

引用格式: 侯慧, 甘铭, 吴细秀, 等. 混合动力船舶能量管理研究综述[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 216–229.

HOU H, GAN M, WU X X, et al. Review of hybrid ship energy management[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(5): 216–229.

# 混合动力船舶能量管理研究综述



扫码阅读全文

侯慧<sup>1</sup>, 甘铭<sup>1</sup>, 吴细秀<sup>1</sup>, 谢坤<sup>3</sup>, 范则阳<sup>2,3</sup>

1 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070

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:** 随着世界各国对船舶节能减排越来越重视, 混合动力船舶在节能减排技术方面的优势日趋凸显, 通过对混合动力船舶的能量管理而使船舶上的多种能源高效协调工作, 成为了在保证船舶动力性的前提下实现节能减排的关键。针对混合动力船舶能量管理的最新研究进展及研究现状, 首先, 从可靠性、经济性及环保性这3个角度对混合动力船舶的能量管理目标进行总结; 然后, 从规则型和优化型能量管理的角度, 对比现有的能量管理策略, 全面和深入分析针对这些能量管理策略的研究所存在的优缺点及其应用条件; 最后, 根据上述研究的不足, 对未来混合动力船舶能量管理的研究方向进行展望。

**关键词:** 混合动力船舶; 节能减排; 能量管理目标; 能量管理策略

中图分类号: U664.1

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02133

## Review of hybrid ship energy management

HOU Hui<sup>1</sup>, GAN Ming<sup>1</sup>, WU Xixiu<sup>1</sup>, XIE Kun<sup>3</sup>, FAN Zeyang<sup>2,3</sup>

1 School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, 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 advantages of hybrid ships in energy conservation and emission reduction are increasingly prominent in the context of countries around the world paying increasing attention to such matters. Energy management is the key to achieving energy conservation and emission reduction on the premise of ensuring power performance. This paper summarizes the research progress and status of hybrid ship energy management. First, the energy management objectives are summarized in the three aspects of reliability objectives, economy objectives and environmental protection objectives. Second, the energy management strategies are compared and analyzed from the perspectives of rules and optimization, and the advantages, disadvantages and application conditions of the existing energy management strategies are summarized and analyzed deeply and comprehensively. Finally, according to the gaps in the existing research, the future research directions of hybrid ship energy management are predicted.

**Key words:** hybrid ships; energy-saving and pollution emission reduction; energy management objective; energy management strategy

## 0 引言

混合动力船舶是指由不同类型的发动机驱动或者具有一种以上电力来源的电动机驱动的船

舶, 它通过不同能源之间的协调互补来提高船舶整体能效, 实现节能减排。相较于混合动力汽车, 混合动力船舶的相关研究起步较晚, 涉及的内容也较少。随着全球石油资源日趋紧张和各国

收稿日期: 2020-10-09 修回日期: 2021-02-17 网络首发时间: 2021-06-22 15:11

基金项目: 国家自然科学基金自然科学基金资助项目(52177110)

作者简介: 侯慧, 女, 1981年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶能量管理与能源互联网等。E-mail: 77476630@qq.com

甘铭, 男, 1998年生, 硕士生。研究方向: 船舶能量管理等。E-mail: szganming@126.com

吴细秀, 女, 1976年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶能量管理与能源互联网等。E-mail: wuxixiu@163.com

\*通信作者: 吴细秀

对船舶节能减排的愈加重视,以及国际海事组织(IMO)海上环境保护委员会(MEPC)第62次会议之后开始将船舶能效设计指数(energy efficiency design indicator, EEDI)作为船舶验收的重要指标<sup>[1-2]</sup>,混合动力船舶的推广及应用成为了业界研究的热点。

混合动力船舶包含了以电能为中心的多种能量来源,其多样性赋予了船舶运行灵活、经济的优点,而不同能量来源只有通过管理,充分利用各自的特性、协调控制它们之间的流动,才能在保证船舶的功能性、安全性的同时,有效降低能耗、减少排放。混合动力船舶过去通常指的是柴-电混合动力船舶,但随着船舶新能源技术逐步得到推广,以太阳能<sup>[3]</sup>、燃料电池<sup>[4]</sup>为代表的新能源技术开始在船舶上应用,国内外学者为此开展了一定的研究。然而,结合近年来针对蓄电池-超级电容混合储能结构<sup>[5]</sup>、直流组网技术<sup>[6]</sup>等船舶结构的改进研究来看,混合动力船舶较之以往出现了新的特点,对研究涉及的能量管理的最新成果予以综述有其必要性。

现有文献关于混合动力船舶能量管理的研究综述大多针对的是能量管理策略,而忽视了能量管理优化目标的分类及其对比分析。不仅如此,对于能量管理策略的优缺点、应用场景及其解决方法等问题的论述也不够深入和全面。因此,本文将从能量管理目标、能量管理策略这2个方面,阐述混合动力船舶能量管理的最新研究进展及研究现状,深入分析已有相关研究存在的优缺点及其应用条件,在此基础上,展望混合动力船舶能量管理的未来研究方向。

## 1 能量管理目标

混合动力船舶能量管理是一个综合且复杂的问题,涵盖了电能、化学能及机械能等多种形式的能量变换与控制。因此,提高混合动力船舶在安全、稳定运行方面的可靠性,并基于此探索更优的经济性、环保性目标,成为了现有混合动力船舶能量管理的研究重点。运行可靠性目标(例如电能质量、故障恢复等)、经济性目标(例如能耗、电池荷电状态(state of charge, SOC)、系统经济成本等)、环保性目标(例如排放)在被纳入到现有能量管理目标之中后,将面临多目标能量管理的综合优化问题,故有必要对不同能量管理目标的研究现状及其进展进行归纳总结。

### 1.1 以考虑电能质量为主的能量管理目标

随着船舶电力电子设备的增多,非线性电力

负荷对混合动力船舶的电能质量造成了严重影响,尤其是高能武器、雷达等脉冲负荷,呈现出了明显的周期脉冲性瞬态特性,若不能快速充电,这些脉冲负荷启动时会在几个周期内对母线电压带来剧烈冲击<sup>[7]</sup>。可见,其特殊的能量需求和运行特性将给船舶电力系统的安全、稳定运行构成新的挑战。为了消除脉冲负荷对船舶电力系统稳定运行的冲击,现有研究多通过结合运用诸如蓄电池、超级电容、飞轮等储能设备,以能量管理的方式来消除脉冲负荷带来的有功和无功率冲击。

例如,为确保船舶电力系统在脉冲负荷冲击下可靠工作,Stone等<sup>[8]</sup>对含有蓄电池的船舶混合动力系统进行能量管理,实现了船舶各动力源与负荷之间的协调控制,仿真结果表明,所提能量管理策略在脉冲负荷下能够使动力系统的输出保持稳定,减少主机输出功率的高频波动,缩小动力系统提供的推进功率与参考值的偏离。有别于文献[8],Lashway等<sup>[9]</sup>将高功率密度的超级电容与高能量密度的蓄电池混合运用,以用于多脉冲负荷储能,解决了以往只能实现单脉冲储能的限制,使之满足负荷的瞬时脉动性能。不仅如此,Kuznetsov<sup>[10]</sup>将飞轮储能与蓄电池储能相结合,以保证600 kW~30 MW脉冲负荷的可靠运行,并通过舰载机起飞脉冲负荷的仿真算例,验证了所提能量管理策略的可行性及有效性。

对于混合动力船舶而言,不仅以脉冲负荷为代表的非线性负荷会影响到电能质量,而且以光伏和燃料电池为代表的新能源发电装置所具有的间歇性及随机性也会直接影响到船舶整体的电能质量<sup>[11]</sup>。其原因在于,首先,太阳能通过光伏逆变器等电力电子器件可以实现能量的快速转换与利用,但受天气影响,其转换输出的电能具有明显的间歇性、波动性和不确定性;其次,燃料电池虽然具有清洁能源、转换效率高和电能输出稳定等优点,但仍存在启动过程缓慢和输出特性偏软等缺点。

为此,张泽辉等<sup>[12]</sup>采用蓄电池-超级电容混合储能系统,通过燃料电池承担需求功率的稳定部分,超级电容承担需求功率波动的高频部分,而蓄电池承担需求功率波动的低频部分,以此来提高船舶电能质量。

综上所述,为提高船舶电能质量,应对以脉冲负荷为代表的非线性负荷、新能源装置接入带来的随机性干扰,依靠能量型、功率型2种类型储能装置的互补特性构成的混合储能系统进行能量管理,这样,可以针对脉冲负荷进行有效的高功

