS

容量脉冲功率特种负载的突加/突卸势必会对全船电网带来明显的影响,因此,风险评估的对象不能仅局限于小型负载对电力系统的冲击。

针对上述问题,可以考虑采用改进的伪时序算法来对风险评估的时序过程进行分析优化,从而提高蒙特卡罗法的评估效率。如何对改进伪时序算法的数学处理过程进行优化,也是未来的研究方向。

3 基于物联网技术的信息集成与共享技术

鉴于物联网的技术优势,5G 通信技术、多核 CPU 技术和信息交互融合技术必将成为智能舰船必不可少的基础条件。通过将物联网技术应用于舰船 IPS 的顶层设计中,构建电能质量监视、能量管理、故障重构等子系统,以及全船云端存储与可视化平台,即可实现具有可靠性、实时性、便捷性和全船数据共享性的多层结构,以及局域加广域的监视功能^[29]。

与陆地电力系统的智能化构建工作类似,舰船 IPS 的发电、输电、变电、配电、用电和管理等所有环节都必须采用信息化手段,这是舰船 IPS 智能化建造与设计的重要内容^[30]。通过采用高速、集成、交互式的通信架构,借助 5G 手段,即可确保实时信息传输和电力变换操动的智能化运行,这将有效提高舰船 IPS 的供电可靠性、抗干扰性、生命力、战斗力和总体空间使用率。

3.1 智能化传感量测技术

智能化传感量测手段是舰船 IPS 信息化构建必不可少的物理平台。关键性参数的传感器选型与量测处理是舰船 IPS 信息化的重要组成部分,在获得全船关重件的健康状态数据并将其合理变换与处理之后,需借助物联网载体进一步调制或转换成数字信息流,如图 5 所示。

由图 5 可知,舰船 IPS 的智能化传感量测系统架构可以实现各个设备智能化感知、不同形式数据信息的快速传输和深度融合处理。从功能角度来说,智能化传感量测系统可以分为 4 层物联

网架构,即物理层、感知层、传输层和应用层。借助传感器和智能检测仪表,感知层可以实时采集并获取物理层各个设备的状态信息,经由传输层至应用层,即可实现判断、决策、数据融合等应用功能,以及信息深加工功能(显示、存储和分析等),从而为舰船 IPS 各子系统提供关键性的数据源。由此可见,通过利用智能化量测技术,可以准确评估舰船 IPS 的实时工况及完整性。

3.2 智能化能量管理技术

随着舰船全电力推进技术以及综合电力系统的深入发展,以美、英为代表的西方国家均在舰船能量管理系统领域投入了大量的人力和物力,其中美国的高智能化能量管理系统已列装于 DDG-1000 级驱逐舰,英国也早在 1994 年正式启动了相关研究工作。我国在该领域的研究起步较晚,目前,上海船舶运输科学研究所通过对低压电站监控系统的机械结构、硬件、软件进行改进升级,研制了国产能量管理系统,实现了配电管理、负载管理、信息管理和系统分析等功能,可以为推进负载和日用负载提供稳定、连续的优质电能。

舰船 IPS 的智能化能量管理系统集控制、监测、保护和管理于一体,其主要功能为:1)负责 IPS 各个子系统设备的实施控制、故障诊断与继电保护;2)自动协调发电机组和电力推进功率;3)实时记录系统事件信息及系统的运行参数和状态^[31]。随着舰船电力系统容量的井喷式增长,电网结构日益复杂,高能负载也呈多样化发展趋势,这对全船电能的集中管理提出了很高的设计要求。

舰船 IPS 的智能化能量管理系统可以采用冗余式双层计算机网络架构,其中顶层为基于综合平台管理系统工业以太网的数据传送网;底层为由 CAN 现场总线构成的实时数据采集网和控制网,如图 6 所示。

通过采集多路数字量来获取当前电站的运行状态,并根据读入数字量和集控台下达的指令来输出相应的数字信号,用以控制各底层设备,即可确保舰船能量管理系统的正常运行^[32]。图 7 所

