

# 基于电氢耦合和需求响应的 海岛微网优化运行

作品类别: 研究论文类

作品编号: ECC-2024-06888

作品赛道: 本科生 研究生

**摘要：**加快海岛经济开发和建设，对于促进海洋开发及国防建设等都具有重大战略意义。传统的离网和并网式海岛电力供应方式难以满足开发和建设需求，亟需构建清洁低碳、安全充裕、经济高效的海岛微网运行模式。为此，本项目开展基于电氢耦合和需求响应的海岛微网优化运行方法。首先，构建含电氢耦合储能的百分百可再生能源并网式海岛微网架构，分析各类电源及氢储特性并分别建模。其次，以最大化新能源消纳量和周期总利润、最小化购电碳排放为目标，考虑发电机组额定功率、储氢罐最大容量等约束，构建海岛微网优化运行模型，并针对优化模型设计了高效率、高精度的罚函数—自适应粒子群优化算法(Penalty Function - Adaptive Particle Swarm Optimization, PF-APSO)求解模型，得到电氢耦合储能控制策略、需求响应价格及相对减少的碳排放量。最后，以东部某典型海岛为例开展仿真验证，证明所提出方法在不同场景下均能有效提高新能源消纳和总利润，降低外购电碳排放。

**关键词：**电氢耦合；需求响应；海岛微网；PF-APSO；优化运行

**Abstract:** Expediting the economic development and infrastructural advancement of islands assumes pronounced strategic significance in the context of fostering maritime progress and fortifying national defense. Conventional off-grid and grid-connected power supply methodologies for islands encounter challenges in meeting the exigencies of developmental pursuits, compelling the imperative creation of a microgrid operational paradigm tailored for islands that is characterized by cleanliness, low-carbon attributes, security, and economic efficiency. Within the purview of this research endeavor, we present a methodological approach for optimizing the operation of island microgrids, predicated on the synergy between hydrogen and electricity, coupled with a responsiveness to demand. Initially, we formulate a grid-connected island microgrid architecture rooted in completely renewable energy sources, incorporating hydrogen-electric coupling energy storage. This involves a comprehensive analysis of characteristics and the modeling of diverse power sources and hydrogen storage mechanisms. Subsequently, with objectives centered on maximizing the assimilation of new energy, optimizing cumulative profit, and minimizing carbon emissions resultant from purchased electricity, we construct an optimization model for the operation of island microgrids. This model takes into account constraints such as generator rated power and hydrogen storage tank capacity. To solve this intricate model, a Penalty Function—Adaptive Particle Swarm Optimization (PF-APSO) with high efficiency and accurate precision is designed for the optimization model by us. The outcomes encompass discerned control strategies pertaining to hydrogen-electric coupling energy storage, demand response pricing, and the proportional reduction in carbon emissions. Lastly, utilizing a representative eastern island as a case study, simulation verification is executed, substantiating the efficacy of the proposed method in augmenting new energy integration and overall profitability, concurrently mitigating carbon emissions originating from purchased electricity in diverse contextual scenarios.

**Keywords:** Hydrogen-electricity coupling; Demand response; Island microgrid; PF-APSO; Optimization operation

## 符号说明

符号	含义	单位
$P_b$	波浪能发电机组输出功率	kW
$P_c$	潮汐流式发电机组输出功率	kW
$P_f$	风力发电机组输出功率	kW
$P_g$	光伏发电系统输出功率	kW
$P_E^{dj}(t)$	$t$ 时刻输入电解槽的电能	kW
$P_H^{dj}(t)$	$t$ 时刻从电解槽输出的氢能	kW
$P_H^{qdc}(t)$	$t$ 时刻输入氢燃料电池的氢能	kW
$P_E^{qdc}(t)$	$t$ 时刻从氢燃料电池输出的电能	kW
$P_H^{cq}(t)$	$t$ 时刻输入储氢罐的氢能	kW
$\Delta P^{TL}$	负荷通过 PBDR 方式实际削减电量	kW
$x$	选择控制需求响应方式的 0-1 逻辑变量	
$P_G$	发电机组在 $t$ 时刻的总输出功率	kW
$P_L$	电力系统在 $t$ 时刻的总负荷	kW
$P_{grid}$	$t$ 时刻向电网传输的电量	kW
$p_{high}$	峰段电价	元/kWh
$p_{mid}$	平段电价	元/kWh
$p_{low}$	谷段电价	元/kWh
$E$	系统的碳排放量	kg
$\chi_e$	燃煤发电机组单位电力消耗碳排放权配额	kg/kWh
$I_{dwe}$	向居民售电收入	元
$I_{grid}$	向电网售电收入	元
$I_{sub}$	新能源政策补贴	元
$I_H$	氢储能政策补贴	元
$I_L$	需求响应政策补贴	元
$I_E$	碳市场交易盈利	元
$C_H$	储能设备运营成本	元
$C_{inv}$	投资成本	元
$C_{man}$	运维损耗成本	元
$C_{rep}$	设备更换成本	元
$C_p$	能源断供惩罚	元