率、短时间尺度跟随控制,并协调脉冲负荷连续发射、电力推进负荷调整等低功率、长时间尺度的能量需求,实现混合动力船舶电力系统的安全、稳定和可靠运行。

## 1.2 以考虑故障恢复为主的能量管理目标

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。其所带来的后果是:轻则船体受损,导致推进系统、电力系统、武器系统、电子系统等受到损害;重则使舰船完全丧失战斗力甚至倾覆、沉没。一旦船舶电力系统的某个电力设备出现故障,尤其是电磁炮、电磁弹射装置等大容量脉冲功率武器和设备受到影响,势必会对全舰电力系统构成极大的挑战<sup>[13]</sup>。为保证混合动力船舶电力系统在发生故障时能够快速恢复,确保重要负载的供电连续性,提高受损情况下舰船的生命力与战斗力,现有研究通常采用网络重构方法重新分配能量流动,并采用备用能量管理策略来快速恢复能量供应<sup>[14]</sup>。

例如, Davey 等<sup>[15]</sup>指出网络重构的首要任务是快速完成潮流的重新分配,并且不会损害船舶电力系统的稳定性及对重要负载供电的可靠性。为此,建立了以满足关键负载的功率需求和最小化网络损耗为目标的能量管理方案,其中,采用权重方式对不同负载供电的重要程度进行衡量。Srivastava 等<sup>[16]</sup>采用基于专家系统的自动重构方法,分析舰船电力系统受创后的恢复问题,并结合电力系统的实时数据和拓扑信息对受损后的电力系统能量进行合理分配,以保证关键负载的工作。值得指出的是,不同于陆地微电网,船舶微电网发生故障时没有外部电力支撑,若采取集中式电力恢复策略会导致单点故障,而基于多主体法的分布式能量管理策略对系统中的坏点进行隔离并重构系统,能够有效保证电力系统受损后电力供应的自动快速恢复<sup>[17]</sup>。

## 1.3 以考虑能耗为主的能量管理目标

由于化石燃料的广泛使用,混合动力船舶的柴油发电机能耗一直是主要关注的问题之一,柴油发电机能耗通常包括稳态发电能耗和发电机启停能耗这2个部分。稳态发电能耗与发电机的工作时间、发电功率以及燃料消耗率有关,其中燃料消耗率是发电功率和发电机转速的函数。而启停能耗一般视为常数,其值取决于发电机的启停状态,但只有部分研究考虑到了启停能耗<sup>[18]</sup>。无论是串联、并联或者是混联的混合动力结构,都是通过使柴油发电机工作在最优点来降低柴油发

电机的能耗,即通过超级电容、蓄电池等储能装置改变发电功率,或者借助直流并网技术<sup>[6]</sup>使发电机转速可调,来提高柴油发电机效率。此外,风机、光伏等新能源发电装置的接入,为降低混合动力船舶能耗提供了新的途径。值得指出的是,风能、太阳能几乎零运行成本的特点虽然可以有效降低船舶能耗,但现有研究多侧重于其所带来的能耗、排放的降低<sup>[3,19-25]</sup>,而较少考虑到风机、光伏发电装置安装带来船舶重量、阻力的增加<sup>[26-27]</sup>,进而导致能耗的提升。在以考虑能耗为主的能量管理目标处理方面,目前,有一部分研究,为了使能耗全局最小,只将柴油发电机能耗作为优化目标,使其最小化以获得相应的柴油发电机和蓄电池的全局最优输出功率序列<sup>[28-30]</sup>,但该能量管理问题在求解时需遍历整个变量空间,难以实时应用。而另一部分研究,为了使后续求解过程更加快速,通过引入等效油耗,将考虑能耗的能量管理问题表述为柴油发电机的油耗与船舶蓄电池等效油耗之和,在需求功率给定的情况下,使等效油耗最小,以获得柴油发电机和蓄电池的瞬时最优输出功率序列<sup>[31-33]</sup>,但瞬时最优并不等同于全局最优,其优化性能仍然有很大的提升空间。

## 1.4 以考虑排放为主的能量管理目标

随着船舶能效设计指数(EEDI)和船舶能效运营指数(energy efficiency operational indicator, EEOI)的推广与应用,船舶减排问题逐渐受到重视。尤其是针对 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 等污染气体的减排,一般以温室气体(greenhouse gas, GHG)的排放指数来衡量<sup>[34]</sup>,所以可将其纳入能量管理目标来考虑排放的影响。IMO 规定 EEDI 和 EEOI 是用于定义船舶寿命期内 GHG 排放的2个关键指数,但 EEDI 的缺点是只考虑了船舶设计时的 GHG 排放,造成其无法准确计算船舶全寿命内的 GHG 排放量,使得 EEOI 在混合动力船舶能量管理中的应用更加广泛。EEOI 为单位货物周转量所产生的 GHG 排放量,其与燃料类型、消耗燃料质量、燃料与排放转换系数、货物吨数以及航行距离有关<sup>[35]</sup>。由于涓滴效应,在减少能耗的同时,相应的排放也会减少,二者呈一定的比例关系,其换算关系可见 IMO 的相关标准<sup>[35]</sup>,因此在船舶领域,将排放作为一项优化目标来直接考虑的文献较少<sup>[29-30]</sup>,多是通过减少能耗来间接减少排放<sup>[36-38]</sup>。但是,将能耗和排放同时纳入能量管理问题来综合考虑二者的影响,相较于只考虑能耗进而间接减少排放而言,可获得较为折衷的结果,甚至可以在牺牲部分节能的基础上,获得减排的巨大提

升<sup>[30]</sup>。此外,由于部分国家和地区对途经或者停靠的船舶排放要求较为严格,甚至要求零排放。因此,混合动力船舶应以零排放为能量管理目标,这也表明了混合动力船舶在航行时需要根据途经区域排放要求实时调整排放目标,而太阳能、燃料电池等清洁能源的应用,同时为混合动力船舶降低排放、应对实时变化的排放要求提供了新的途径。

### 1.5 以考虑 SOC 为主的能量管理目标

蓄电池、超级电容等设备作为重要的储能装置,在混合动力船舶中起到了调节发电机运行工作点、改善燃料电池输出特性、为脉冲负荷供能等的作用,其 SOC 是用于衡量储能装置状态的重要状态变量,通常作为能量管理目标,以提高储能装置的性能。

例如,兰熙等<sup>[32]</sup>通过建立 SOC 补偿函数来考虑动力电池的 SOC,将补偿函数纳入优化目标中,转化为成本函数的加权项,使动力电池的 SOC 始终维持在参考值附近。但是,函数加权项的大小不仅会影响 SOC 的变化幅度和频率,甚至还会影响能量管理的优化效果,为此,有必要对取值作进一步的研究。而为了防止电池因过充和过放导致容量及寿命的急剧衰减,还有必要建立电池 SOC 的不等式约束,并在约束基础上定义可行状态,以削减变量空间,加快能量管理问题的求解速度。对于初始 SOC 与最终 SOC 存在差值的情况,刘乐等<sup>[39]</sup>通过将蓄电池 SOC 差值折算成能耗,消除了蓄电池 SOC 差值的影响。通过电池 SOC 补偿函数<sup>[32]</sup>可有效抑制 SOC 的波动,一定程度上可延长蓄电池的使用寿命。与此不同的是,Zhang 等<sup>[33]</sup>专门采用燃料电池的寿命衰减模型,将燃料电池寿命作为优化目标之一,通过减小其输出功率波动,极大地延长了其使用寿命。

### 1.6 以考虑系统经济成本为主的能量管理目标

通过考虑混合动力船舶系统的经济成本来确定设备选型及容量配置,有助于降低包括运营成本和投资成本在内的成本。其中,运营成本主要由设备运行成本及其它运行成本(例如燃料、维护、启停等)组成,其一般是根据产生的功率、运行时间、运行设备数量和容量来估算;而投资成本则由混合动力系统的储能装置、发电机组等设备的安装成本、安装尺寸、容量和寿命所决定。但是,目前的大多数研究方法都是简单地采用运营和投资成本的总和来进行评估,虽然可有效地

评估混合动力船舶的经济成本,但是考虑到不同类型储能设备在存储期内单位能量成本不尽相同<sup>[40]</sup>,在长时间尺度范围内,还需要考虑设备使用寿命期间所有一次性和经常性成本总和的生命周期成本<sup>[41]</sup>。