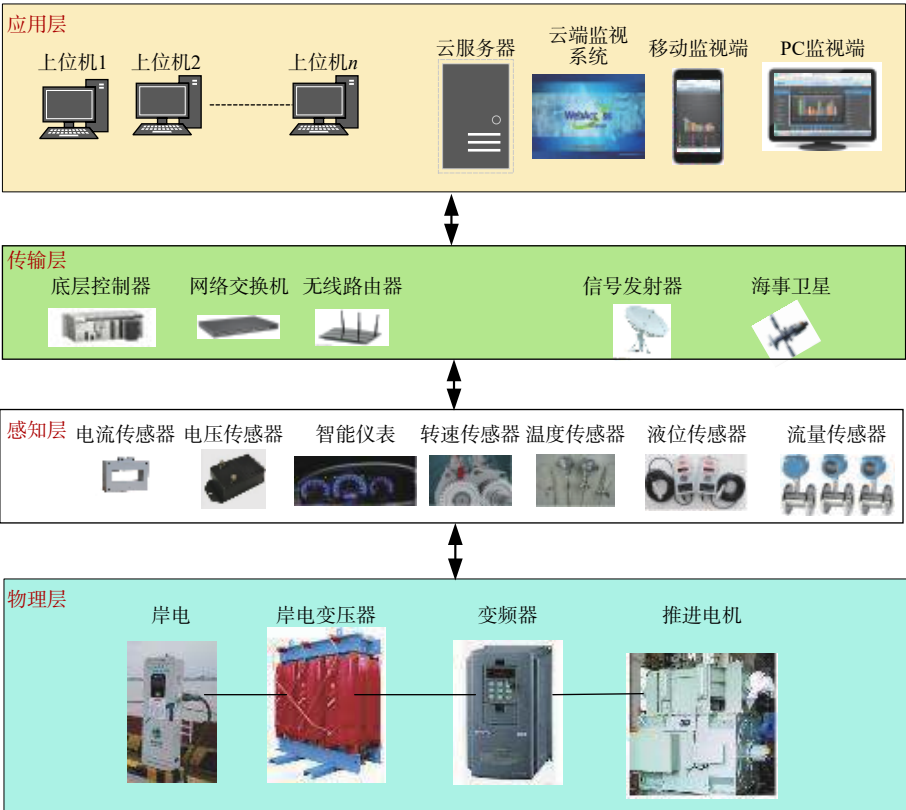


图 5 舰船 IPS 的智能化传感量测系统架构

Fig. 5 Architecture of intelligent detection system for shipboard IPS

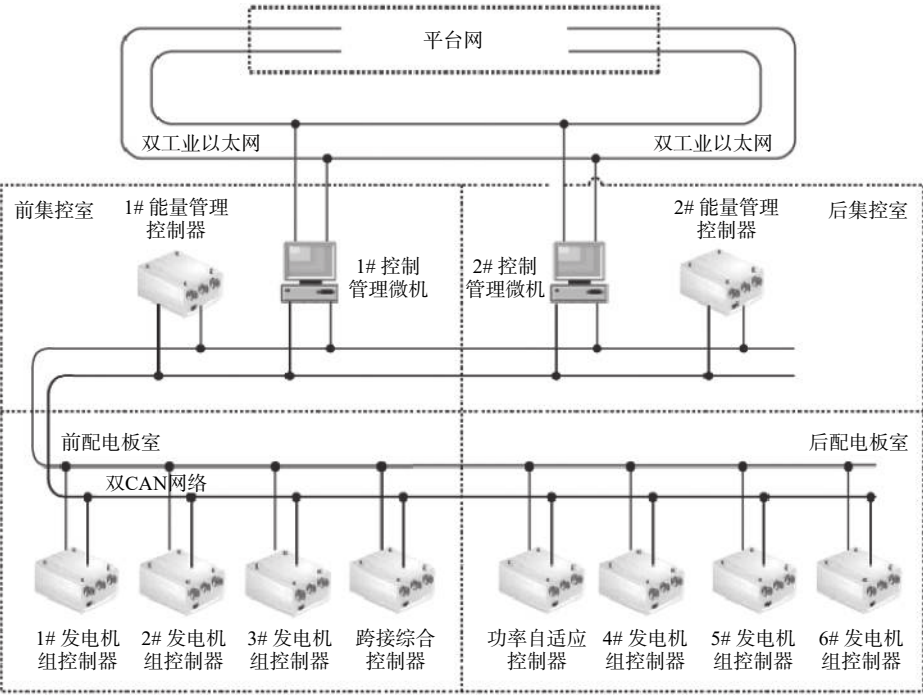


图 6 舰船 IPS 的智能化能量管理系统的架构

Fig. 6 Architecture of intelligent energy management system for shipboard IPS

示为基于 ARM 控制器的能量管理系统监控设备的硬件架构图, 主要包括顶层集控台、数字量信号处理模块以及底层各个电站开关量获取模块, 其处理流程如下: 首先, 由具备光耦隔离功能的数字输入 DI 模块和数字输出 DO 模块实时获取

各个电站的出口断路器状态信号、反馈量信号和配电板输入指令信号等; 然后, 通过 I²C 总线将所有的数字量输入/输出电平信号传输至信号处理控制器, 进行信号处理; 最后, 通过 CAN 总线和以太网与集控台之间进行数据交互。与此同时,

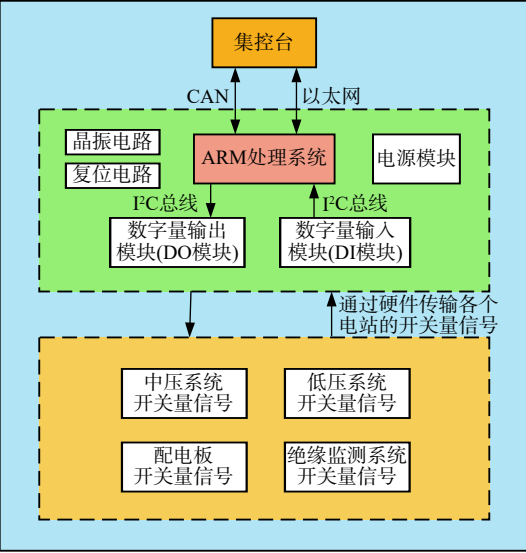


图 7 基于 ARM 控制器的能量管理系统监控设备硬件架构