## 一、引言

我国拥有超过 11000 座海岛，占世界海岛总量的十分之一，是名副其实的万岛之国<sup>[1]</sup>。海岛不仅是自然生态的宝库、人类文明的重要载体，也是重要的国防支点。海洋强国、生态文明建设等国家战略和“一带一路”倡议的提出使我国海岛建设规划进入了新阶段<sup>[2]</sup>。海岛建设和开发离不开安全充裕的电力能源供给。我国海岛的电力供给主要有两种形式，离网型微网和并网型微网，离网型完全由岛内燃煤、燃油电厂供电，并网型由海底电缆从大陆输送和岛内电源供电<sup>[3]-[4]</sup>。这样的电力供给方式一方面成本高昂，易受到各种因素的影响，供电可靠性低，另一方面不清洁、碳排放量大，与“双碳”战略背道而驰<sup>[5]</sup>。为此，加快海岛能源生产和消费绿色低碳转型势在必行<sup>[6]</sup>。

从能源资源上来看，海岛的波浪能、潮汐能、洋流能、盐差能等海洋能资源以及海上风光等可再生资源丰富<sup>[7]</sup>。这些能源具有清洁、可再生、储量巨大等优势，是海岛能源转型的理想选择。根据国际能源署海洋能系统（International Energy Agency-Ocean Energy Systems, IEA-OES）测算，每千瓦海洋能装机容量可以减少 CO<sub>2</sub> 排放 1.667t/a。因此，大力开发清洁能源，建设全绿色海岛微网系统是海岛能源转型和发展的关键。

然而，风光等清洁能源具有间歇性、波动性、随机性等特征，且其出力往往与负荷不同时、不匹配，导致海岛在部分时段清洁能源消纳能力不足，大规模弃电，部分时段电力供给严重短缺，大规模断电，严重制约了海岛建设和发展<sup>[8]-[9]</sup>。为此，推进海岛微网源网荷储协同运行，调动各类电力资源调节能力，提高可再生能源利用率、降低运行成本是海岛微网建设发展的重点。

为此，国内外学者已开展大量研究，并取得了一系列成果。文献[10]结合储能与可控负荷潜力，提出日前与日内相结合的滚动优化调度法，提升微网运行经济性。文献[11]引入海水淡化装置，构建风/光/柴/储等多电源组合，采用混沌搜索算法优化电源配置。文献[12]针对特定海岛，引入抽水蓄能装置，计及负荷响应，利用粒子群算法求解设备最优配置。文献[13]建立网络潮流、氢热储能等模型，强化源侧风光储互补，优化综合需求响应，降低运行成本。文献[14]以提高风光利用率、降低碳排放为目标，建立含氢储能和海水源热泵的海岛微电网，采用 NSGA-III 算法进行多目标优化。但是现有研究大多聚焦于短周期内资源协同互补，并未考虑跨季节、长周期的能量调度优化，具有一定局限性。

氢储能由于具有长时储能的特点，能够兼顾储能系统快速响应以及长期输出的能力<sup>[15]-[16]</sup>，逐渐成为新能源消纳和绿色存储的优选方案之一。此外，海岛具有大量海水资源，能直接为制氢提供大量原材料，成本更具优势<sup>[17]</sup>。因此，随着电解制氢及储氢技术的日益成熟，将氢储能系统引入到海岛微网中是一个可行的办法。