值得指出的是,系统经济成本还受船舶混合动力系统结构的影响,其结构主要分为3种:第1种是串联式,即发动机与螺旋桨轴之间未使用机械连接,发电机和电池组可分别向电动机供电;第2种是并联式,即保留发动机与螺旋桨轴之间的机械连接,发动机和电动机均可提供动力;第3种是混联式,即融合了串联和并联的特点,具备发动机推进和电动机推进模式,电网由专门的发电机组为其供电<sup>[42]</sup>。上述3种船舶混合动力系统结构中,串联式和并联式结构较简单、成本较低。其中,并联式混合动力系统既可在新船建造时安装,也可由船舶传统动力系统改装而成,以此来降低投资成本,而混联式混合动力系统结构复杂、成本较高。

综上所述,混合动力船舶能量管理是一个涵盖了运行可靠性(电能质量、故障恢复)以及经济性(能耗、电池 SOC、系统经济成本)、环保性(排放)目标的多目标问题,选择什么样的管理目标与所适用的场景需求有关。因此,未来在混合动力船舶能量管理目标方面应重点研究:

1) 能量管理目标选取。尽管现有能量管理目标已经覆盖了运行可靠性、经济性和环保性目标,但仍不够全面。例如,针对船舶航速或者船用光伏系统开展能量管理时其所带来能耗、电能质量、排放等目标性能的改变,现有研究很少考虑到多个目标性能改变对用户满意度的影响,因此未来还应继续探索更多适应场景需求的能量管理目标。

2) 能量管理多目标权重处理。首先,混合动力船舶能量管理需要配合船舶任务需求进行多目标实时权重的调整,不同于陆地微电网能量管理在单一时间断面上的多目标寻优,混合动力船舶的多目标能量管理应能够不断变换目标权重,实现各种运行模式的切换,保证在频繁切换运行模式下系统的运行稳定。其次,多目标能量管理问题通过加权转换为单一目标能量管理问题来处理时,有一种可靠方案是通过层次分析法、熵权法等赋权方法进一步研究权重的选择,或者通过多目标算法处理,以得到非劣解集,然后再采用模糊隶属度函数、逼近理想解等择优方法选取适当的最终方案。

## 2 能量管理策略

在有针对性地提出了考虑能耗、排放等单一目标或者多目标的能量管理问题后,关键是采用合适的能量管理策略对其进行求解,以满足快速性和优化性要求。图1所示为混合动力船舶能量管理策略的2个分类,包括基于工程或者实际经验的规则型和基于不同优化目标的优化型。

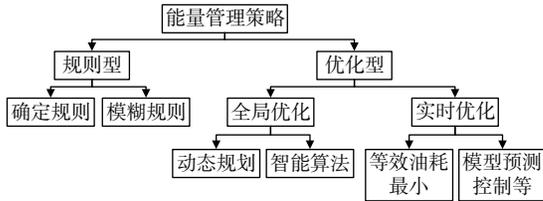


图1 混合动力船舶能量管理策略

Fig. 1 Energy management strategy of hybrid ships

### 2.1 规则型能量管理策略

规则型能量管理策略是根据需求功率、转矩和电池 SOC 及其工作效率 Map 图对柴油发电机的工作状态进行模式分类,基于制定的相应规则进行切换。此能量管理策略易实现,实时应用性好,是最先用于混合动力船舶能量管理的策略。该管理策略又可分为基于确定规则和基于模糊规则的能量管理策略。

#### 2.1.1 基于确定规则的能量管理策略

基于确定规则的能量管理策略是根据船舶的需求功率、电池 SOC 或者其效率 Map 图,以及结合工程经验或者离线优化策略,来划分推进电机、柴油发电机的工作状态,并制定规则予以控制。

在上述研究方面,高迪驹等<sup>[36]</sup>提出了一种基于确定规则的 AC/DC 变换器和双向 DC/DC 变换器的协同控制方法,并成功应用于混合动力船舶的能量管理。应用后,每年可节省约 29.2% 的油耗、6 万多元的费用、约 29.5% 的排放。与只有柴油发电机作为动力源的船舶相比,加装动力电池的混合动力船舶应用上述能量管理策略后,可在 5 年左右收回加装动力电池所增加的成本。

此外,袁裕鹏等<sup>[37]</sup>针对柴油发电机单独为船舶供电时效率不高的缺点,采用柴油发电机与燃料电池组成的混合动力系统,由柴油发电机负责船舶的基本负载需求,通过设计的逻辑门限控制策略,使柴油机发电机长时间运行在额定工况,达到优化发动机的性能和实现节能减排的目的。不仅如此,其设计的 PID 控制器还能够使电网的输出功率很好地跟踪船舶的电力需求变化。然而,上述策略也有不足之处,即燃料电池的动态

响应速度慢,且不能很好地跟踪负荷波动,使得负荷需求波动很大时会损害燃料电池,降低燃料电池的使用寿命。而采用能量存储系统可有效缓冲功率波动,提高整体系统的动态性能。为此,张泽辉等<sup>[12]</sup>采用蓄电池-超级电容的混合储能系统,通过实时小波变换来对需求功率进行分频处理,让燃料电池承担需求功率的稳定部分,超级电容承担需求功率波动的高频部分,而蓄电池承担需求功率波动的低频部分,运用上述方法可有效延长混合动力船舶的燃料电池使用寿命。

综上所述,基于确定规则的能量管理策略都是依靠工程经验来建立确定规则,其特点是主观性强、优化性能较差。虽然利用全局优化结果并通过强化学习等人工智能方法离线提取规则可有效提高优化性能<sup>[43]</sup>,但通常计算量巨大,实时性能不佳。鉴于此策略作为最基本的能量管理策略,其逻辑简单、计算量小,在早期的混合动力船舶能量管理研究及实际应用中得到了广泛推广,且适合应用于低电气化、低智能化的船舶。另外,该策略还在后续能量管理策略研究中被广泛作为对比能量管理策略<sup>[32,44-45]</sup>,提供了优化评价标准。然而,此能量管理策略虽然简单有效,计算量小,但确定规则难以适应实际的混合动力船舶系统所具有的多变量、非线性和时变的特点。因此,相比于确定规则,模糊规则更具有优势。

#### 2.1.2 基于模糊规则的能量管理策略

基于模糊规则的能量管理策略是根据工程经验来制定模糊规则,通过建立状态变量的隶属度函数和制定模糊控制规则来分配能量。评价混合动力船舶能量管理策略的优劣,其所涉及的是一个包括能耗、排放、电池使用寿命等多个指标的综合系统,不仅复杂,且难以定量描述。

为此,Beşikçi 等<sup>[46]</sup>提出基于模糊规则的层次分析法,根据 20 名船舶领域专家的问卷调查结果,提出了包括航行性能、动力维持性能、燃料管理能力、船舶系统管理在内的 6 大指标和 9 个小指标的模糊评价矩阵,并分析这些指标之间的关系。结果表明,航行性能、动力维持性能和船舶系统管理这 3 大指标的重要性最高,而 9 个小指标中最重要的是速度优化指标。此结果可以为后续混合动力船舶能量管理的优化方向提供指导。

Zhu 等<sup>[47]</sup>基于模糊规则,将燃料电池-超级电容-蓄电池混合动力船舶作为研究对象,以蓄电池及超级电容的 SOC 和推进电机所需功率为输入量,以及蓄电池所需功率和超级电容所需功率为输出量,根据船舶在加速航行、匀速巡航、低速航行等不同工况下所需功率,参考蓄电池及超级电容的

SOC 制定混合动力船舶能量管理策略,并以德国 Alster-Touristik 公司研发的 Alsterwasser 号燃料电池驱动游船的工况为仿真算例。仿真结果显示,该能量管理策略能够有效提高船舶的运行效率和混合动力系统的性能,且使储能系统的 SOC 维持在合理水平上。而肖能齐等<sup>[48]</sup>以某船舶四机双桨混合动力推进系统为研究对象,提取船舶的 4 种单机模式、6 种 PTI(power-take-in)模式和 2 种并车模式的运行工况特点,以此为基础,提出基于航行工况模糊模式识别模型的能量管理策略。通过算例验证了该能量管理策略能够有效识别航行工况,通过切换离合器状态指令,该策略可有效降低船舶能耗和排放。

综上所述,基于模糊规则的能量管理策略只是在确定规则的基础上进行改进,作为基本能量管理策略,其同样适用于低电气化、低智能化船舶,且还可作为其它能量管理策略的评价标准<sup>[51]</sup>。虽然基于模糊规则的能量管理策略无需建立精确的数学模型,鲁棒性强,实时性好,广泛应用于复杂非线性控制系统,但其规则的制定依旧依赖于工程经验,主观性强,控制性能较差,因而有着极大的局限性。

