

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241754

考虑碳排放的船舶冷热电多能系统协同规划方法

杨楠¹, 徐国彬¹, 代洲², 何叶³, 黄悦华¹, 鄢晶⁴, 张磊¹, 王灿¹

(1. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 贵州财经大学管理科学与工程学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 国网湖南省电力有限公司邵阳供电公司, 湖南 邵阳 422000; 4. 国网湖北省经济技术研究院有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 随着邮轮旅游业的日益繁荣, 船舶冷热电多能系统(ship multi-energy system, SMES)的规划问题已成为实现其绿色发展的关键挑战之一。对此, 提出了一种考虑碳排放的 SMES 联合规划方法。首先构建了以交直流混合船舶电力系统为核心, 以能源转化设备为枢纽的 SMES 系统模型, 并实现了对船舶的动力系统与航行之间关系的精细化描述。其次, 在考虑船用设备的各项运营成本模型以及相关约束条件的前提下, 建立了考虑碳排放的 SMES 规划双层优化模型。上层以总成本最小为目标函数, 下层以总运维成本最小和碳排放量最低为目标函数。最后通过 CPLEX 对模型进行求解。仿真结果验证了所提方法的合理性和优越性。

关键词: 船舶冷热电多能系统; 联合规划; 船舶动力系统; 双层优化

A coordinated planning method for ship multi-energy system considering carbon emissions

YANG Nan¹, XU Guobin¹, DAI Zhou², HE Ye³, HUANG Yuehua¹, YAN Jing⁴, ZHANG Lei¹, WANG Can¹

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. School of Management Science and Engineering, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China; 3. Shaoyang Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Shaoyang 422000, China; 4. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Economic and Technical Research Institute, Wuhan 430000, China)

Abstract: With the rapid growth of the cruise industry, planning ship multi-energy systems (SMES), which integrate cooling, heating, and power, has become one of the key challenges for achieving green development. To address this issue, a coordinated SMES planning method that considers carbon emissions is proposed. First, a SMES system model is constructed with a hybrid AC/DC ship power system as the core and energy conversion devices as the hubs, enabling a detailed representation of the relationship between the ship's propulsion system and its navigation conditions. Second, considering the operational cost models of various marine equipment and relevant constraints, a bi-level optimization model for SMES planning is developed, incorporating carbon emissions. The upper level aims to minimize the total cost, while the lower level seeks to minimize both the total operational and maintenance costs and carbon emissions. Finally, the proposed model is solved using CPLEX. Simulation results validate the rationality and superiority of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62233006).

Key words: ship multi-energy system; coordinated planning; ship propulsion system; bi-level optimization

0 引言

近年来, 大型邮轮的远洋旅游业快速发展^[1], 由于这类船舶需要满足游客的多样化需求, 往往集

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62233006)“区域能源互联网的分布式协同控制与智能决策”

成了分布式发电机、多能源负载以及储能系统^[2-3], 因而, 可以被视为船舶冷热电多能系统(ship multi-energy system, SMES)。在其生命周期内, SMES 的投资成本和减排潜力会受到其系统组成、电源结构、容量配置等因素的直接影响^[4-6]。因此, 如何对 SMES 进行联合规划日益受到工业界和学术界的广泛关注。

目前对 SMES 的研究还在起步阶段,主要集中在系统控制^[7-10]、调度运行^[11-12]以及航行路径规划^[13-14]等几个方面。例如:为了稳定船舶微电网,文献[7-10]以电源容量分配、储能系统优化以及并网预同步控制等方面为切入点,设计了相应的控制策略,以减少动态负载变化引起的电压扰动,同时兼顾调频质量和经济性。为了优化船舶能源管理和调度,文献[11-12]分别从联合航次调度和船队协同调度两个方面提出了多目标优化方案,以最大限度地提供关键能源服务,并降低总体运营成本。文献[13-14]分别设计了一种船舶自动靠泊路径规划方法,以提升不同场景下船舶动态实时局部路径规划的适应性。

上述针对 SMES 的研究虽然在具体方法和应用上取得了一定进展,但目前人们对其规划策略的研究还处于起步阶段,基本是从工程操作层面或者子系统建设角度入手。例如:为了对 SMES 进行规划决策,已有研究提出了一种规划方法,用于确定碳捕集系统的容量和储能系统的扩展容量,从而减少碳排放^[15]。文献[16]针对集成光伏发电的船舶电力系统中储能系统(energy storage system, ESS)最优尺寸设计问题,提出了一种多目标优化方法,以最小化投资/更换成本、燃料成本和碳排放量。文献[17-19]中均以满足冷热电负荷需求为目的,考虑船舶多能源系统中柴油发电机的容量规划问题,未全面涉及能源之间的相互耦合作用。文献[20]建立了混合能源存储系统容量配置的优化模型及约束条件,并提出了一种基于非支配排序遗传算法 II (non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)和成本效益方法的决策方法。然而,上述研究主要关注储能系统或其他子系统的规划,未能充分考虑整个船舶系统的整体规划。因此,以上研究存在如下两个问题:

1) 现有规划方法关注的对象是 SMES 的各个子系统,在决策过程中一般是将其他系统视作固定不变的边界条件。而事实上,SMES 中的多能源系统具有紧密的耦合关系,其正是通过这些紧密耦合的多能源系统的协调运行,来实现其节能减碳效益。因此,只有在规划过程中充分考虑不同能源系统之间的交互影响,才能最大限度地提升其能源效率并优化成本。

2) 现有规划方法主要是以投资和运行成本为主要优化目标。然而,在当前绿色海运发展的背景下,碳排放已成为影响能源系统设计与优化的重要因素。如果忽略这一因素,不仅限制了 SMES 联合规划方法的现实适用性,也难以有效响应当前绿

色航运发展的迫切需求。因此,从协同作用和碳排放双重视角出发,开展 SMES 联合规划研究具有重要意义。

综上所述,通过将船舶航行纳入决策模型,本文从系统的角度提出了一种 SMES 联合规划方法。首先,通过考虑 SMES 紧密耦合的多能量系统,建立了其输出模型和能量转换模型。随后,建立了一个双层联合规划模型,其中上层以总成本最小为目标函数,下层以总运维成本最小和碳排放量最低为目标。最后将模型转换为混合整数线性模型进行求解。与现有的规划方法相比,本文所提方法一方面从系统的整体角度出发,统筹考虑了不同能源系统之间的耦合关系和交互影响,有效提高了能源效率和整体经济性。另一方面,将 SMES 中不同设备的碳排放量考虑其中,提高了 SMES 在实际运行过程中的环境效益。

1 SMES 模型

1.1 SMES 结构模型

SMES 结构如图 1 所示,该系统由柴油发电机组(diesel generators, DG)、冷热电联供(combined cooling heating and power, CCHP)机组、电制冷机(electric cooling, EC)、光伏发电设备(photovoltaic, PV)、储能设备以及岸电装置组成,以满足船舶的冷、热、电负荷(包括生活用电负荷和动力负荷需求)。其中, CCHP 机组中主要涉及燃气轮机(gas turbine, GT)、余热回收装置(heat recovery boiler, HB)、吸收式制冷机(absorption cooling, AC); 储能设备(energy storage, ES)主要涉及船用蓄电池(electric energy storage, EES)、蓄热罐(thermal energy storage, TES)以及蓄冷槽(cold energy storage, CES)^[21]。