除氢电耦合外，需求响应也是保障电力供需平衡稳定的重要措施。需求响应利用经济和技术手段调节电能使用方式、时间等，可大幅提升供能侧与用能侧的双向互动以缓解系统调峰压力，进而提升系统的灵活性和运行经济<sup>[18]-[19]</sup>。同时，电力需求响应作为一种市场行为，市场主体可以通过减少用电获得经济补偿，减少用电成本<sup>[20]</sup>。随着智能家居的发展以及电动汽车的推广运用，可控的需求侧资源将逐年增加。因此，在海岛微网中引入电力需求响应，充分调度电力用户需求响应积极性，对于维持电力的供需平衡和系统的稳定运行具有重要的现实意义。

综合上述分析，立足于提高新能源消纳量和海岛微网运行经济最大化、降低购电碳排放三重目标，结合海岛特有的源荷特点，本文开展基于电氢耦合和需求响应的海岛微网优化运行研究。

## 二、含电氢耦合储能的并网式海岛微网架构及建模

### (一) 海岛微网架构

新型海岛微网架构体系如图 1 所示。相比于陆上微网，海岛微网架构独具特色，其丰富的可再生能源是建设的关键。风能、光能、波浪能以及潮汐能等清洁能源，构成了新型海岛微网主要分布式电源。然而，这些清洁能源出力具有随机性与波动性，对微网的稳定运行构成了挑战。因此，我们引入氢储能系统作为发电侧的储能装置。该系统由制氢设备 (Hydrogen Production Equipment, HPE)、氢储存罐 (Hydrogen Storage Tank, HST) 以及氢燃料电池 (Hydrogen Fuel Cell, HFC) 组成，为微网的稳定运行提供了有力保障。此外，通过海底电缆与陆上大电网相连接，可以有效应对新能源出力的不确定性，并且在岛内用电负荷激增时，陆上电网可以有效分担一部分负荷。

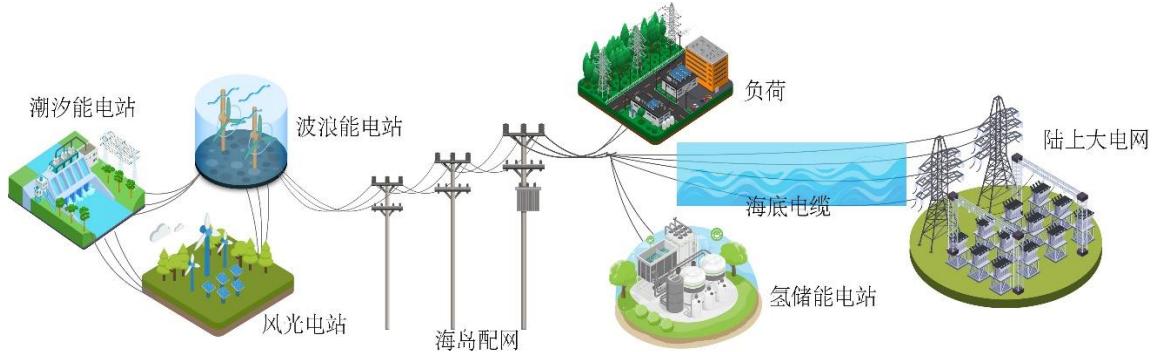


图 1 海岛微网架构体系

在整个海岛微网架构体系中，合理安排海洋可再生能源出力、电力负荷需求、制氢量、向大电网售电量，是提升可再生能源消纳率、优化海岛能源经济的重要手段。海岛系统负荷曲线区分为刚性与柔性，采用分时电价策略诱导用户侧优化用电方式与时间，从而“削峰填谷”，提高电能消纳率。鉴于新能源发电的波动性，在发电不足负荷时，利用氢燃料电池燃烧氢气补充电能；而当电能过剩时，部分盈余电量则在满足储氢约束条件下，电解制氢储存。此外调控后的多余电量通过海底电缆向陆地电网售出，增强海岛微网经济性。

### (二) 电源特性分析及建模

#### 1. 波浪能

波浪能发电数学模型如下：

$$P_b = \eta_b h T_b^2 B \quad (1)$$

其中， $P_b$  为波浪能发电机组输出功率(kW)，波浪能发电机组效率  $\eta_b = 0.5$ ， $B$  是浪宽(m)， $h$ (m) 为波浪高度和  $T_b$ (s) 为波浪周期。且有

$$\begin{cases} h = \alpha v_w^\gamma + \beta \\ T_b = \lambda v_w^\nu + \mu \end{cases} \quad (2)$$