## 2.2 优化型能量管理策略

针对规则型能量管理策略在规则制定上的劣势,为了获得更佳优化效果,目前相关研究更多地关注优化型能量管理策略。该策略通过定义代价函数及其约束条件,使代价函数最小,以此获得相应的能量管理策略,并被分为两种策略——全局优化策略和实时优化策略。相比于规则型能量管理策略,优化型能量管理策略除了优化效果更佳外,还可通过定义成本函数来综合考虑多目标优化。目前,相关研究考虑了包括能耗、排放、SOC、容量配置、电池使用寿命等多个目标。

### 2.2.1 全局优化的能量管理策略

针对规则型能量管理策略优化性能较差的缺点,全局优化能量管理策略在已知历史工况(即需求功率序列已知)的情况下,将系统连续控制变量离散化为有限个状态值,进而将能量管理问题转换为类似于图论中的旅行商问题(travelling salesman problem, TSP),并于线下通过优化算法求得全局最优控制策略。目前的优化算法主要有动态规划(dynamic programming, DP)、智能优化算法等。

DP 算法作为一种多阶段决策问题的经典优化方法,根据最优决策的任何截断仍是最优的最优性原理,将多阶段决策过程转化为多个单一阶

段决策问题,并逐一求解得到最优控制策略<sup>[52]</sup>。

例如,兰熙等<sup>[52]</sup>将 DP 算法与系统切换理论结合建立了船舶的 5 种基本工作模式,根据贝尔曼最优性原理求解得到了使船舶油耗最小的柴油发电机和动力电池的最优控制序列。不同于枚举法列举出所有可能的决策空间,DP 算法能够系统地评估多步问题中可能的决策数量,并最大限度地降低计算成本,但 DP 算法需要已知历史工况与计算复杂度高的特点决定了其无法得到实时应用。为了使历史工况得到充分利用的同时降低计算复杂度,Tjandra 等<sup>[49]</sup>将优化问题分为 3 个阶段,并使用 DP 算法处理前 2 个阶段。相比于常规 DP 算法,随机动态规划(stochastic dynamic programming, SDP)算法基于马尔可夫链模型从历史工况中提取状态转移矩阵,建立基于期望最优的能量管理问题并使用 DP 算法进行求解,从而极大地降低了计算复杂度。上述方法目前在混合动力汽车和陆地微电网领域中的应用较多<sup>[50-51]</sup>。值得指出的是,尽管 DP 算法可以处理复杂的能量管理问题,但计算极为耗时,无法处理其中可能存在的耦合约束情况。

智能优化算法与 DP 算法相同,都是通过遍历整个空间来获得全局最优解。后者所需的计算量大、存储量大等特点限制了其的应用,而前者由于擅长处理复杂非线性问题,逐渐引起了学者们更多的关注。目前,应用于混合动力船舶领域的智能优化算法主要有遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法等。

其中,GA 算法是一种基于自然选择和自然遗传学机制的搜索算法,与其它基于梯度的智能优化算法相比,GA 算法在解决复杂的非线性优化问题和多维空间寻优方面具有优势<sup>[52]</sup>,因此在混合动力船舶能量管理领域得到了广泛应用。为了解决混合动力船舶多目标能量管理问题,Zhang 等<sup>[30]</sup>以深水三用工作船(anchor handling towing supply vessel, AHTS)为研究对象,提出了一种基于非支配排序遗传算法(non dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II)的混合动力船舶能量管理策略。该策略首先将优化问题解耦成优化子问题,并求得相应的有效运行方案;然后,缩小搜索域,采用 NSGA-II 算法求得以能耗、排放为目标的帕累托边界;最后,通过删除重复解,采用模糊决策方法及根据船舶的 4 种运行状态得到最终最优解。NSGA-II 算法还在包含诸如储能装置容量、机械损失等其它目标的混合动力船舶多目标能量管理问题中得到了应用<sup>[49,53-54]</sup>。

为了提高 NSGA-II 算法在保持种群多样性方面的局部优化性能,郑夏等<sup>[55]</sup>采用了一种改进的 NSGA-II 算法,其针对常规 NSGA-II 算法的个体分布不均、计算效率低等问题,利用具有自适应参数的差分进化思想,对群体、初始群体的多样性分布进行了改进,并通过融入非线性优化策略,提高了局部搜索能力。但是,GA 算法存在局部搜索能力差、未成熟收敛和随机游走等现象,导致该算法收敛性能差,需要很长时间才能找到最优解。因此,目前研究的重点是如何改善 GA 算法的搜索能力及提高算法收敛速度,使其更好地应用于解决实际问题。

PSO 算法是基于群体的演化算法,其思想源于人工生命和演化计算理论,PSO 算法具有极强的随机性和较低的计算复杂度<sup>[56]</sup>,而 GA 算法收敛速度较为缓慢,在大多数案例中,PSO 算法与 GA 算法相比可以实现更快的收敛。因此,PSO 算法被广泛应用于解决混合动力船舶的能量管理问题,而常规 PSO 算法的参数不符合实际的混合动力船舶能量管理动态系统。鉴此,Tang 等<sup>[57]</sup>提出了一种自适应多元协同进化动态粒子群优化(adaptive multi-context cooperatively co-evolving particle swarm optimization, AM-CCPSO)算法,用于求解含光-柴-储-岸电的混合动力船舶最优功率分配问题。该算法以船舶电力费用最低为目标,通过将约束转换后纳入惩罚函数,使带约束的最优功率分配问题转换为不带约束的最优功率分配问题,使得该功率分配问题得到了有效求解。仿真结果显示,无论船舶是处于航行状态还是处于停泊状态,该算法均能有效降低电力费用且控制鲁棒性强。此外,虽然 PSO 算法的收敛速度快,但也存在精度较低、易发散等缺点。如果加速系数、最大速度等参数太大,粒子群可能错过最优解,导致算法不收敛;而在收敛情况下,由于所有粒子都向最优解方向飞去,使得后期收敛速度明显变慢,当算法收敛到一定精度时,则无法继续优化<sup>[56]</sup>。为此,Kanellos 等<sup>[58]</sup>提出用模糊控制器来动态自适应地改变 PSO 算法的相应参数,以提高计算效率,解决以能耗与排放为优化目标的能量管理问题。该方法不仅能够满足船舶技术和运行约束,而且还可以显著降低所需的计算量和计算空间。

常规 PSO 算法一般采用固定学习系数或者采用从大到小的线性迭代系数,不能较好地平衡全局最优和局部最优,且迭代速度较慢;为了解决上述问题,印波等<sup>[59]</sup>采用非线性学习系数(即初始权值较大),随着迭代次数的增加,其值将迅速

减小,从而可提高算法的收敛性能和计算速度。

综上所述,全局优化的能量管理策略虽然可以获得全局最优的控制策略,能够为混合动力船舶的设计、规模确定、航行调度,以及在已知历史工况下进行能量管理提供指导和评价标准,但是计算量大、需要已知历史工况等特点决定了其很难得到实时应用。

### 2.2.2 实时优化的能量管理策略

实时优化的能量管理策略无需知道历史工况,其根据柴油发电机等船舶部件的最佳工作曲线,在考虑最新工况信息的情况下对过程操作条件进行连续评估和操作,通过优化算法实时求得各部件当前时刻的最优工作点,实现最小化期望成本。该策略的计算量小且易于实现,实时性好。目前,优化算法主要有等效油耗最小化(equivalent consumption minimization strategy, ECMS)、模型预测控制(model predictive control, MPC)和庞特里亚金最小值原理(Pontryagin's minimum principle, PMP)等策略。

ECMS 是目前应用较广泛的混合动力船舶实时优化能量管理策略,其能够实现接近 DP 算法的全局最优解<sup>[60]</sup>,最早应用于混合动力汽车领域,后期逐步应用到了混合动力船舶领域。ECMS 基于蓄电池等储能装置的 SOC 及柴油发电机工作状态计算等效系数,将储能装置电功率换算为等效油耗,并使储能装置的等效油耗与柴油发电机实际油耗之和最小,从而获得相应的控制策略。在燃料电池混合动力船舶中,等效油耗也被类比为等效氢耗。