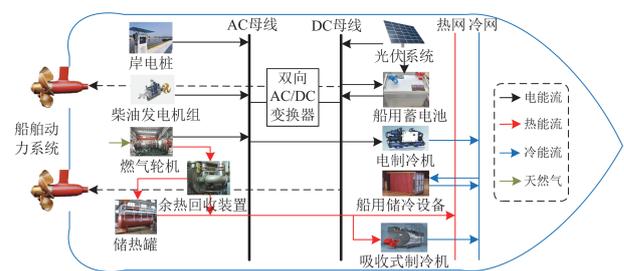


图 1 SMES 结构

Fig. 1 Structure of SMES

SMES 包含电力系统、热能系统和冷能系统,3 种系统协调配合,能源相互转换,实现多能流系统的互补运行。在该系统中,柴油发电机组作为船舶主要供能设备,可为全船负荷持续提供电能,对系统整体影响最大;冷热电联供机组消耗天然气来满

足船舶的电负荷和热负荷需求, 同时通过能源转换设备为船舶供冷; 太阳能光伏发电作为清洁供能设备可以为船舶提供电能, 但其出力具有明显的间歇性与波动性, 可以与储能设备进行配合, 提高光伏的消纳率, 抑制功率波动。

与此同时, 多种能源设备接入船舶电力系统会降低船舶运行稳定性和可靠性, 合理配置储能设备可以维持系统的能量平衡和功率平衡, 将储能设备与冷、热、电负荷结合作为船舶的辅助调峰设备, 当负荷需求较低而能源供应较高时, 利用储能设备存储系统中冗余的能量; 在负荷需求较高时, 储能设备释放所存储的能量, 实现能量的时刻性转移, 缓解船舶多能源供需不匹配的问题, 提高整个系统的运行灵活性^[4]。在船舶停靠港口期间, 利用岸电技术, 通过与港口建立船用岸电接口可实现船舶与陆地电网的互联互通, 在不启动船上的发电设备的情况下, 利用港岸电电源提供靠港期间所需生产、生活用电(例如通信、照明等), 同时为船用蓄电池充电, 可降低油耗、减少船舶的运营成本。

1.2 船用能源设备模型

船舶综合能源系统中的能源设备分为供电设备、供热设备、制冷设备和储能设备。供电设备包括柴油发电机组(DG)、CCHP 机组中的燃气轮机和太阳能光伏发电; 供热设备为 CCHP 机组中的余热回收装置; 制冷设备包括电制冷机与 CCHP 机组中的吸收式制冷机; 储能设备包括船用蓄电池、船用储热罐和船用蓄冷槽。各设备的出力模型以及约束如下所述。

1.2.1 供电模型

1) 柴油发电机

柴油发电机的出力模型如式(1)所示。

$$P_{dg}^t = \frac{k_b h_f}{\eta_{dg}} (F - F_0) \quad (1)$$

式中: P_{dg}^t 为 DG 在 t 时刻的输出功率; k_b 为柴油燃烧效率, 一般取 40%; η_{dg} 为 DG 的效率; h_f 为柴油的低热值, 一般取 49 kJ/g; F_0 为 DG 单位功率的空载耗油量; F 为 DG 的耗油量。

为保障船舶的供电连续性, 在船舶航行期间, 柴油发电机都处于工作状态。柴油发电机的单位油耗函数可通过二项式近似表示^[22], 如式(2)所示。

$$\Phi(P_{dg,n}^t) = a_{fu,dg,n}^f P_{dg,n}^t + b_{fu,dg,n}^f + \frac{c_{fu,dg,n}^f \sigma_{dg,n}^t}{P_{dg,n}^t} \quad (2)$$

式中: $P_{dg,n}^t$ 为 DG 在 t 时刻的输出功率; $a_{fu,dg,n}^f$ 、 $b_{fu,dg,n}^f$ 、 $c_{fu,dg,n}^f$ 为 DG 的燃料成本系数; $\sigma_{dg,n}^t$ 表示

DG 的开关变量, 取值为 1 表示 DG 打开, 取值为 0 表示 DG 关闭; n 为 DG 的型号。

DG 的成本主要涉及 DG 年投资成本、维护成本、燃料成本和机组启停成本, 具体如下。

$$C_{in,dg} = \sum_{n \in N_n} R_{dg,n} \mu_{dg,n} \frac{r(1+r)^{T_{dg,n}}}{(1+r)^{T_{dg,n}} - 1} \quad (3)$$

$$C_{om,dg}^t = \sum_{n \in N_n} P_{dg,n}^t \lambda_{dg,n} \quad (4)$$

$$C_{fu,dg,n}^t = a_{fu,dg,n}^f (P_{dg,n}^t)^2 + b_{fu,dg,n}^f P_{dg,n}^t + c_{fu,dg,n}^f \sigma_{dg,n}^t \quad (5)$$

$$C_{ST}^t = \sum_{n \in N_n} \max\{0, \sigma_{dg,n}^t - \sigma_{dg,n}^{t-1}\} \theta_{dg,n}^\sigma \quad (6)$$

式中: $C_{in,dg}$ 为 DG 的年投资成本; N_n 为 DG 集合; $R_{dg,n}$ 表示 DG 的安装容量; $\mu_{dg,n}$ 为 DG 的单位投资成本; r 为折现率; $T_{dg,n}$ 表示 DG 的寿命; $C_{om,dg}^t$ 为 DG 在 t 时刻的维护成本; $\lambda_{dg,n}$ 为 DG 的单位维护成本; $C_{fu,dg,n}^t$ 表示 DG 在 t 时刻所需的燃料成本; C_{ST}^t 为 DG 在 t 时刻的启停成本; $\theta_{dg,n}^\sigma$ 为 DG 的单位启停成本。

DG 出力的约束条件如式(7)~式(10)所示, 其中式(7)为 DG 出力上下限约束, 式(8)为 DG 爬坡约束, 式(9)和式(10)为 DG 最小开关时间约束。

$$P_{dg,n}^{\min} \sigma_{dg,n}^t \leq P_{dg,n}^t \leq P_{dg,n}^{\max} \sigma_{dg,n}^t \quad (7)$$

$$R_{dg,n}^{\min} \Delta t \leq P_{dg,n}^t - P_{dg,n}^{t-1} \leq R_{dg,n}^{\max} \Delta t \quad (8)$$

$$(T_{dg,n}^{\text{on},t-1} - T_{dg,n}^{\text{up},\min})(\sigma_{dg,n}^{t-1} - \sigma_{dg,n}^t) \geq 0 \quad (9)$$

$$(T_{dg,n}^{\text{off},t-1} - T_{dg,n}^{\text{down},\min})(\sigma_{dg,n}^t - \sigma_{dg,n}^{t-1}) \geq 0 \quad (10)$$

式中: $P_{dg,n}^{\max}$ 、 $P_{dg,n}^{\min}$ 分别为 DG 的输出功率上、下限; $R_{dg,n}^{\max}$ 、 $R_{dg,n}^{\min}$ 分别为 DG 的爬坡功率上、下限; Δt 为调度周期; $T_{dg,n}^{\text{on},t-1}$ 、 $T_{dg,n}^{\text{off},t-1}$ 分别为 DG 到 $t-1$ 时刻为止已经连续开机、关机的时间; $T_{dg,n}^{\text{up},\min}$ 、 $T_{dg,n}^{\text{down},\min}$ 分别为 DG 的最小连续开机、停机时间。

2) 燃气轮机

GT 的出力模型为

$$P_{gt}^t = \eta_{gt}^c H_r V_{gt}^t \quad (11)$$

$$Q_{gt}^t = \lambda_{gt}^h P_{gt}^t \quad (12)$$

式中: P_{gt}^t 为 t 时刻 GT 的电输出功率; V_{gt}^t 为 t 时刻 GT 消耗的天然气的量; H_r 表示天然气的热值; η_{gt}^c 表示 GT 的气转电效率; Q_{gt}^t 为 GT 的热输出功率; λ_{gt}^h 为 GT 的热输出功率与电功率之比。