上式中， $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \mu, \nu$ 是待定系数， $v_w$ 为风速(m/s)。波浪能发电功率密度图像如图 2 所示。

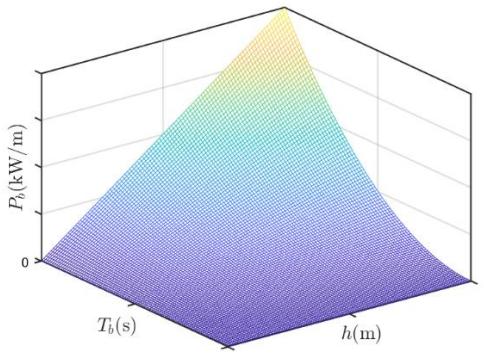


图 2 波浪能发电功率密度图

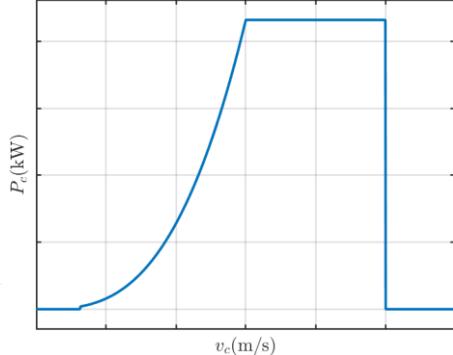


图 3 潮汐能发电功率图

## 2.潮汐能

潮汐能发电输出功率模型如式(3)所示：

$$P_c = \begin{cases} 0 & , v_c > v_c^{out} \\ \eta_c C_{en}^c \rho_{sea} A_c v_{cN}^3 & , v_{cN} \leq v_c \leq v_c^{out} \\ \eta_c C_{en}^c \rho_{sea} A_c v_c^3 & , v_c^{in} < v_c < v_{cN} \\ 0 & , 0 \leq v_c \leq v_c^{in} \end{cases} \quad (3)$$

其中， $P_c$ 为潮汐流式发电机组输出功率(kW)； $v_c, v_c^{in}, v_{cN}, v_c^{out}$ 分别为潮汐流速、潮汐流式发电机组切入速度、额定速度、切出速度(m/s)；潮汐流式发电机组效率 $\eta_c = 0.5$ ；能量捕获因数 $C_{en}^c \in [0.4, 0.5]$ ；海水密度 $\rho_{sea} \in [1.02, 1.07]$  (kg/m<sup>3</sup>)； $A_c$ 是发电机组叶片扫过的区域面积(m<sup>2</sup>)。

通常，潮汐流速概率服从 Wakeby 分布，即

$$v_c = \zeta + \frac{a}{b} [1 - (1 - F)^b] - \frac{c}{d} [1 - (1 - F)^{-d}] \quad (4)$$

上式中， $F$ 为 Wakeby 分布的累积概率密度函数； $a, b, c, d, \zeta$ 为 Wakeby 分布的五个参数，它们可根据历史数据求得。潮汐能发电功率图像如图 3 所示

## 3.风光分布式电源模型

分布式风力及光伏发电数学模型建立如式(5),(6)：

$$P_f = \begin{cases} 0 & , v_f > v_f^{out} \\ P_{fN} & , v_{fN} \leq v_f \leq v_f^{out} \\ P_{fN} \frac{v_f^3 - v_f^{in3}}{v_{fN}^3 - v_f^{in3}} & , v_f^{in} \leq v_f \leq v_{fN} \\ 0 & , v_f < v_f^{in} \end{cases} \quad (5)$$

$$P_g = \delta P_{gm} \frac{G_{avg}}{G_{gm}} [1 + k_{PT} (T_{avg} - T_r)] \quad (6)$$

上式中,  $P_f$  为风力发电机组输出功率(kW);  $v_f$  为风速(m/s);  $P_{fN}$  为风力发电机组额定输出功率(kW);  $v_f^{in}, v_f^{out}$  分别为风速、风力发电机组切入速度、额定速度、切出速度(m/s)。 $P_g$  为光伏发电系统输出功率(kW);  $\delta$  为不确定因素对输出功率的影响程度, 如光伏板清洁程度等;  $P_{gm}$  是光伏电池板最大输出功率(kW);  $G_{avg}$  太阳辐射平均强度; 标准测试条件下太阳能辐射强度  $G_{gm} = 1 \text{ kW/m}^2$ ; 功率温度系数  $k_{PT} = -0.0047/\text{^\circ C}$ ;  $T_{avg}$  为平均温度(°C);  $T_r = 25\text{^\circ C}$ 。