Fig. 7 Hardware architecture of energy management system monitoring equipment based on ARM controller

当集控台操作数字量控制器时, 信号处理控制器可以根据所采集的信号来控制参考电压, 同时控制配电板上的指示灯, 从而确保被控对象完成相应的动作, 避免底层器件出现误操作的情况^[33]。

3.3 智能化故障重构技术

舰船 IPS 可以分为平台与载荷 2 个部分, 其中平台部分用于维持舰船的正常行驶, 由舰船保障系统、电力系统、动力系统和船体系统等组成^[34]; 而载荷部分则是满足战时设备的供电需求, 由通信系统、导航系统、警戒探测系统、水声系统、作战系统、舰空导弹系统、舰舰导弹系统、主炮系

统、副炮系统、电子战系统、舰载反潜系统、直升机系统和直升机舰面系统等组成^[35]。一旦舰船电力系统的某电力设备出现故障, 尤其是电磁炮、电磁弹射装置等大容量脉冲功率武器装备, 势必对全船电力系统造成极大的挑战。此时, 舰船电力系统需立即对网络线路进行自适应重构, 在维持动力系统正常供电的同时, 最大限度地恢复作战系统供电, 确保全舰的生命力与战斗力。

在电力系统产生故障之后, 应按照既定的重构策略来操作断路器, 以改变电网拓扑结构, 从而将故障部位隔离在系统之外, 同时恢复失电的负载。与陆地电力系统不同, 舰船 IPS 一般不以网络损耗最小化作为重构的目的, 两者之间存在本质的区别。