GT 的年投资成本、维护成本和燃料成本为

$$C_{in,gt} = \mu_{gt} R_{gt} \frac{r(1+r)^{T_{gt}}}{(1+r)^{T_{gt}} - 1} \quad (13)$$

$$C_{om,gt}^t = \lambda_{gt} P_{gt}^t \quad (14)$$

$$C_{fu,gt}^t = \varphi_{gas} V_{gt}^t \quad (15)$$

式中: $C_{in,gt}$ 为 GT 的年投资成本; μ_{gt} 为 GT 的单位投资成本; R_{gt} 为 GT 的安装容量; T_{gt} 为 GT 的寿命; $C_{om,gt}^t$ 为 t 时刻 GT 的维护成本; λ_{gt} 为 GT 的单位维护成本; $C_{fu,gt}^t$ 为 t 时刻 GT 消耗天然气的燃料成本; φ_{gas} 为消耗单位天然气的燃料成本。

GT 的出力上下限约束为

$$P_{gt}^{\min} \leq P_{gt}^t \leq P_{gt}^{\max} \quad (16)$$

式中: P_{gt}^{\max} 、 P_{gt}^{\min} 分别为 GT 输出功率的上、下限。

3) 光伏发电系统

PV 的出力模型为

$$P_{pv}^t = R_{pv} \frac{G^t}{G_{stc}} [1 - \beta_{pv} (T_c^t - T_{c-ref})] \quad (17)$$

式中: P_{pv}^t 为 PV 在 t 时刻的输出功率; R_{pv} 为 PV 的安装容量; G^t 、 G_{stc} 分别为 PV 在实际环境和标准工况下的光照强度; β_{pv} 表示 PV 功率温度系数; T_c^t 表示太阳能光伏电池板所处的实际环境温度; T_{c-ref} 为标准条件下的太阳能光伏电池板的表面温度。

PV 的年投资成本和维护成本如下^[4-5]。

$$C_{in,pv} = R_{pv} \mu_{pv} \frac{r(1+r)^{T_{pv}}}{(1+r)^{T_{pv}} - 1} \quad (18)$$

$$C_{om,pv}^t = P_{pv}^t \lambda_{pv} \quad (19)$$

式中: $C_{in,pv}$ 为 PV 的年投资成本; μ_{pv} 为 PV 的单位投资成本; T_{pv} 为 PV 的寿命; $C_{om,pv}^t$ 为 PV 在 t 时刻的维护成本; λ_{pv} 为 PV 的单位维护成本。

PV 工作在最大功率追踪模式下, 在 t 时刻的消纳功率不能超过该时刻的最大输出功率, 即满足式(20)。

$$0 \leq P_{pv}^t \leq P_{pv}^{\max} \quad (20)$$

式中: P_{pv}^{\max} 表示 PV 的最大输出功率。

1.2.2 供热模型

HB 的出力模型为

$$Q_{hb}^t = \eta_{hb}^h Q_{gt}^t \quad (21)$$

式中: Q_{hb}^t 为 HB 在 t 时刻的制热功率; η_{hb}^h 为 HB 的余热回收效率。

船舶的供热主要由余热回收装置来提供, HB 在船舶综合能源系统中主要涉及到 HB 的年投资成本和维护成本。

$$C_{in,hb} = \mu_{hb} R_{hb} \frac{r(1+r)^{T_{hb}}}{(1+r)^{T_{hb}} - 1} \quad (22)$$

$$C_{om,hb}^t = \lambda_{hb} Q_{hb}^t \quad (23)$$

式中: $C_{in,hb}$ 表示 HB 的年投资成本; μ_{hb} 表示 HB 的单位投资成本; R_{hb} 表示 HB 的安装容量; T_{hb} 为 HB 的寿命; $C_{om,hb}^t$ 表示 t 时刻 HB 的维护成本; Q_{hb}^t 表示 t 时刻 HB 的输出功率; λ_{hb} 表示 HB 的单位维护成本。

HB 的出力上下限约束为

$$0 \leq Q_{hb}^t \leq Q_{hb}^{\max} \quad (24)$$

式中: Q_{hb}^{\max} 表示 HB 的输出功率上限。

1.2.3 供冷模型

1) 吸收式制冷机

AC 的出力模型为

$$Q_{ac,c}^t = \eta_{ac} Q_{ac,h}^t \quad (25)$$

式中: $Q_{ac,c}^t$ 、 $Q_{ac,h}^t$ 分别为 AC 输出冷功率、输入热功率; η_{ac} 表示输出冷功率与输入热功率之比, 定义为热力系数。

AC 的年投资成本和维护成本为

$$C_{in,ac} = \mu_{ac} R_{ac} \frac{r(1+r)^{T_{ac}}}{(1+r)^{T_{ac}} - 1} \quad (26)$$

$$C_{om,ac}^t = \lambda_{ac} Q_{ac,c}^t \quad (27)$$

式中: $C_{in,ac}$ 表示 AC 的年投资成本; μ_{ac} 表示 AC 的单位投资成本; R_{ac} 表示 AC 的安装容量; T_{ac} 表示 AC 的寿命; $C_{om,ac}^t$ 表示 t 时刻 AC 的维护成本; λ_{ac} 表示 AC 的单位维护成本。

AC 的出力上下限约束为

$$0 \leq Q_{ac}^t \leq Q_{ac}^{\max} \quad (28)$$

式中: Q_{ac}^{\max} 表示 AC 的输出功率上限。

2) 电制冷机

EC 的出力模型为

$$Q_{ec}^t = \eta_{ec}^c P_{ec}^t \quad (29)$$

式中: Q_{ec}^t 为 t 时刻 EC 的供冷功率; P_{ec}^t 为 t 时刻 EC 消耗的电功率; η_{ec}^c 为 EC 的制冷效率。

EC 的年投资成本和维护成本为

$$C_{in,ec} = \mu_{ec} R_{ec} \frac{r(1+r)^{T_{ec}}}{(1+r)^{T_{ec}} - 1} \quad (30)$$

$$C_{om,ec}^t = \lambda_{ec} Q_{ec}^t \quad (31)$$

式中: $C_{in,ec}$ 为 EC 的年投资成本; μ_{ec} 为 EC 的单位投资成本; R_{ec} 为 EC 的安装容量; T_{ec} 为 EC 的寿命; $C'_{om,ec}$ 为 t 时刻 EC 的维护成本; Q'_{ec} 为 t 时刻 EC 的输出功率; λ_{ec} 为 EC 的单位维护成本。

EC 的出力上下限约束为

$$0 \leq Q'_{ec} \leq Q_{ec}^{\max} \quad (32)$$

式中: Q_{ec}^{\max} 表示 EC 的输出功率上限。

1.2.4 储能模型

3 种不同的储能设备的模型统一为

$$S_z(t) = (1 - \mu_z^{\text{loss}})S_z(t-1) + \left(\eta_z^{\text{ch}} P'_{z,\text{ch}} - \frac{P'_{z,\text{dis}}}{\eta_z^{\text{dis}}} \right) \frac{\Delta t}{R_z} \quad (33)$$

$$z \in \{\text{EES}, \text{TES}, \text{CES}\} \quad (34)$$

式中: $S_z(t)$ 为 t 时刻 ES 的荷电状态; $P'_{z,\text{ch}}$ 、 $P'_{z,\text{dis}}$ 分别为 t 时刻 ES 的充、放电功率; η_z^{ch} 、 η_z^{dis} 分别为 t 时刻 ES 的充、放电/热效率; μ_z^{loss} 为 ES 的自放电/热率; R_z 为 ES 的安装容量; z 表示设备类型。