虽然 ECMS 已经能够取得较好的优化性能,但仍然不是全局最优解,在常规 ECMS 的基础上,研究人员从等效系数自适应及结合其它算法实现复合控制这 2 个方面进行了探索。在早期研究中,储能装置充放电等效系数一般取为常数<sup>[61-62]</sup>,虽可简化计算、减少计算复杂度且有利于实时应用,但因不符合实际情况导致优化性能不佳。为此,Zhu 等<sup>[63]</sup>提出了改进的自适应等效油耗最小化(modified adaptive equivalent consumption minimization strategy, MAECMS)策略,其在 ECMS 的基础上根据当前或者预测信息在线识别参数来确定等效系数,通过延长优化时间步长和建立约束消除不可行状态来减少计算量。

为了使不同实时能量管理策略在应对某个具体评价标准时表现各有优劣的情况下,得到使综合效益最大的能量管理策略,Bassam 等<sup>[62]</sup>提出一种综合能量管理策略,其考虑了 4 种策略,即包括基于船舶运动状态的能量管理策略、基于 ECMS

的能量管理策略、基于比例积分的能量管理策略、基于电量消耗与电量维持的能量管理策略。该综合能量管理策略根据船舶实时运行状态、评价标准来选择最优的能量管理策略,并以 Alsterwasser 号燃料电池驱动的游船工况为对象进行了仿真分析。仿真结果表明,该综合策略相比于基础能量管理策略,最多能分别降低 8% 的能耗、16.70% 的氢消耗。此外,在初始运行成本几乎相同的情况下,所提策略随着氢燃料价格的上升,将会比基础能量管理策略获得更低的运行成本,且切换策略不会使燃料电池和蓄电池系统承受更多的运行压力。

然而,无论是常规/自适应 ECMS,还是结合其它算法实现复合控制的 ECMS,负荷预测精度提高将有利于优化性能提高,而负荷预测精度提高又与实时应用性冲突,如何平衡优化性能和实时应用性是未来 ECMS 的研究重点。

ECMS 虽然实时应用性好,但优化性能有限和控制鲁棒性弱的特点限制了其的应用,而 MPC 弥补了该缺点,即通过模型预测、滚动优化和反馈校正进行优化,而优化性能取决于模型质量、采样步长和预测范围长度。在此方面,现有的研究主要从参数自适应、求解子问题算法以及预测算法这 3 个方面开展了研究。

为了消除 MPC 中参数不确定性的影响,Hou 等<sup>[64]</sup>针对船舶混合储能系统提出了自适应模型预测控制(adaptive model predictive control, AMPC)策略。AMPC 策略是在 MPC 的基础上在线识别参数,与不采用在线识别参数的 MPC 相比,其可以使混合储能系统降低 15% 的功率损失,有效降低船舶能耗,且具有更佳的动态响应。然而,为了解决 MPC 中各个步骤的子问题,需要采取适当的方法来实现优化结果的快速收敛和最优性,目前采用的求解方法主要有 DP<sup>[31]</sup>、PSO<sup>[65]</sup>及二次规划(quadratic programming, QP)<sup>[66-68]</sup>等。值得指出的是,由于 MPC 求解的大多数优化问题都是以二次形式建立的,因此 QP 是最常用的方法。而 Park 等<sup>[68]</sup>提出的基于积分扰动分析结合基于梯度的序贯二次规划(sequential quadratic

programming, SQP)方法为每个 MPC 方法的采样时刻提供了最优解。

除了传统的 MPC,与更先进的预测算法结合的 MPC 可以实现更加精确的负荷预测。例如,Zohrabi 等<sup>[69]</sup>为有效处理不确定的脉冲负荷,将滑动平均模型(moving average, MA)应用于不确定的脉冲负荷预测,极大改善了高功率脉冲负荷下的系统整体性能。相较于 ECMS, MPC 通过模型预测、滚动优化和反馈校正等步骤很好地平衡了策略优化性能与实时应用性之间的关系,使之适用于高动态船舶混合动力系统,但如何在保持 MPC 实时应用性的同时提高优化性能,这仍然是未来 MPC 的研究重点。PMP 策略虽然在理论上可以将全局优化问题转换成实时局部优化问题来得到实时应用,但由于哈密顿函数中的控制变量需要遍历变量空间,实际上很难实现上述应用。目前,PMP 的相关研究大多数集中于混合动力汽车,在船舶领域缺乏相关研究<sup>[42]</sup>。

综上所述,现有的混合动力船舶能量管理策略的优缺点如表 1 所示。规则型能量管理策略中,无论是基于确定规则策略,还是在处理多变量、非线性和时变的实际混合动力船舶系统方面更优的模糊规则策略,都存在优化性能较差的缺点,但是,鉴于其控制逻辑简单、计算量小及实时应用性好等优点,使其在早期混合动力船舶能量管理研究和实际应用中得到广泛推广(适用于低电气化、低智能化混合动力船舶),并在后续研究中普遍作为对比能量管理策略。为了解决规则型能量管理策略优化性能较差的缺点,后续相关研究更加侧重于优化型能量管理策略。其中,全局优化能量管理策略凭借其控制策略全局最优性,在混合动力船舶设计、规模确定、指导和评价其它能量管理策略的优化性能等方面得到广泛应用,但计算量大、需要已知历史工况等特点决定了其很难得到实时应用。而实时优化能量管理策略可以实现实时优化,在实际应用中得到广泛推广,但是其瞬时最优并不等于全局最优,如何在保证实时应用性的同时,获得比现有实时能量管理策略更佳的优化性能是亟待解决的关键问题。

表 1 混合动力船舶能量管理策略的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of energy management strategy for hybrid ships

| 能量管理策略 | 优点               | 缺点                   |
|--------|------------------|----------------------|
| 确定规则   | 简单有效,实时性好        | 依赖工程经验,难以适应实际非线性时变系统 |
| 模糊规则   | 计算量小,适应实际非线性时变系统 | 依赖工程经验,主观性强,控制性能较差   |
| 全局优化   | 全局最优             | 需要提前知道历史工况,难以实时应用    |
| 实时优化   | 实时性好,优化性好        | 不是全局最优               |

### 3 能量管理发展展望

结合上述混合动力船舶能量管理存在的问题与挑战,考虑到今后的发展与努力方向,对未来混合动力船舶能量管理发展进行了展望。

#### 3.1 标准统一

研究混合动力船舶能量管理时,首先需要确定船舶混合动力系统研究对象的具体构成,但目前国内尚无针对此问题的专门规范,设计时主要参考柴油机机械推进、电力推进等相关规范要求<sup>[70]</sup>,导致缺乏统一的船舶混合动力系统仿真模型,这种缺乏统一标准的情况还重点体现在仿真验证工况方面。在混合动力汽车领域,研究人员广泛采用诸如美国 FTP75<sup>[71]</sup>、日本 JC08<sup>[72]</sup> 及欧洲 EUDC<sup>[73]</sup> 等标准工况来仿真验证所提出的能量管理策略。而在混合动力船舶能量管理领域,除了 Alsterwasser 号燃料电池驱动游船的工况数据被广泛用于验证以燃料电池混合动力船舶为对象的能量管理策略以外<sup>[33,46,62,74-75]</sup>,对于其它混合动力船舶,由于船舶用途各异,运行工况完全不同,因此目前在混合动力船舶能量管理领域仍无类似于汽车领域的标准工况。鉴此,现有文献倾向于使用通过函数生成的工况数据和混合动力船舶的实测或者模拟工况数据。

例如,文献 [36] 采用函数生成的混合动力船舶工况数据,其分为 2 种类型:一是需求功率变化较大的工况数据;二是需求功率变化相对平稳的工况数据。这 2 种工况的需求功率曲线变化趋势差异较大。相对于通过实测或者模拟产生的混合动力船舶工况数据,通过函数生成的工况数据更具可控性,可以根据需要来生成相应波形的需求功率曲线。而文献 [76-77] 采用的是通过实测或者模拟产生的混合动力船舶工况数据,它们所处的功率等级相近,功率变化趋势相似,但并不相同,存在差异性。因此,若能够统一工况数据,形成标准工况,不仅可以减少生成工况数据的工作量,还可以使结果更具有可比性。

鉴于混合动力船舶能量管理研究缺乏统一标准的仿真模型和仿真验证工况,以及目前研究中简化后的仿真模型和拓扑结构难以适用于实际复杂系统的问题<sup>[13]</sup>,未来有必要对独立运行的电力系统中发电机和电动机负荷的精细建模问题进行研究,采用更加贴近实际的拓扑结构,并从混合动力船舶能量管理文献中筛选出典型工况作为后续相关研究的统一标准工况。