目前, 舰船电网拓扑可以分成辐射型、环型和网状型 3 种类型。辐射型是以电源为中心, 经主配电板、区域配电板、分配电箱, 最终传输至负载端的发散形拓扑, 这是一种纵向接线方式, 负载只能由一个电源供电; 环型是一种电源环型供电和辐射式配电网络的复合拓扑, 通过主配电板以环型联结发电机, 由多个电源通过区域配电板及分配电板对负载进行供电; 网状型是环型网络的一种高级形式, 在舰船发电机组和负载较多时, 其电源连线可以形成至少 2 个以上的环型网络拓扑, 从而显著提高系统的冗余性和可靠性。

基于故障重构优化算法, 国内外学者针对舰船电力系统的故障重构开展了一系列研究, 如表 4 所示。

表 4 故障重构算法对比分析

Table 4 Comparative analysis of fault reconstruction algorithms

文献	算法	优点	缺点
杨秀霞等 ^[36]	遗传算法	可以搜索重构策略	仅考虑了负载恢复的影响
Wang 等 ^[37]	机器学习算法	可以处理辐射型电网重构问题	不适用于其他拓扑的电网重构
Mitra 等 ^[38]	小种群粒子群算法	验证了环形船舶模型的有效性	不适用于网状型电网重构
陈雁等 ^[39]	改进粒子群算法	适用于网状型电网	延长了重构耗时

根据调研结果, 未来会重点关注以下 3 个方面的问题:

- 1) 基于遗传算法、粒子群算法等智能算法进行故障重构的寻优时间普遍较长, 且效率较低, 因此, 需进一步通过优化组合提出兼顾故障重构时间和最优策略的算法, 从而让舰船电网能够在故障之后迅速恢复正常。
- 2) 现阶段对舰船 IPS 故障重构的研究成果均未考虑不确定性因素的影响, 如何将 IPS 实船应用中的不确定性数据纳入故障重构智能算法, 以

增加系统故障重构结果的置信度, 是有待解决的问题。

- 3) 随着新兴武器的不断列装, 大容量脉冲功率设备已逐渐在舰船 IPS 中崭露头角, 根据舰船战时与航行时的不同模式, 应相应调整故障重构策略, 从而针对不同的运行状态灵活切换故障重构模式。

针对上述问题, 可以考虑采用将孤岛划分与网络重构相结合的方法, 以排除与联络开关支路相连的节点, 并减少孤立支路和节点, 从而有效

缩减故障重构时间。该方法适用于各种复杂的网络结构,将成为未来的研究重点。

3.4 基于 5G 的物联网技术

随着舰船管理水平的不断提高,舰载设备已逐渐进入了智能化、网络化和信息化时代,但仍然不够成熟。以舰船电机为例,其普遍存在的管理问题为:1)过于分散的电机布局,一旦需手动启动或停止电机,操作人员就必须往返于各个电机所在的位置进行操作,既增加了工作量,也带来了操作风险;2)操作人员过多,既带来了操作不便的问题,也进一步加剧了空间位置的矛盾^[40]。

物联网技术作为一种新兴的共享基础架构方法和云计算技术,具有弥漫性及无所不在的分布性和社会性特征,可以将巨大的系统池连接在一起以提供各种 IT 服务^[41]。利用物联网技术,可以解决舰船电机管理不足的问题,通过采用通信技术(例如 RS485, RS422, RS232)对智能化电机进行分散布置和集中管理^[42],不仅可以实现远程集中的启动、停止常规功能,还可以全过程监视电机的运行状态^[43]。

基于物联网技术的舰船信息处理系统可以采用 B/S 三层体系结构^[44],如图 8 所示。第 1 层是舰船信息处理系统的基础层,主要用于采集舰船航行的实时动态数据,然后储存于后台数据库;第 2 层是过渡层,主要用于接收、处理和分析上一层的采集数据,完成数据存储管理,最终实现与用户之间的交互功能;第 3 层是核心层,主要用于统计舰船信息,并完成信息发布及业务管理工作。