ES 的年投资成本和维护成本为

$$C_{in,z} = R_z \mu_z \frac{r(1+r)^{T_z}}{(1+r)^{T_z} - 1} \quad (35)$$

$$C'_{om,z} = P'_{dis,z} \lambda_z \quad (36)$$

式中: $C_{in,z}$ 表示 ES 的年投资成本; μ_z 表示 ES 的单位投资成本; T_z 表示 ES 的寿命; $C'_{om,z}$ 表示 t 时刻 ES 的维护成本; λ_z 表示 t 时刻 ES 的单位维护成本。

ES 的出力上下限约束为

$$0 \leq P'_{z,\text{dis}} \leq P_{z,\text{dis}}^{\max} \quad (37)$$

式中: $P_{z,\text{dis}}^{\max}$ 表示 ES 的输出功率上限。

1.3 船舶航行模型

为了满足总的航程距离和正点到港的要求, 船舶需要在航行过程中根据航线、天气、载重量等因素控制航速, 以在规定的时间内到港。图 2 是某典型船舶的航行模式^[21]。

在本节中, 总航行时间记为 T 并等分为 $|T|$ 个时间段, 任一时间段长度为 ΔT 。根据运行特性不同, 通常考虑了 4 种主要工况: 启动和加速航行(T1)、匀速航行(T2)、减速航行(T3)和停泊(T4)。在船舶的航程中, 航行距离与航行速度之间的关系^[21]如式(38)所示。

$$D'_s = D_s^{-1} + v_i \Delta t \quad (38)$$

$$(1 - \tau_m) D_s \leq D'_s \leq (1 + \tau_m) D_s \quad (39)$$

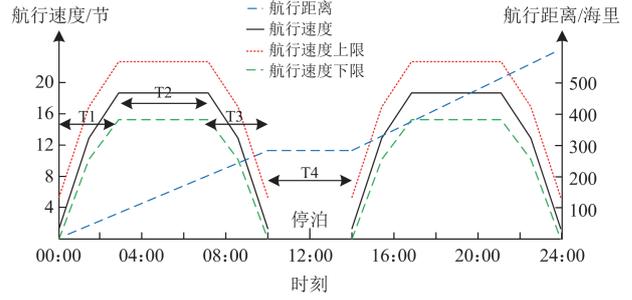


图 2 船舶航行模式

Fig. 2 Ship navigation mode

式中: D'_s 为船舶在 t 时刻航行的距离; v_i 表示船舶在 t 时刻航行的速度; D_s 表示初始港口到下个港口的距离; τ_m 表示港口间距离的允许误差。

船舶在海上航行时, 船舶的航行速度应处于规定航速上下限之间, 航速约束如式(40)所示。

$$v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max} \quad (40)$$

式中: v_i^{\max} 、 v_i^{\min} 分别表示船舶航行速度的最大、最小值。

根据船舶航行的速度可以求出船舶在不同时刻所需的推进负荷, 不同船速对应不同的推进功率^[22], 如式(41)所示。

$$P'_{pl} = c_1 (v_i)^2 \quad (41)$$

式中: P'_{pl} 为 t 时刻的船舶推进功率; c_1 、 c_2 为对应系数, 一般取为 0.003、3^[23]。从式(41)可以看出, 船舶的航速可以代表不同的航行状态, 如 $v_i = 0$ 时, 船舶的推进功率为 0, 此时船舶处于停泊状态。

2 双层规划模型

1) 目标函数

本文所构建的考虑碳排放的交直流混合船舶综合能源系统双层优化模型综合考虑了船舶运营的经济性、环保性以及供能可靠性。上层以总成本最小为目标函数, 包括设备年投资成本、维护成本、燃料成本、机组启停成本以及岸电成本, 下层以总运维成本和碳排放量最小为目标函数。

上层规划的目标函数表示为

$$\min C_p = C_{IN} + x_D \sum_{t \in N_T} (C'_{OM} + C'_{FU} + C'_{ST} + C'_{CI}) \Delta t \quad (42)$$

式中: C_p 为系统的总成本; C_{IN} 为系统的年投资成本; C'_{OM} 为 t 时刻系统的维护成本; C'_{FU} 为 t 时刻系统的所需柴油和天然气的燃料成本; C'_{ST} 为 t 时刻系统的机组启停成本; C'_{CI} 为 t 时刻系统向外购电的岸

电成本； x_D 表示船舶在一年内的航行天数； N_T 为船舶航行调度时间间隔集合。

下层的目标函数表示为

$$\begin{cases} \min C_{OP} = \sum_{t \in N_T} (C_{OM}^t + C_{FU}^t + C_{ST}^t + C_{CI}^t) \Delta t \\ \min G_{EN} = \sum_{t \in N_T} G_{EN}^t \Delta t = \sum_{t \in N_T} (\sum_{n \in N_n} G_{dg,n}^t + G_{gt}^t) \Delta t \end{cases} \quad (43)$$

式中： C_{OP} 为系统的总运维成本； G_{EN} 为系统的总碳排放量； G_{EN}^t 为 t 时刻设备产生的气体排放量之和； $G_{dg,n}^t$ 表示 t 时刻 DG 的气体排放量； G_{gt}^t 表示 t 时刻 GT 的碳排放量。

其中，年投资成本为

$$C_{IN} = C_{in,pv} + C_{in,dg} + C_{in,cchp} + C_{in,ec} + C_{in,z} \quad (44)$$

$$C_{in,cchp} = C_{in,gt} + C_{in,hb} + C_{in,ac} \quad (45)$$

维护成本为

$$C_{OM}^t = C_{om,pv}^t + C_{om,dg}^t + C_{om,cchp}^t + C_{om,ec}^t + C_{om,z}^t \quad (46)$$

$$C_{om,cchp}^t = C_{om,gt}^t + C_{om,hb}^t + C_{om,ac}^t \quad (47)$$

岸电成本为

$$C_{ci}^t = \eta_{ci} P_{ci}^t \quad (48)$$

式中： C_{ci}^t 为岸电成本； η_{ci} 为岸电效率； P_{ci}^t 表示船舶在 t 时刻的岸电出力。

碳排放量为

$$G_{dg,n}^t = a_{dg,n}^g (P_{dg,n}^t)^2 + b_{dg,n}^g P_{dg,n}^t + c_{dg,n}^g \sigma_{dg,n}^t \quad (49)$$

$$G_{gt}^t = \kappa_{gt} P_{gt}^t \quad (50)$$

式中： $a_{dg,n}^g$ 、 $b_{dg,n}^g$ 、 $c_{dg,n}^g$ 为 DG 的燃料成本系数； κ_{gt} 为 GT 的单位碳排放系数。

2) 约束条件

在系统能量平衡约束中，系统含有电、热、冷 3 种负荷需求，在运行的每个时刻，设备供给都应满足负荷需求，因此对应的系统能量平衡约束如式(51)~式(54)所示。

$$P_{pl}^t + P_{sle}^t = P_{pv}^t + \sum_{n \in N_n} P_{dg,n}^t + P_{gt}^t + P_{ci}^t + \quad (51)$$

$$P_{EES,dis}^t - P_{ec}^t - P_{EES,ch}^t$$

$$Q_{slh}^t = Q_{hb}^t + P_{TES,dis}^t - P_{TES,ch}^t - Q_{ac,h}^t \quad (52)$$

$$Q_{sle}^t = Q_{ec}^t + Q_{ac,c}^t + P_{CES,dis}^t - P_{CES,ch}^t \quad (53)$$

$$0 \leq P_{ci}^t \leq P_{ci}^{\max} \quad (54)$$

式中： P_{sle}^t 表示船舶在 t 时刻的生活用电负荷； Q_{slh}^t 表示船舶在 t 时刻的热负荷； Q_{sle}^t 表示船舶在 t 时刻的冷负荷； P_{ci}^{\max} 表示船舶最大岸电出力。