#### 3.2 结构改善

1) 对于新能源在混合动力船舶上的应用,以集成应用风能、太阳能和燃料电池等新能源发电装置的应用案例最具有革新性和代表性<sup>[11]</sup>,并能有效进行节能减排,提高船舶续航能力。其中,风能在船舶上的应用以风帆助航的方式将风能作为船舶动力和推动风机发电这 2 种形式为主,且是作为航行的主要动力或者辅助动力。而风力发电技术由于噪声大、风向与风力多变等装船适配性问题,只是研究了少数船舶并得到了应用<sup>[19-20,26-27]</sup>。相较于风力发电技术,太阳能发电和燃料电池技术在混合动力船舶中得到更为广泛的研究与应用<sup>[19-25,43-44]</sup>,但风机、光伏等新能源发电装置发电功率的不确定性也给混合动力船舶能量管理带来了极大的挑战。同时,因燃料电池技术所限,目前的船舶燃料电池功率一般不超过 300 kW<sup>[4]</sup>,风能、太阳能等新能源都是低能量密度,单一的新能源作用有限,所以必须实现各种新能源的混合利用<sup>[78]</sup>。此外,还可以与柴油发电机共同供电,进一步扩大新能源比例和降低船舶能耗。在新能源应用方面,今后有必要考虑新能源发电装置装船的适配性、新能源发电功率的不确定性、多种新能源的混合互补利用等混合动力船舶能量管理问题。

2) 不同于混合动力汽车在城市内运行时瞬时工况多、加速与制动频繁的情况,混合动力船舶航行中制动情况较少,但在靠岸阶段需要频繁加速与制动来调整姿态,通过制动电阻消耗全部制动能量,从而造成能量浪费<sup>[79]</sup>。同时,能量浪费情况还存在于燃料电池、发电机组等产生的余热中<sup>[80]</sup>。因此,未来有必要在能量管理研究中考虑再生制动、余热回收等能量回收系统,这将有利于提高混合动力船舶的燃料经济性和排放性。

3) 混合动力船舶能量管理的性能与船舶本身的动力总成、参数匹配相关。根据不同能量管理目标,未来有必要考虑对包括推进电机、发电机组、储能装置等混合动力船舶动力总成的规格与参数进行匹配与优化,这样可进一步提升整体效率,优化能量管理性能。

#### 3.3 工况预测

基于混合动力船舶能量管理策略的归纳分析,可知全局优化能量管理策略依赖于历史工况或者长期工况的预测精度,而实时优化能量管理策略中,无论是 ECMS 还是 MPC,两者的性能在很大程度上都取决于当前瞬时工况或者短期工况

的预测精度。上述两种能量管理策略均对所使用的循环工况依赖性强,工况不同,能量管理策略的优化性能也不同。同时,风机、光伏等新能源发电装置的接入为船舶电力系统带来了极大的不确定性,不仅会随着季节变换发生长时间尺度变化,还会发生短时间尺度的波动,从而使得新能源装置带来的不确定性与负荷的不确定性一起构成了工况的不确定性。因此,通过实时分析输入数据并结合历史工况数据,对长期/短期工况进行精准预测可有效提高混合动力船舶能量管理策略的性能。在工况预测方面,未来的研究重点如下:

1) 借助泛在电力物联网思想<sup>[81]</sup>,利用智能化传感量测、终端智能化及数值天气预报等技术获得船舶实时运行状态、通航环境数据,并借助机器学习<sup>[82]</sup>、大数据分析<sup>[83]</sup>等技术完成能量管理数据的实时分析,实现混合动力船舶的历史数据分析 and 工况的实时全面感知。

2) 风机、光伏等新能源发电工况预测在混合动力船舶能量管理中研究较少,而在陆地微电网能量管理研究中广泛采用神经网络<sup>[84]</sup>、概率预测<sup>[85]</sup>、随机森林<sup>[86]</sup>等方法进行风能、太阳能等新能源发电工况预测。在处理风能、太阳能等新能源发电工况不确定性与系统经济成本方面,陆地微电网能量管理领域广泛采用概率最优潮流<sup>[87]</sup>、场景分析<sup>[88]</sup>、机会约束<sup>[89]</sup>等方法来处理不确定性,但不同于陆地微电网,船舶不仅具有脉冲负荷,而且海洋环境及运行条件多变,船舶微电网面临着更加复杂的环境影响,工况预测较陆上更加困难。因此,在借鉴陆地微电网工况预测技术的同时,还应根据混合动力船舶具体情况展开研究。

### 3.4 策略改进

1) 结合混合动力船舶实际能量管理系统有限的计算力与实时能量管理的要求,综合现有各种能量管理策略的优势,考虑全局最优算法的全局最优优化性能、模糊逻辑算法的适应性与鲁棒性、实时优化算法的实时应用性等,探索不同算法的相互协同与融合,通过取长补短来实现优化性能与实时应用性之间的平衡。

2) 如何在保证实时应用的同时,提高优化性能是能量管理策略实时应用的研究重点。目前的混合动力船舶能量管理策略大多属于集中式能量管理策略,而分布式能量管理策略通过多个分布式控制器协同优化,可以显著降低计算复杂度,且没有单点故障的风险<sup>[17]</sup>。因此,分布式能量管理策略值得在混合动力船舶能量管理方面得到进一步的研究与应用。

## 4 结 语

船舶混合动力系统的应用能够有效提高船舶的动力性能,降低燃料消耗,减少污染物排放,在EEDI和EEOI得到推广的情况下具有良好的应用前景。然而,现有的混合动力船舶能量管理研究综述缺乏对能量管理目标的归纳总结,对能量管理存在的问题及其解决方法的论述也不够全面和深入。为此,本文从能量管理目标、能量管理策略的角度,综述了混合动力船舶能量管理的最新研究进展及其研究现状,全面、深入地分析了现有相关研究存在的优缺点及应用条件,从标准统一、结构改善、工况预测、策略改进这4个方面对未来研究的方向进行了展望。

### 参考文献:

- [1] 刘飞. EEDI对船舶总体设计影响分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.  
LIU F. The research of EEDI impact on the basic ship design[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011 (in Chinese).
- [2] IMO. Marine environment protection committee -62nd session[EB/OL]. (2011-07-15)[2021-02-07]. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-62nd-session.aspx>.
- [3] 俞万能, 廖卫强, 杨荣峰, 等. 基于太阳能锂电池及柴油发电机组的多能源(光柴储)船舶微网能量控制系统研发[J]. 中国造船, 2017, 58(1): 170-176.  
YU W N, LIAO W Q, YANG R F, et al. Development of multi-energy control system for marine micro-grid based on photovoltaic-diesel generator-battery[J]. *Ship-building of China*, 2017, 58(1): 170-176 (in Chinese).
- [4] 刘子杨, 翁方龙, 李玉生, 等. 燃料电池技术在船舶电力推进系统中的应用分析[J]. 船电技术, 2019, 39(11): 6-11.  
LIU Z Y, WENG F L, LI Y S, et al. Analysis of fuel cell technology application in marine electric propulsion system[J]. *Marine Electric & Electronic Technology*, 2019, 39(11): 6-11 (in Chinese).
- [5] 郭焱, 于士振, 郭将驰, 等. 舰船中压直流电力系统的混合储能管理策略仿真分析[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(2): 126-136, 143.  
GUO Y, YU S Z, GUO J C, et al. Simulation analysis on hybrid energy storage management strategy in warship medium voltage DC power system[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(2): 126-136, 143 (in Chinese).
- [6] ZAHEDI B, NORUM L E, LUDVIGSEN K B. Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 255: 341-354.