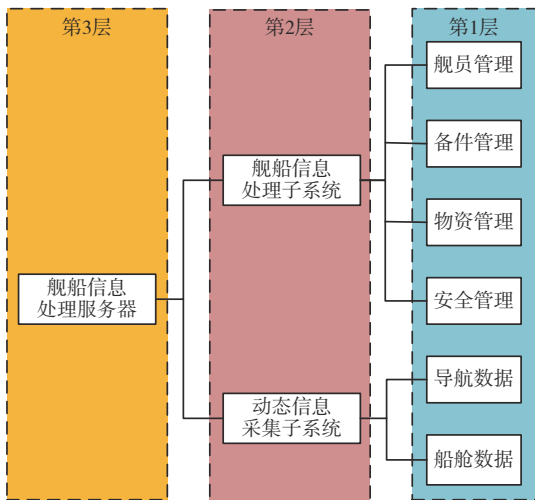


图 8 舰船信息处理系统的网络架构

Fig. 8 Network architecture of ship information processing system

至于岸基人员管理,例如岸基监管机构、设备厂商、系统设计部门等,均可通过云端监视层来获取舰船 IPS 监视系统的运行状况和远程诊断信息,其中云端监视系统的设计流程如图 9 所示。在本地服务器和百度云服务器器的 Web Access 软件中新建工程,设置通信端口;在本地服务器和云服务器中同时启用监控,即可将感知层获取的电能质量数据上传到云端监控系统。在岸基使用手机、平板或 PC 机等移动终端打开浏览器,登陆云服务器公网 IP 地址,即可查看云端 Web Access Dashboard 开发的监视系统界面。除了集中显示电能质量数据,绘制电压、电流的相量图之外,云端监视系统还可以记录历史数据和故障事件,例如故障报警信号。

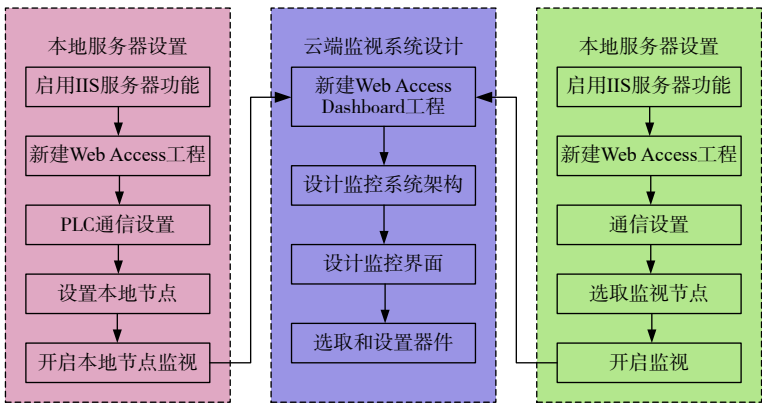


图 9 云端监视系统的设计流程

Fig. 9 Process design of cloud monitoring system

由于舰船航行时经常会遭遇恶劣的海洋气候环境,同时空间约束又进一步导致其富含电磁干扰,因此,为了保证舰船信息处理系统的平稳运行,必须选用性能优、稳定性好、响应快、精度高的硬件设备。此外,在物联网技术的实船应用过

程中,需重点研究以下 2 个问题:
1) 目前,我国舰船传统信息处理系统的运行速度较慢,而系统的响应速度又与舰船 IPS 的可靠性密切相关,因此,如何减少信息在产生、传递与接收阶段的耗时是需要重点关注的问题。

2) 信号处理服务端可以接收来自全船的各种信息,但并不是每一条信息都需要显示出来,如何合理选取这些信息并做出相应的处理,也是未来的研究重点。

4 结 论

本文总结了国内外舰船 IPS 的潮流计算分析、可靠性评估、风险评估等典型的分析与评估技术,并进行了研究展望。预计至 2030 年,随着特种传感器技术、碳化硅功率器件、5G 网络技术的成熟发展,必将催生基于 5G 物联网技术的智能化传感量测技术、智能化能量管理技术和智能化故障重构技术,从而推动舰船 IPS 的设计、构建、运维、管理、操控等模式的根本性改变,主要体现为:

1) 在实际运行中,舰船 IPS 往往会出现大量不确定性因素,故需构建信息平台并做出正确的响应,同时,信息平台应具备自愈与故障恢复机制。鉴于高速局域网的自恢复能力,舰船 IPS 的各个设备可以采用高速局域网来构建数字化信息平台,从而有效保证采集信息的服务质量。此外,全船数字化信息平台的构建,也体现了舰船 IPS 信息集中管理的设计理念。

2) 目前,舰船 IPS 的各种算法与关键技术均是基于简单的拓扑结构而展开,IPS 各个设备信息的拾取、处理和变换等不同过程均是通过 CPU 及其外围器件或设备的配合而实现。由此可见,大量数据的处理运算、功能分析与逻辑判断等特殊过程均依赖于 CPU,因此,必须重视发展多核 CPU 技术。

3) 囿于舰船 IPS 设备空间位置的约束性,舰船输配电技术上舰需解决复杂电磁环境下多个智能化设备的兼容性问题以及网络安全问题。为此,首先需建立开放的通信架构,保障舰船 IPS 各个设备之间的信息可以通过网络互通、互联;其次,应细化信息模型,对模型扩充方法与原则做出规定;最后,应统一技术标准。

参考文献:

[1] 王守相, 孟子涵. 舰船综合电力系统分析技术研究现状与展望 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(2): 107-117.
WANG S X, MENG Z H. Current status and prospects of analysis technologies of shipboard integrated power system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(2): 107-117 (in Chinese).
[2] VELARDO C, SHAH S A, GIBSON O, et al. Digital health system for personalised COPD long-term management[J]. BMC Medical Informatics and Decision Mak-

ing, 2017, 17(1): 19.
[3] 王志飞, 肖晗, 隋波. 舰船综合电力系统预防控制方法综述 [J]. 舰船电子工程, 2019, 39(11): 159-166.
WANG Z F, XIAO H, SUI B. Review of preventive method for vessel integrated power system[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(11): 159-166 (in Chinese).
[4] 顾云鹏, 臧严, 康美泽, 等. 舰船综合电力系统的发展历程、标准要求及应用前景 [J]. 船舶标准化与质量, 2017(2): 21-23, 10.
GU Y P, ZANG Y, KANG M Z, et al. Development history, standard requirements and application prospect of marine integrated power system[J]. Shipbuilding Standardization & Quality, 2017(2): 21-23, 10 (in Chinese).
[5] 杨挺, 翟峰, 赵英杰, 等. 泛在电力物联网释义与研究展望 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 9-20, 53.
YANG T, ZHAI F, ZHAO Y J, et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 9-20, 53 (in Chinese).
[6] 肖振锋, 辛培哲, 刘志刚, 等. 泛在电力物联网形势下的主动配电网规划技术综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 43-48.
XIAO Z F, XIN P Z, LIU Z G, et al. An overview of planning technology for active distribution network under the situation of ubiquitous power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 43-48 (in Chinese).
[7] 梅生伟. 电力系统的伟大成就及发展趋势 [J]. 科学通报, 2020, 65(6): 442-452.
MEI S W. Great achievements and development trends of power systems[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(6): 442-452 (in Chinese).
[8] 马伟明. 舰船综合电力系统中的机电能量转换技术 [J]. 电气工程学报, 2015, 10(4): 3-10.
MA W M. Electromechanical power conversion technologies in vessel integrated power system[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(4): 3-10 (in Chinese).
[9] 莫文科, 王起硕, 黄伍德, 等. 浅论未来船舶电力系统智能化的发展与实现 [J]. 船电技术, 2019, 39(增刊 1): 8-11.
MO W K, WANG Q S, HUANG W D, et al. The development and the realization of intelligent ship power system in the future[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2019, 39(Supp 1): 8-11 (in Chinese).
[10] 吴本祥, 张晓锋, 徐国顺, 等. 船舶交直流混合电力系统接地方式对直流共模电压影响研究 [J]. 海军工程大学学报, 2019, 31(3): 102-106.
WU B X, ZHANG X F, XU G S, et al. Research on influence of grounding mode on DC common voltage in ship AC/DC hybrid power system[J]. Journal of Naval