3 模型求解

上述模型中存在一些非线性方程，如式(5)、式(6)、式(9)、式(10)、式(33)、式(41)和式(49)，将这些非线性方程进行线性化处理，对设备运行特性约束条件进行简化，使之从混合整数非线性规划模型转化为混合整数线性规划模型(mixed-integer linear programming, MILP)^[24]。

利用非线性项的分段线性化处理式(5)、式(33)、式(41)和式(49)。

$$\bar{y}_{x_m'}^t = \sum_{m \in N_R} (k_m x_m^t + l_m \gamma_m^t) \quad (55)$$

$$k_m = (y_{x_{m+1}}^t - y_{x_m}^t) / (x_{m+1} - x_m) \quad (56)$$

$$l_m = y_{x_m}^t - x_m k_m \quad (57)$$

$$x_m \gamma_m^t \leq x_m^t \leq x_{m+1} \gamma_m^t \quad (58)$$

$$\sum_{m \in N_R} l_m \gamma_m^t \leq 1 \quad (59)$$

式中： $y_{x_{m+1}}^t$ 和 $\bar{y}_{x_m'}^t$ 分别为起始点和近似线性化函数； m 是区块的索引； N_R 为区块的总数； k_m 和 l_m 分别是线性函数的斜率和截距； x_m 是第 m 段的起始点； γ_m^t 是第 m 段的二进制状态(0-1 变量)。

式(6)的线性化处理：将最大函数分离为两个单独的部分。

$$C_{ST}^t \geq 0 \quad (60)$$

$$C_{ST}^t \geq \sum_{n \in N_n} (\sigma_{dg,n}^t - \sigma_{dg,n}^{t-1}) \theta_{dg,n}^\sigma \quad (61)$$

式(9)的线性化处理如下所示。

$$\begin{cases} \sum_{t \in G_n} (1 - \sigma_{dg,n}^t) = 0, \\ G_n = \min[N_T, (T_{dg,n}^{\text{up},\min} - T_{dg,n}^{\text{up}0}) \sigma_{dg,n}^0] \end{cases} \quad (62)$$

$$\begin{cases} \sum_{w \in (t, t+T_{dg,n}^{\text{up},\min}-1)} \sigma_{dg,n}^w \geq T_{dg,n}^{\text{up},\min} [\sigma_{dg,n}^t - \sigma_{dg,n}^{t-1}], \\ w = G_n + 1 \cdots N_T - T_{dg,n}^{\text{up},\min} + 1 \end{cases} \quad (63)$$

$$\begin{cases} \sum_{w \in (t, N_T)} [\sigma_{dg,n}^w - (\sigma_{dg,n}^t - \sigma_{dg,n}^{t-1})] \geq 0, \\ w = N_T - T_{dg,n}^{\text{up},\min} + 2 \cdots N_T \end{cases} \quad (64)$$

式中： w 是标记发电机开/关时间的周期指数； $T_{dg,n}^{\text{up}0}$ 是在运行前 DG 开启时间； $T_{dg,n}^{\text{up},\min}$ 是 DG 最小开启时间； G_n 是船舶运行开始时发电机清零的开启时间。式(10)的线性化处理如下。

$$\begin{cases} \sum_{t \in L_n} \sigma_{dg,n}^t = 0, \\ L_n = \min[N_T, (T_{dg,n}^{\text{down},\min} - T_{dg,n}^{\text{down}0}) (1 - \sigma_{dg,n}^0)] \end{cases} \quad (65)$$

$$\begin{cases} \sum_{w \in (t, t+T_{dg,n}^{down, \min}-1)} [1-\sigma_{dg,n}^t] \geq T_{dg,n}^{down, \min} [\sigma_{dg,n}^{t-1} - \sigma_{dg,n}^t], \\ w = L_n + 1 \cdots N_T - T_{dg,n}^{down, \min} + 1 \end{cases} \quad (66)$$

$$\begin{cases} \sum_{w \in (t, N_T)} [1-\sigma_{dg,n}^t - (\sigma_{dg,n}^t - \sigma_{dg,n}^{t-1})] \geq 0, \\ w = N_T - T_{dg,n}^{down, \min} + 2 \cdots N_T \end{cases} \quad (67)$$

式中: $T_{dg,n}^{down, 0}$ 表示 DG 在运行前的关机时间; $T_{dg,n}^{down, \min}$ 表示 DG 的最小关机时间; L_n 表示船舶运行开始时发电机清零的关闭时间。

船舶协调运行模型在经过线性化后, 可转化为 MILP 问题, 并能利用 CPLEX 等成熟的工业级求解器进行高效求解。求解流程如图 3 所示。

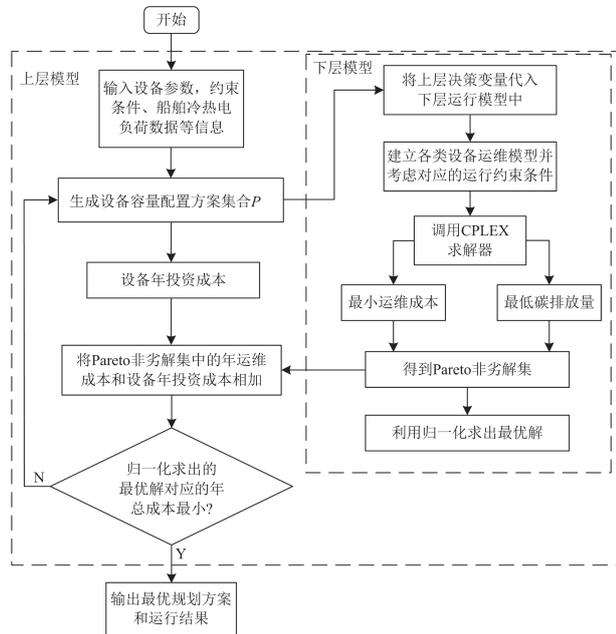


图 3 求解流程图

Fig. 3 Solution flow chart

4 算例分析

4.1 算例设置

本文以某大型旅游邮轮为研究对象, 其在两个港口间来回巡航, 主要用于夏季观光旅游。总航程共分为 2 段: 第一段从辽宁省 A 港到山东省 B 港, 标准航程共 184 海里, 航行时间为 06:00—16:00(10 h); 第二段从 B 港返回 A 港, 航行时间为 20:00—06:00 (第二天)。其中, 在 16:00—20:00 时段, 船舶到达 B 港靠岸停泊, 乘客将前往港口附近的城市旅行 4 h。总共有 48 个调度时刻(24 h), 每 0.5 h 调度一次。规划周期为 20 年。该船舶的航行路线和航行距离如图 4 所示。



图 4 航行路线图

Fig. 4 Navigation route map

航行区域的太阳辐照强度和室外温度如图 5 所示。在一年航行期间, 船舶上每个月的电力消耗基本持平, 基本无巨大变化, 冷负荷和热负荷会随季节的不同而变化, 一般变化范围较大。考虑到研究对象是夏季观光船舶, 航行时间为 7 月—9 月, 共计 90 天, 由于夏季天气炎热, 此时船舶对冷负荷需求量较大, 相反热负荷需求基本为 0, 因此该豪华邮轮负荷需求只包含电负荷和冷负荷, 全航程各时刻的冷负荷和电负荷如图 6 所示, 其中最大生活用电负荷为 11.18 MW, 最大动力负荷为 23.17 MW, 最大冷负荷为 14.41 MW。船用柴油发电机的基本参数以及燃油和环境参数见附录 A 表 A1, 储能设备的基本参数见附录 A 表 A2, 能源转换设备参数见附录 A 表 A3, 表 1—表 3 为相关设备的基本参数^[25-29]。