- [7] 吴骏, 方世源, 吴国栋, 等. 含大功率脉冲性负荷的船舶供电系统设计[J]. 船舶工程, 2019, 41(6): 63–71, 124.  
WU J, FANG S Y, WU G D, et al. Design of ship power supply with high power pulsed loads[J]. Ship Engineering, 2019, 41(6): 63–71, 124 (in Chinese).
- [8] STONE P, OPILA D F, PARK H, et al. Shipboard power management using constrained nonlinear model predictive control[C]//2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS). Alexandria, VA, USA: IEEE, 2015: 1–7.
- [9] LASHWAY C R, ELSAYED A T, MOHAMMED O A. Hybrid energy storage management in ship power systems with multiple pulsed loads[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 141: 50–62.
- [10] KUZNETSOV S B. Hybrid energy storage module for large-scale ship pulsed power[C]//2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS). Arlington, VA, USA: IEEE, 2017: 238–245.
- [11] 孙玉伟, 胡克容, 严新平, 等. 新能源船舶混合储能系统关键技术问题综述[J]. 中国造船, 2018, 59(1): 226–236.  
SUN Y W, HU K R, YAN X P, et al. A review on research in key technologies of hybrid energy storage system in new energy ships[J]. *Shipbuilding of China*, 2018, 59(1): 226–236 (in Chinese).
- [12] 张泽辉, 陈辉, 高海波, 等. 基于实时小波变换的燃料电池混合动力船舶能量管理策略[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(2): 127–136.  
ZHANG Z H, CHEN H, GAO H B, et al. Energy management strategies for fuel cell hybrid ships based on real-time wavelet transform[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(2): 127–136 (in Chinese).
- [13] 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 (in Chinese).
- [14] HUANG K, CARTES D A, SRIVASTAVA S K. A multiagent-based algorithm for ring-structured shipboard power system reconfiguration[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2007, 37(5): 1016–1021.
- [15] DAVEY K, LONGORIA R, SHUTT W, et al. Reconfiguration in shipboard power systems[C]//American Control Conference. New York, NY, USA: IEEE, 2007: 4750–4755.
- [16] SRIVASTAVA S, BUTLER-BURRY K L. Expert-system method for automatic reconfiguration for restoration of shipboard power systems[J]. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2006, 153(3): 253–260.
- [17] SOLANKI J M, SCHULZ N N. Using intelligent multi-agent systems for shipboard power systems reconfiguration[C]//Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems. Arlington, VA, USA: IEEE, 2005.
- [18] 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.
- [19] 孙小明. 小型船舶风光柴蓄混合发电系统优化配置研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.  
SUN X M. Research on matching optimization of wind-solar-diesel-battery hybrid system of small ship[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010 (in Chinese).
- [20] 李严. 风光互补发电系统在海洋渔船中的应用[D]. 海口: 海南大学, 2017.  
LI Y. Apply to wind and photovoltaic generation independent power system on marine fishing boats[D]. Haikou: Hainan University, 2017 (in Chinese).
- [21] 张弛. 光伏功率预测与船舶微电网优化调度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.  
ZHANG C. Photovoltaic power forecasting and ship microgrid optimization scheduling storage[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019 (in Chinese).
- [22] 姚池. 全电驱船舶电网能量优化管理策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.  
YAO C. Power management optimization in all-electric ship micro-grid[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017 (in Chinese).
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] WANG L, CHEN S S, ZHENG G Z, et al. Installation of a 400-W wind turbine generator on a commercial fishing boat to achieve energy saving[C]//IEEE PES General Meeting. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2010: 1–6.
- [26] AHMED S, CASTELLAZZI A, WILLIAMS A. Technologies, feasibility, and management strategies for on-board multi-source energy networks[C]//IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Florence, Italy: IEEE, 2016: 1–6.
- [27] 张钧存. 风能发电在远洋货船上应用的研究[J]. 机电设备, 2001(6): 13–18.  
ZHANG J C. A study on the application of wind energy conversion system on an ocean cargo ship[J]. *Mechanical and Electrical Equipment*, 2001(6): 13–18 (in Chinese).
- [28] LI Z M, XU Y, FANG S D, et al. Robust coordination of a hybrid AC/DC multi-energy ship microgrid with flexible voyage and thermal loads[J]. *IEEE Transac-*

- tions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2782–2793.
- [29] 庞水, 林叶锦, 张均东, 等. 柴电混合动力船舶能量分配优化方法[J]. *航海工程*, 2020, 49(3): 106–111.  
PANG S, LIN Y J, ZHANG J D, et al. On power distribution optimization method for diesel-electric hybrid-driven ship[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2020, 49(3): 106–111 (in Chinese).
- [30] ZHANG C, JIA B Z. The research of power allocation in diesel-electric hybrid propulsion system[C]//2019 Chinese Automation Congress (CAC). Hangzhou, China: IEEE, 2019: 3664–3668.
- [31] 高迪驹, 张伟, 王旭阳, 等. 基于模型预测控制的混合动力船舶能量控制策略[J]. *上海海事大学学报*, 2018, 39(2): 60–65.  
GAO D J, ZHANG W, WANG X Y, et al. Energy control strategy for hybrid power ships based on model predictive control[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2018, 39(2): 60–65 (in Chinese).
- [32] 兰熙, 沈爱弟, 高迪驹, 等. 混合动力船舶能量管理系统的最优控制[J]. *电源技术*, 2016, 40(9): 1859–1862.  
LAN X, SHEN A D, GAO D J, et al. Optimal control of hybrid ship energy management system[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(9): 1859–1862 (in Chinese).
- [33] ZHANG Z H, GUAN C, LIU Z Y. Real-time optimization energy management strategy for fuel cell hybrid ships considering power sources degradation[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 87046–87059.
- [34] 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.
- [35] IMO. Guideline for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI)[DB/OL]. [2021-02-07]. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Circ-684.pdf>.
- [36] 高迪驹, 沈爱弟, 褚建新, 等. 混合动力船舶的能量管理与控制策略[J]. *上海海事大学学报*, 2015, 6(1): 70–74.  
GAO D J, SHEN A D, CHU J X, et al. Energy management and control strategy for hybrid electric ships[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2015, 6(1): 70–74 (in Chinese).
- [37] 袁裕鹏, 王凯, 严新平. 混合动力船舶能量管理控制策略设计与仿真[J]. *航海工程*, 2015, 44(2): 95–98.  
YUAN Y P, WANG K, YAN X P. Design and simulate of energy management control strategy for hybrid ship[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2015, 44(2): 95–98 (in Chinese).
- [38] TANG R L, LI X, LAI J G. A novel optimal energy-management strategy for a maritime hybrid energy system based on large-scale global optimization[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 254–264.
- [39] 刘乐, 高海波, 缪光辉, 等. 基于 PSO 优化模糊控制的船舶能量管理策略研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2017, 39(3): 32–37.  
LIU L, GAO H B, MIU G H, et al. Study of marine energy management strategy based on fuzzy logic controller with particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2017, 39(3): 32–37 (in Chinese).
- [40] ERIKSSON E L V, GRAY E M. Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems –A critical review[J]. *Applied Energy*, 2017, 202: 348–364.
- [41] BUKAR A L, TAN C W. A review on stand-alone photovoltaic-wind energy system with fuel cell: system optimization and energy management strategy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 221: 73–88.
- [42] YUAN Y P, WANG J X, YAN X P, et al. A review of multi-energy hybrid power system for ships[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 132: 110081.
- [43] WU P, PARTRIDGE J, BUCKNALL R. Cost-effective reinforcement learning energy management for plug-in hybrid fuel cell and battery ships[J]. *Applied Energy*, 2020, 275: 115258.
- [44] 石英乔, 何彬, 曹桂军, 等. 燃料电池混合动力瞬时优化能量管理策略研究[J]. *汽车工程*, 2008, 30(1): 30–35.  
SHI Y Q, HE B, CAO G J, et al. A study on the energy management strategy for fuel cell electric vehicle based on instantaneous optimization[J]. *Automotive Engineering*, 2008, 30(1): 30–35 (in Chinese).
- [45] 臧壮. 小型内河游艇混合动力系统的设计与研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.  
ZANG Z. The design and research of hybrid power system for small yacht[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017 (in Chinese).
- [46] BEŞİKÇİ E B, KECECI T, ARSLAN O, et al. An application of fuzzy-AHP to ship operational energy efficiency measures[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 121: 392–402.
- [47] ZHU L S, HAN J G, PENG D K, et al. Fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid ship[C]//2014 First International Conference on Green Energy ICGE 2014. Sfax, Tunisia: IEEE, 2014: 107–112.
- [48] 肖能齐, 徐翔, 周瑞平. 船舶柴电混合动力系统能量管理控制策略[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(1): 153–160.  
XIAO N Q, XU X, ZHOU R P. Energy management and control strategy of ship diesel-electric hybrid power system[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(1): 153–160 (in Chinese).
- [49] TJANDRA R, WEN S L, ZHOU D H, et al. Optimal sizing of BESS for hybrid electric ship using multi-objective particle swarm optimization[C]//2019 IEEE 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019-ECCE Asia). Busan, Korea