- University of Engineering, 2019, 31(3): 102–106 (in Chinese).
- [11] 王子强, 王杰. 一种计及智能电网信息物理特性的分布式控制器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6921–6933.
- WANG Z Q, WANG J. A distributed control considering the cyber-physical characteristics of smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6921–6933 (in Chinese).
- [12] BALDWIN T L, LEWIS S A. Distribution load flow methods for shipboard power systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(5): 1183–1190.
- [13] ALFRED K C. A framework of a multi-agent system for detection and diagnosis of fault on shipboard power systems[D]. Washington D. C.: Howard University, 2008.
- [14] MEDINA M M, QI L, BUTLER P K L. A three phase load flow algorithm for shipboard power systems (SPS)[C]//2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No. 03CH37495). Dallas, USA: IEEE, 2003: 227–233.
- [15] 康军, 马伟明, 付立军, 等. 舰船电力系统潮流计算方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(1): 32–35.
- KANG J, MA W M, FU L J, et al. Load flow computing method for shipboard power systems[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2008, 32(1): 32–35 (in Chinese).
- [16] 冀欣, 张晓峰. 基于节点电势法的舰船电力系统潮流计算方法[J]. 船海工程, 2007, 36(5): 132–135.
- Ji X, ZHANG X F. A power flow calculation algorithm for shipboard power system based on the node voltage method[J]. Ship & Ocean Engineering, 2007, 36(5): 132–135 (in Chinese).
- [17] YELETI S, FU Y. Load flow and security assessment of VSC based MVDC shipboard power systems[C]//2011 North American Power Symposium. Boston, USA: IEEE, 2011: 1–7.
- [18] SU C L, YEH C T. Probabilistic security analysis of shipboard DC zonal electrical distribution systems[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008: 1–7.
- [19] 兰海, 鲍鹏, 王琬婷. 舰船中压直流综合电力推进系统设计及稳态分析研究[J]. 中国造船, 2017, 58(2): 216–229.
- LAN H, BAO P, WANG W T. Design and steady-state analysis of medium voltage DC propulsion power system on ships[J]. Shipbuilding of China, 2017, 58(2): 216–229 (in Chinese).
- [20] RASHKI M, AZARKISH H, ROSTAMIAN M, et al. Classification correction of polynomial response surface methods for accurate reliability estimation[J]. Structural Safety, 2019, 81: 101869.
- [21] HORN J T, LEIRA B J. Fatigue reliability assessment of offshore wind turbines with stochastic availability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 191: 106550.
- [22] 李红江, 鲁宗相, 王森, 等. 基于可靠性模型的船舶电网拓扑结构对比分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(11): 47–53.
- LI H J, LU Z X, WANG M, et al. Contrasting analysis of shipboard power system topological structures based on reliability model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(11): 47–53 (in Chinese).
- [23] STEVENS B, SANTOSO S. Reliability analysis of a shipboard electrical power distribution system based on breaker-and-a-half topology[C]//2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS). Arlington, USA: IEEE, 2013: 387–393.
- [24] DUBEY A, SANTOSO S. Availability-based distribution circuit design for shipboard power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1599–1608.
- [25] CAPASSO A, LAMEDICA R, LAURIA S, et al. Voltage quality studies in electric power systems: an AC/DC network for a shipboard application[C]//2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Florence, Italy: IEEE, 2016: 1–8.
- [26] KWANT H, SHEN Y T, YAO Q H. An energy management strategy for supplying combined heat and power by the fuel cell thermoelectric hybrid system[J]. Applied Energy, 2019, 251: 113318.
- [27] MAKI S, CHANDRAN R, FUJII M, et al. Innovative information and communication technology (ICT) system for energy management of public utilities in a post-disaster region: case study of a wastewater treatment plant in Fukushima[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 1425–1436.
- [28] IRIS C, LAM J S L. A review of energy efficiency in ports: operational strategies, technologies and energy management systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 112(9): 170–182.
- [29] 卓金宝, 施伟锋, 兰莹, 等. 基于物联网技术的电力推进船舶电能质量监视系统设计[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(2): 118–125.
- ZHUO J B, SHI W F, LAN Y, et al. Design of power quality monitoring system for electric propulsion ship based on IoT technology[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(2): 118–125 (in Chinese).
- [30] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457–5467.