4.2 过程性仿真

船舶航行过程中的冷、电负荷平衡分别如图 7 和图 8 所示。

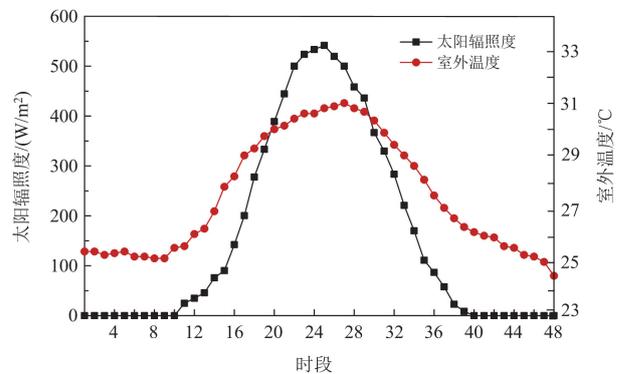


图 5 航行区域太阳辐照度和室外温度

Fig. 5 Solar irradiance and outdoor temperature in the navigation area

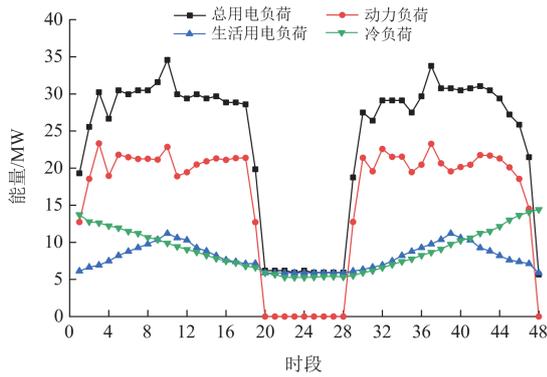


图 6 船舶冷、电负荷需求

Fig. 6 Ship cooling, heating and power load demand

表 1 电转热/冷装置的参数

Table 1 Parameter settings of electric to heating/cooling device

设备名称	投资成本/(元/kW)	运维成本/(元/kWh)	效率	寿命/年
EC	997.6	0.008	4	20

表 2 CCHP 设备的基本参数

Table 2 Basic parameters of CCHP equipment

设备名称	投资成本/(元/kW)	运维成本/(元/kWh)	效率	寿命/年
GT	3096	0.0068	0.85	20
AC	1765	0.008	1.2	20
HB	1228	0.006	0.8	20

表 3 其他基本参数

Table 3 Other basic parameters

参数	数值
单位岸电价格/(元/kWh)	1.58
燃气轮机的单位气体排放系数/(kg/kW)	184
天然气价格/(元/kW)	0.362
CCHP 热电比	2.18

在冷负荷方面, EC、CES 和 CCHP 共同满足负荷需求, 由于 EC 出力较为灵活, 作为补偿输出。除了常规负荷和推进负荷外, 电力系统还满足制冷的电力需求。DG 是 SMES 的主要电源, 在航行过程中一直有至少一个机组在运行, CCHP 和 EES 作为补充电源, 灵活地出力以满足负荷需求。在 B 港停泊时, 电能主要由岸电和 CCHP 机组供应, 以减少能源消耗和碳排放。

表 4 规划成本对比

Table 4 Comparison of planning cost

方法	年投资成本/万元	维护成本/万元	燃料成本/万元	岸电成本/万元	机组启停成本/万元	总运维成本/万元	总成本/万元	碳排放量/t
方法一	723.83	1.247	74.786	7.276	1.548	84.857	8360.96	138.86
方法二	1090.5	1.074	66.32	7.276	2.03	76.7	7993.86	123.02
方法三	1673.522	1.297	62.37	3.960	2.202	69.829	7958.132	119.89
方法四	1877.02	1.311	60.13	5.09	2.202	68.733	8062.99	114.26

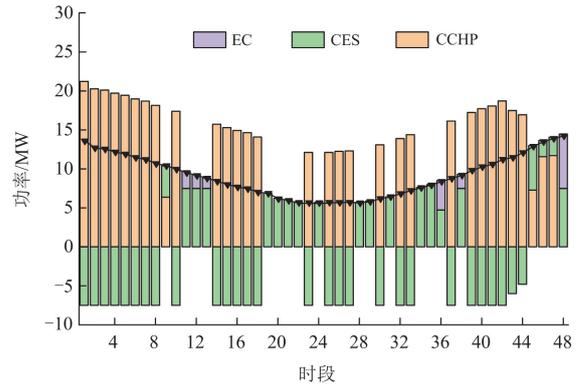


图 7 SMES 冷负荷平衡

Fig. 7 Cooling load balancing of SMES

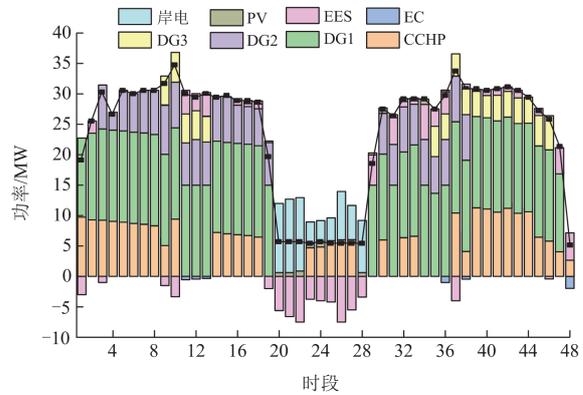


图 8 SMES 电负荷平衡

Fig. 8 Electrical load balancing of SMES

可以观察到, 在整个航行过程中, 冷、电负荷均保持平衡, 从而证实了 SMES 规划方法的有效性。

4.3 对比仿真

本文采用以下 4 种方法进行对比仿真。

方法一: 不考虑碳排放的多能源系统独立规划;

方法二: 不考虑碳排放的 SMES 联合规划方法;

方法三: 不考虑碳排放的使用双层优化的 SMES 联合规划方法;

方法四: 考虑碳排放的使用双层优化的 SMES 联合规划方法, 即本文方法。

上述 4 种方法的规划结果如表 4 和表 5 所示。

表 5 设备容量配置结果对比

Table 5 Comparison of equipment capacity configuration results

设备	方法一	方法二	方法三	方法四
DG1/MW	15	15	15	15
DG2/MW	15	7.5	7.5	7.5
DG3/MW	7.5	7.5	7.5	5
CCHP/MW	0	10	10	12
EC/MW	5	2	2	2
EES/MWh	0	0	15	20
CES/MWh	0	0	15	25
PV/m ²	0	0	4500	4000

4.3.1 方法一和方法二的对比分析

为验证本文联合规划的必要性, 对比方法一和方法二在设备投资、运维成本、燃料成本和碳排放等方面的规划结果。

从表 4 可以看出, 方法二的年投资成本比方法一增加了 366.67 万元。主要原因是, 虽然通过联合规划减少了 DG 和 EC 的容量配置, 但接入 CCHP 机组, 特别是 GT, 导致初期投资大幅增加。CCHP 设备的投资成本较高, 但其在后期运营中能够通过提高能源效率来弥补这一增加的成本。具体来说, CCHP 机组通过同时提供电力和热能, 降低了对柴油发电机和电制冷机的需求, 因此减少了这部分设备的容量配置。

对于运维成本和燃料成本, 方法二相比方法一分别减少了 1730 元和 8.466 万元, 碳排放量降低了 15.84 t。这主要得益于联合规划所实现的能源梯级利用效率提升。CCHP 机组中的 GT 能够在船舶加速和匀速航行阶段提供额外的电力, 替代部分 DG 的负荷需求, 减少了对 DG 的依赖, 从而有效降低了其燃料消耗和碳排放。此外, CCHP 的余热回收功能也提升了能源的利用效率, 从而进一步减少了船舶的总体能源消耗和碳排放。