- (South): IEEE, 2019: 1460-1466.
- [50] 李红娟, 郭向阳, 刘宏建. 随机动态规划和粒子群嵌套寻优的 PHEV 能量优化 [J]. *机械设计与制造*, 2020(7): 150-155.  
LI H J, GUO X Y, LIU H J. PHEV energy optimization based on stochastic dynamic programming and particle swarm nested optimization[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(7): 150-155 (in Chinese).
- [51] 王森, 程春田, 武新宇, 等. 梯级水电站群长期发电优化调度多核并行随机动态规划方法 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(2): 209-218.  
WANG S, CHENG C T, WU X Y, et al. Parallel stochastic dynamic programming for long-term generation operation of cascaded hydropower stations[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, 44(2): 209-218 (in Chinese).
- [52] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述 [J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(10): 2911-2916.  
GE J K, QIU Y H, WU C M, et al. Summary of genetic algorithms research[J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(10): 2911-2916 (in Chinese).
- [53] 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.
- [54] BOLBOT V, TRIVYZA N L, THEOTOKATOS G, et al. Cruise ships power plant optimisation and comparative analysis[J]. *Energy*, 2020, 196: 117061.
- [55] 郑夏, 马良. 一种多目标非线性优化的 NSGA-II 改进算法 [J]. *微电子学与计算机*, 2020, 37(7): 47-53.  
ZHENG X, MA L. An Improved NSGA-II algorithm for multi-objective nonlinear optimization[J]. *Microelectronics & Computer*, 2020, 37(7): 47-53 (in Chinese).
- [56] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述 [J]. *中国工程科学*, 2004, 6(5): 87-94.  
YANG W, LI Q Q. Survey on particle swarm optimization algorithm[J]. *Engineering Science*, 2004, 6(5): 87-94 (in Chinese).
- [57] TANG R L, WU Z, LI X. Optimal power flow dispatching of maritime hybrid energy system using model predictive control[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 6183-6188.
- [58] 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, 150: 63-75.
- [59] 印波, 王锡淮, 肖健梅. 基于改进粒子群优化算法的船舶能量管理方案 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(6): 37-45.  
YIN B, WANG X H, XIAO J M. Ship energy management scheme based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(6): 37-45 (in Chinese).
- [60] LIN C C, PENG H, GRIZZLE J W, et al. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(6): 839-849.
- [61] YUAN L C W, TJAHOJWIDODO T, LEE G S G, et al. Equivalent consumption minimization strategy for hybrid all-electric tugboats to optimize fuel savings[C]//2016 American Control Conference (ACC). Boston, MA, USA: IEEE, 2016: 6803-6808.
- [62] BASSAM A M, PHILLIPS A B, TURNOCK S R, et al. Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(1): 623-635.
- [63] ZHU J Y, CHEN L, WANG X F, et al. Bi-level optimal sizing and energy management of hybrid electric propulsion systems[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114134.
- [64] HOU J, SONG Z Y, HOFMANN H, et al. Adaptive model predictive control for hybrid energy storage energy management in all-electric ship microgrids[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 198: 111929.
- [65] PARAN S, VU T V, MEZYANI T E, et al. MPC-based power management in the shipboard power system[C]//2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS). Alexandria, VA, USA: IEEE, 2015: 14-18.
- [66] YUAN L C W, TJAHOJWIDODO T, LEE G S G, et al. Optimizing fuel savings and power system reliability for all-electric hybrid vessels using Model Predictive Control[C]//2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Munich, Germany: IEEE, 2017: 1532-1537.
- [67] GONSOLIN D E, VU T V, DIAZ F, et al. Coordinating multiple energy storages using MPC for ship power systems[C]//2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS). Arlington, VA, USA: IEEE, 2017: 551-556.
- [68] 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.
- [69] ZOHRABI N, ZAKERI H, ABDELWAHEB S. Efficient load management in electric ships: a model predictive control approach[C]//2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anaheim, CA, USA: IEEE, 2019: 3000-3006.
- [70] 刘张超, 谭琨, 于海洋, 等. 国内船舶柴电混合动力系统发展综述及典型应用案例 [J]. *柴油机*, 2019, 41(4): 46-49.  
LIU Z C, TAN K, YU H Y, et al. The development of domestic diesel-electric hybrid marine propulsion systems and typical application cases[J]. *Diesel Engine*, 2019, 41(4): 46-49 (in Chinese).

- [71] MEHSEIN K, NORSIC C, CHAILLOU C, et al. Minimizing secondary pollutant formation through identification of most influential volatile emissions in gasoline exhausts: impact of the vehicle powertrain technology[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 226: 117394.
- [72] SILVA C, ROSS M, FARIAS T. Evaluation of energy consumption, emissions and cost of plug-in hybrid vehicles[J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(7): 1635–1643.
- [73] KOUBAA R, BACHA S, SMAOUI M, et al. Robust optimization based energy management of a fuel cell/ultra-capacitor hybrid electric vehicle under uncertainty[J]. *Energy*, 2020, 200: 117530.
- [74] 彭东恺, 朱礼斯, 韩金刚. 船舶燃料电池-蓄电池混合动力系统能量管理策略及仿真分析[J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(11): 2797–2802.
- PENG D K, ZHU L S, HAN J G. Simulation of energy management strategy for fuel cell/battery hybrid ship[J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(11): 2797–2802 (in Chinese).
- [75] 张泽辉. 混合动力船舶复合电源能量管理策略及容量配置研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- ZHANG Z H. Study on sizing and energy management strategy of hybrid energy storage system for hybrid ship[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [76] 魏伟, 褚建新, 王帆. 串联式混合动力船舶能源系统运行模式切换策略[J]. *船舶工程*, 2016, 38(4): 26–30.
- WEI W, CHU J X, WANG F. Operation mode switching strategy of series hybrid electric ship power system[J]. *Ship Engineering*, 2016, 38(4): 26–30 (in Chinese).
- [77] 潘海邦, 薛圻蒙, 高迪驹, 等. 串联式混合动力内河船舶参数匹配及控制策略研究[J]. *船舶工程*, 2018, 40(3): 55–61.
- PAN H B, XUE Q M, GAO D J, et al. Research on parameter matching and control strategy of series hybrid inland ship[J]. *Ship Engineering*, 2018, 40(3): 55–61 (in Chinese).
- [78] 严新平. 新能源在船舶上的应用进展及展望[J]. *船海工程*, 2010, 39(6): 111–115, 120.
- YAN X P. Progress review of new energy application in ship[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2010, 39(6): 111–115, 120 (in Chinese).
- [79] 杨诚, 杨祥国, 陈辉, 等. 船舶电力推进系统制动能量回馈利用方法研究[J]. *舰船科学技术*, 2015, 37(12): 89–92.
- YANG C, YANG X G, CHEN H, et al. The method of research on ship electric propulsion system using the braking energy feedback[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(12): 89–92 (in Chinese).
- [80] 吴安民, 周伟中. 船舶柴油机余热利用技术研究[J]. *柴油机*, 2012, 34(5): 46–49.
- WU A M, ZHOU W Z. Study on waste heat recovery technology of marine diesel engine[J]. *Diesel Engine*, 2012, 34(5): 46–49 (in Chinese).
- [81] 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).
- [82] 万辉, 张建雄, 高嵩, 等. 内河船舶大数据关键技术研究[J]. *中国水运*, 2017, 38(11): 47–50.
- WAN H, ZHANG J X, GAO S, et al. Research on key technologies of inland ship big data[J]. *China Water Transport*, 2017, 38(11): 47–50 (in Chinese).
- [83] WICKRAMANAYAKE S, DILUM BANDARA H M N. Fuel consumption prediction of fleet vehicles using machine learning: a comparative study[C]//2016 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon). Moratuwa, Sri Lanka: IEEE, 2016: 90–95.
- [84] TAO Y Q, CHEN Y G. Distributed PV power forecasting using genetic algorithm based neural network approach[C]//2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems. Kumamoto, Japan: IEEE, 2014: 557–560.
- [85] 杨明, 范澍, 韩学山, 等. 基于分量稀疏贝叶斯学习的风电场输出功率概率预测方法[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(14): 125–130, 142.
- YANG M, FAN S, HAN X S, et al. Wind farm generation forecast based on componential sparse Bayesian learning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(14): 125–130, 142 (in Chinese).
- [86] 宋小会, 郭志忠, 郭华平, 等. 一种基于森林模型的光伏发电功率预测方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(2): 13–18.
- SONG X H, GUO Z Z, GUO H P, et al. A new forecasting model based on forest for photovoltaic power generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(2): 13–18 (in Chinese).
- [87] ZHANG J T, PANG S, TIAN H Q, et al. Siting and sizing of distributed wind generation under active management mode[C]//2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Hangzhou, China: IEEE, 2010: 1–8.
- [88] NICK M, CHERKAOUI R, PAOLONE M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(5): 2300–2310.
- [89] LIU Z P, WEN F S, LEDWICH G. Optimal siting and sizing of distributed generators in distribution systems considering uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(4): 2541–2551.