HU J B, YUAN X M, CHENG S J. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(18): 5457–5467 (in Chinese).

[31] 冒如权. 舰船能量管理系统现状及发展趋势 [J]. *上海船舶运输科学研究所学报*, 2012, 35(1): 19–22.

MA R Q. Current status and development trend of ship power management systems[J]. *Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute*, 2012, 35(1): 19–22 (in Chinese).

[32] ALASALI F, HABEN S, HOLDERBAUM W. Stochastic optimal energy management system for RTG cranes network using genetic algorithm and ensemble forecasts[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 24: 100759.

[33] 许智豪, 李维波, 华逸飞, 等. FC 总线技术在舰船能量管理系统 I/O 端口扩展中的应用 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(1): 144–149.

XU Z H, LI W B, HUA Y F, et al. Application of FC bus technology in I/O port expansion of ship energy management system[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(1): 144–149 (in Chinese).

[34] CHEN L H, SHI P, LIU M. Fault reconstruction for Markovian jump systems with iterative adaptive observer[J]. *Automatica*, 2019, 105: 254–263.

[35] HAN M, LI J B, HAN B, et al. Fault subspace decomposition and reconstruction theory based online fault prognosis[J]. *Control Engineering Practice*, 2019, 85: 121–131.

[36] 杨秀霞, 张晓锋, 张毅, 等. 基于启发式遗传算法的舰船电力系统网络重构研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(10): 42–46.

YANG X X, ZHANG X F, ZHANG Y, et al. The study of network reconfiguration of the shipboard power system based on heuristic genetic algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(10): 42–46 (in Chinese).

[37] WANG C J, WANG X H, XIAO J M, et al. Fault reconfiguration of shipboard power system based on triple quantum differential evolution algorithm[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2016, 21(4): 433–442.

[38] MITRA P, VENAYAGAMOORTHY G K. Real-time implementation of an intelligent algorithm for electric ship power system reconfiguration[C]//2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Baltimore, USA: IEEE, 2009: 9–11.

[39] 陈雁, 孙海顺, 文劲宇, 等. 改进粒子群算法在船舶电力系统网络重构中的应用 [J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(3): 29–34, 39.

CHEN Y, SUN H S, WEN J Y, et al. Application of improved PSO algorithm in network reconfiguration of shipboard power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(3): 29–34, 39 (in Chinese).

[40] LU W D, LIU G Z, SI P Y, et al. Joint resource optimization in simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) enabled multi-relay internet of things (IoT) system[J]. *Sensors*, 2019, 19(11): 2536.

[41] DAI B. Design of complex wind power generation parameter control system based on embedded control combined with internet of things[J]. *Web Intelligence*, 2019, 17(2): 131–139.

[42] ALI M S, LI Y, JEWEL M K H, et al. Channel estimation and peak-to-average power ratio analysis of narrow-band internet of things uplink systems[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018, 2018: 2570165.

[43] SAHRAEI N, WATSON S, SOFIA S, et al. Persistent and adaptive power system for solar powered sensors of internet of things (IoT)[J]. *Energy Procedia*, 2017, 143: 739–741.

[44] JASIŃSKI M, MAJTCZAK P, MALINOWSKI A. Fuzzy logic in decision support system as a simple human/internet of things interface for shunt active power filter[J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 2016, 64(4): 877.