在机组启停成本方面, 方法二增加了 4820 元, 原因在于联合规划时, GT 与 DG 配合提供电力。在负荷需求较低时, 系统选择关闭部分柴油发电机, 以降低燃料消耗, 但由于机组启停次数较多, 导致了较高的启停成本。虽然这一部分成本上升, 但通过减少对传统柴油发电机的依赖, 能够有效降低系统长期的燃料消耗, 从而实现更低的运维成本。

从容量配置来看, 联合规划使得系统能够减少对 DG 和 EC 的单独依赖。CCHP 机组能够通过冷热电能量梯级利用原理, 可同时高效满足船舶的热负荷和电力负荷需求, 进一步提升了系统的能源利

用效率。尽管引入 CCHP 设备增加了投资成本, 但通过减少对其他设备的需求, 使得整体系统的容量配置更加优化, 降低了能源设备的过剩配置。

总的来说, 联合规划方法通过 GT 和 DG 的协调配合, 有效降低了对柴油的消耗, 减少了燃料成本, 显著降低了运维成本, 从而使得整体系统的总成本降低, 同时在实现碳减排方面也表现出明显的优势。

4.3.2 方法二和方法三的对比较分析

为验证本文基于规划-运行的双层优化方法的有效性, 对比了方法二和方法三在规划结果方面的不同。

由表 5 可知, 和方法二相比, 方法三中新增加的 EES、CES 和 PV 导致了年投资成本明显增加。这是因为方法三引入了规划-运行联合优化, 使得系统在航行过程中更为灵活, 能够动态调节各类设备的出力。在航行的减速阶段, 负荷需求较低时, 系统通过 DG 与 EES 配合供电, 同时接入 CES 进行负荷调节。此时, CCHP 中的 AC 和 EC 还可以配合提供冷负荷, 充分利用 EES 和 CES 的双向能量流动特性, 提高了系统在不同负荷状态下的运行灵活性和能效, 从而使得船舶在航行过程中能实现更高效的能源调度。

在燃料成本和岸电成本方面, 方法三的成本较方法二有所降低, 分别减少了 3.95 万元和 3.316 万元。其关键原因在于: 1) EES 与 DG 的协同供电。在航行减速阶段, EES 能够储存并释放电能, 使 DG 负荷保持在高效区间, 从而减少了低负荷运行时的油耗。2) CES 的负荷调节能力。CES 在不同时段调整负荷分配, 优化能源供应结构, 减少了岸电的高峰需求。3) PV 系统的引入。通过光伏发电降低了对柴油机供电的依赖, 在合适的航行阶段能够部分替代传统发电。

总体来看, 方法三相比方法二总成本减少了 35.728 万元。其原因在于, 方法三采用了规划-运行双层优化, 通过精准调整设备出力, 保障了系统的经济性最优。在满足电、热、冷平衡的前提下, 系统能够根据各类负荷的时间特性进行调整, 优化各设备的出力策略, 使得船舶在航行时的运行总成本降到最低。双层优化不仅提升了系统的整体运行效率, 还减少了能源浪费, 优化了系统的能效并且提高了经济效益。

4.3.3 方法三和方法四的对比较分析

为验证本文考虑碳排放的必要性, 对比了方法三和方法四在规划结果方面的差异。

由表 4 可知, 相比于方法三, 方法四中的年投

资成本增加了 203.498 万元。这是由于方法四在规划中增加了 CCHP、EES 和 CES 的容量，分别为 2 MW、5 MW 和 10 MW。尽管 DG3 和 PV 的容量分别减少了 2.5 MW 和 500 m²，整体来看，CCHP、EES 和 CES 的单位投资成本较高，导致了投资成本的增加。

具体来说，方法四在采用规划-运行双层优化时，充分考虑了碳排放最小化目标，因此提高了 EES 的容量配置。通过增加 EES 容量，可以在船舶靠岸时进行大量充电，虽然增加了 EES 的投资成本，但是减少了船舶航行过程中对 DG 和 GT 的依赖。因此，DG3 的容量配置有所下降，优化后的系统减少了对传统柴油发电机的需求。

相比于方法三，方法四在维护成本和岸电成本方面分别增加了 140 元和 1.13 万元。这一变化的原因在于，方法四考虑碳排放目标，增加了 EES 和 CES 的配置容量，EES 的增大使得系统能存储更多电能以供后续使用。为了实现这一目标，系统需要增加购电来满足 EES 充电需求，因此导致了岸电成本的上升。这一增加的成本主要是由于增加了岸电的使用，而这种支出在运行过程中是合理的，因为它帮助进一步降低了船舶对 DG 和 GT 的依赖。

对于燃料成本和碳排放量，方法四相比于方法三分别降低了 2.24 万元和 5.63 t。这一变化的根本原因在于，方法四通过增加 CCHP、EES 和 CES 的容量配置，减少了系统对 DG 供电的依赖。在航行过程中，CCHP 和 EES 等设备能够提供更多清洁能源，替代柴油发电机的运行，从而降低了 DG 的燃料消耗。这不仅降低了船舶的燃料成本，还减少了

船舶运行过程中的碳排放量，显著提高了系统的环保效益。

综上所述，尽管方法四相比于方法三总成本增加了 104.858 万元，但由于优化了能源结构和引入了清洁能源设备，碳排放量降低了 5.63 t，证明了在考虑碳排放后，尽管短期内系统的经济性有所下降，但长期而言，提高了 SMES 的环保效益并增强了可持续发展潜力。这表明，在当前全球航运业面临绿色转型的背景下，考虑碳排放量对于船舶综合能源系统的优化具有重要意义。

5 结论

本文建立 SMES 系统的规划-运行双层优化模型并完成求解。对特定季节下 SMES 的最优容量配置、经济运行策略以及环保运行策略进行详细分析，利用 CPLEX 求解器将线性化后的 MILP 问题进行求解，获得相应的 SMES 容量配置结果。其具体结论如下：

1) 相比于船舶多能源系统独立规划，本文利用 CCHP 机组进行能源间的联合规划，其中 GT 既可以供电也可以和 HB 配合提供热负荷，不仅降低了总电负荷对 DG 的需求，同时提高了船舶耗能设备的运行效率，从而降低系统的总一次能源消耗量，提高了 SMES 的经济性。

2) 本文考虑碳排放并采用规划-运行双层优化方法，加入了不产生碳排放的清洁能源设备，降低了碳排放，提高了规划方法的环保效益，同时储能设备和 CCHP 配合使用可以提高系统运行的灵活性，从而提高系统的经济性。

附录 A

表 A1 船用柴油发电机的基本参数以及燃油和环境参数

Table A1 Basic parameters of marine diesel generator, and fuel and ambient parameters

柴油发电机	单位投资成本/(元/kW)	单位运维成本/(元/kWh)	单位机组启停成本/元	最小出力/kW	电效率	寿命/年	燃料成本系数($\times 10^3$)			气体排放系数	
							元/(MW) ² 、元/MW、元	t/(MW) ² 、t/MW、t			
DG1	2064	0.022	4128	4000	0.76	20	9.464, 1034.229, 13.724	2.027, -100.214, 4191.562			
DG2	2100	0.0165	2408	2500	0.72	20	19.504, 629.635, 11.112	11.076, -60.457, 1350.324			
DG3	2100	0.0165	2408	2500	0.72	20	19.504, 629.635, 11.112	11.076, -60.457, 1350.324			

表 A2 储能设备参数

Table A2 Parameters of energy storage equipment

设备名称	单位投资成本/(元/kWh)	单位运维成本/(元/kWh)	最大/最小储能量	自损耗率	充能/放能效率	寿命/年
EES	1782	8.3	0.9/0.2	0.001	0.95/0.95	10
TES	490	0.2	0.9/0.2	0.01	0.88/0.88	20
CES	100	0.01	0.9/0.2	0.01	0.88/0.88	20

表 A3 能源转换设备参数

Table A3 Parameters of energy conversion equipment

设备类型	单位投资成本/(元/kW)	单位运维成本/(元/kWh)	性能系数	寿命/年
AC	1128	0.008	1.2	20
EC	829	0.008	4	20
HB	570	0.006	0.8	20

参考文献

- [1] TAO Y, QIU J, LAI S, et al. Flexible voyage scheduling and coordinated energy management strategy of all-electric ships and seaport microgrid[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(3): 3211-3222.
- [2] 李忠文, 李沛阳, 程志平, 等. 孤岛模式下交直流混合微电网互联变流器新型控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(21): 50-59.
- LI Zhongwen, LI Peiyang, CHENG Zhiping, et al. A novel control strategy for an interlinking converter in an islanded hybrid AC/DC microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(21): 50-59.
- [3] 黄冬梅, 吕嘉欣, 时帅, 等. 计及需求响应的海岛微电网群优化运行研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 88-98.
- HUANG Dongmei, LÜ Jiaxin, SHI Shuai, et al. Optimal operation of island microgrid clusters considering demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 88-98.
- [4] 赵娜, 张莲, 王士彬, 等. 并网型风光氢储微电网容量优化配置[J]. *湖南电力*, 2023, 43(4): 48-55.
- ZHAO Na, ZHANG Lian, WANG Shibin, et al. Capacity optimization configuration of grid-connected wind-solar-hydrogen-storage microgrid[J]. *Hunan Electric Power*, 2023, 43(4): 48-55.
- [5] 唐立行, 罗朝旭, 文永兴, 等. 光伏直流微电网的并离网无缝切换控制策略研究[J]. *湖南电力*, 2024, 44(2): 122-128.
- TANG Lixing, LUO Zhaoxu, WENG Yongxing, et al. Research on seamless switching control strategy of grid connected and off for photovoltaic DC microgrids[J]. *Hunan Electric Power*, 2024, 44(2): 122-128.
- [6] 姜昊, 孙毅超, 张艺凡, 等. 集群式岸电能量路由器供能精细化就地管控策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(11): 31-41.
- JIANG Hao, SUN Yichao, ZHANG Yifan, et al. Refined local energy management strategy for clustered shore power energy routers[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(11): 31-41.
- [7] AMJAD A M, DRAGICEVIC T, MENG L, et al. Optimal planning and operation management of a ship electrical power system with energy storage system[C]// *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, October 23-26, 2016, Florence, Italy: 2095-2099.
- [8] HARDAN F, TRICOLI P. Optimization and control of electric ship microgrids with short-term energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10(3): 4734-4745.
- [9] 胡瀚文, 王杰, 邵能灵, 等. 船舶混合电站柴储协同调频双层模型预测控制方法[J]. *上海交通大学学报*: 1-23[2024-12-26]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.390>
- HU Hanwen, WANG Jie, TAI Nengling, et al. Dual-layer model predictive control method for ship hybrid power station diesel-storage coordinated frequency regulation[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*: 1-23[2024-12-26]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.390>
- [10] 姚文龙, 裴春博, 池荣虎, 等. 基于智能自学习控制的船舶微电网预同步控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6): 82-93.
- YAO Wenlong, PEI Chunbo, CHI Ronghu, et al. ship microgrid pre-synchronization control strategy based on intelligent self-learning control[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 82-93.
- [11] LIN A, WEN S, ZHU M, et al. Risk-aware coordination of logistics scheduling and energy management for maritime mobile microgrid clusters[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024, 9(1): 752-763.
- [12] WEN S, ZHAO T, TANG Y, et al. Coordinated optimal energy management and voyage scheduling for all-electric ships based on predicted shore-side electricity price[J]. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2021, 57(1): 139-148.
- [13] 李康斌, 朱齐丹, 牟进友, 等. 基于改进DDQN船舶自动靠泊路径规划方法[J]. *智能系统学报*: 1-7[2024-12-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20241211.1826.002.html>
- LI Kangbin, ZHU Qidan, MOU Jinyou, et al. Ship automatic docking path planning method based on improved DDQN[J]. *Journal of Intelligent Systems*: 1-7[2024-12-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20241211.1826.002.html>

- 1826.002.html
- [14] 王群朋, 李龙浩, 关宏旭, 等. 基于三维势场模型的船舶局部路径规划方法[J]. 中国舰船研究: 1-12[2024-12-26]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04076>
WANG Qunpeng, LI Longhao, GUAN Hongxu, et al. Local path planning method for ships based on three-dimensional potential field model[J]. Journal of Chinese Ship Research: 1-12[2024-12-26]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04076>
- [15] FANG S, XU Y, LI Z. Optimal sizing of shipboard carbon capture system for maritime greenhouse emission control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5543-5553.
- [16] YAO C, CHEN M, HONG Y. Novel adaptive multi-clustering algorithm-based optimal ESS sizing in ship power system considering uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 307-316.
- [17] MAJIDI M, NOJAVAN S. Optimal sizing of energy storage system in a renewable-based microgrid under flexible demand side management considering reliability and uncertainties[J]. Journal of Operation and Automation in Power Engineering, 2017, 5(2): 205-214.
- [18] ASHOK S. Optimised model for community-based hybrid energy system[J]. Renewable Energy, 2007, 32(7): 1155-1164.
- [19] 廖卫强, 俞万能, 张认成. 基于能量实时协调控制的船舶微电网电源优化配置[J]. 中国造船, 2017, 58(4): 191-202.
LIAO Weiqiang, YU Wanneng, ZHANG Rencheng. Optimal configuration of ship microgrid power sources based on real-time energy coordination control[J]. Chinese Shipbuilding, 2017, 58(4): 191-202.
- [20] LI Y, LIU X, ZHAO Y, et al. Optimization design of hybrid energy storage capacity configuration for electric ship[J]. Energy Reports, 2024, 11: 887-894.
- [21] LI Z, XU Y, FANG S. Robust coordination of a hybrid AC/DC multi-energy ship microgrid with flexible voyage and thermal loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2782-2793.
- [22] 朱明科. 船舶微电网运行控制研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [23] 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.
- [24] LI Z, YAN X. Optimal coordinated energy dispatch of a multi-energy microgrid in grid-connected and islanded modes[J]. Applied Energy, 2018, 210: 974-986.
- [25] WAN C, XU Z, PINSON P, et al. Probabilistic forecasting of wind power generation using extreme learning machine[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1033-1044.
- [26] 林泽源, 王宗尧, 张凡, 等. 考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法研究[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 78-87.
LIN Zeyuan, WANG Zongyao, ZHANG Fan, et al. Research on optimization method for energy storage capacity configuration in photovoltaic DC micro grid considering hydrogen energy application[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 78-87.
- [27] THEOTOKATOS G, RENTIZELAS A, GUAN C, et al. Waste heat recovery steam systems techno-economic and environmental investigation for ocean-going vessels considering actual operating profiles[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 267.
- [28] 刘延博, 邱晓燕, 邱高, 等. 孤岛运行下含储能系统的微电网多代理博弈模型[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 75-81.
LIU Yanbo, QIU Xiaoyan, QIU Gao, et al. Multi-agent game model of micro-grid containing energy storage system in islanding operation[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 75-81.
- [29] YANG N, SHEN X, LIANG P, et al. Spatial-temporal optimal pricing for charging stations: a model-driven approach based on group price response behavior of EVs[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(4): 8869-8880.

收稿日期: 2024-12-28; 修回日期: 2025-04-22

作者简介:

杨楠(1987—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制、电力系统规划、电力系统的机组组合、主动配电网; E-mail: ynyyayy@ctgu.edu.cn

徐国彬(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划; E-mail: 2235266122@qq.com

代洲(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力装备制造、电网供应链韧性、智慧仓储物流及逆向物流。E-mail: daizhou87@qq.com

(编辑 魏小丽)