### (三) 电氢耦合储能

设  $t$  时刻输入电解槽的电能为  $P_E^{dj}(t)$ ,  $t$  时刻从电解槽输出的氢能为  $P_H^{dj}(t)$ , 电解槽转化效率为  $\eta_{dj}$ 。记  $t$  时刻输入氢燃料电池的氢能为  $P_H^{qdc}(t)$ ,  $t$  时刻输入储氢罐存储的氢能为  $P_H^{cq}(t)$ ,  $t$  时刻从氢燃料电池输出的电能为  $P_E^{qdc}(t)$ , 氢燃料电池转化效率为  $\eta_{qdc}$ , 则有:

$$\begin{cases} P_H^{dj}(t) = \eta_{dj} P_E^{dj}(t) \\ P_E^{qdc}(t) = \eta_{qdc} P_H^{qdc}(t) \\ P_H^{cq}(t) = P_H^{dj}(t) - P_E^{qdc}(t) \end{cases} \quad (7)$$

电氢耦合储能模型总体结构流程图见图 4:

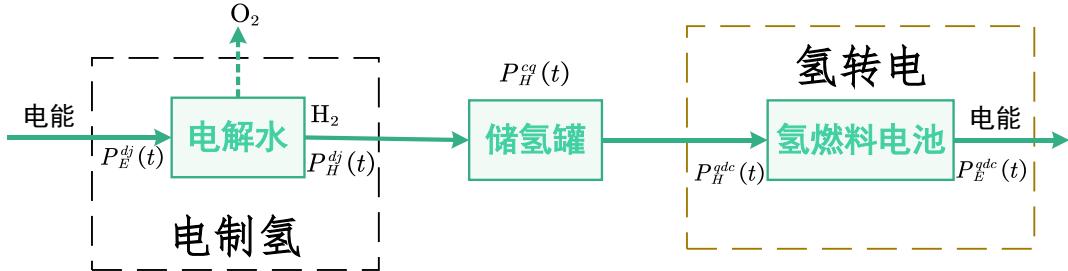


图 4 电氢耦合流程图

## 三、基于需求响应的海岛微网优化运行模型及求解

### (一) 电价型需求响应

在电力系统中, 需求响应 (Demand Response, DR)<sup>[21]</sup> 是一种重要的电力调控手段, 其核心在于根据供电方发出的诱导性政策, 引导用户主动调整用电时间与行为, 来适应供电系统的实时需求。本文采用的是基于分时电价引导的需求响应(Price-Based Demand Response, PBDR)。鉴于海岛负荷中的柔性负荷具有可调控的特性, PBDR 可以有效对负荷进行削峰填谷, 进而促进可再生能源富余电量的有效消纳, 提升可再生能源的整体利用效率。

记  $\Delta P^{TL}(t)$  为  $t$  时刻总体转移负荷,  $P_i^{TL}(t)$  为参与 PBDR 的用户  $i$  在  $t$  时刻的转移前的负荷,  $p_0$  为  $t$  时刻转移前电价,  $M$  为参与 PBDR 的用户总人数,  $t$  时刻电负荷价格需求弹性  $\varepsilon = 0.1$ , 电力系统  $t$  时刻的总刚性负荷为  $P_{RL}(t)$ , 总柔性负荷为  $P_{FL}(t)$ , 总负荷为  $P_L(t)$ , 则有:

$$\Delta P^{TL}(t) = \varepsilon \frac{p_0 - p}{p_0} \sum_{j=i}^M P_j^{TL}(t) \quad (8)$$

$$P_L(t) = P_{RL}(t) + P_{FL} - \Delta P^{TL} \quad (9)$$

## (二) 基于需求响应的海岛系统源网荷储优化调度建模

### 1. 优化目标

共三个优化目标：

(1) 为提高新能源利用率，以新能源发电机组最大消纳为目标：

$$\max W = \sum_{t=0}^T (P_L + P_H^{cq} + \max\{P_{grid}, 0\}) \quad (10)$$

其中， $P_{grid}(t)$ 是 $t$ 时段向大电网传输的电量；若 $P_{grid} < 0$ 则表示向大电网购电。

(2) 对于从大电网购买的电量，本文认为购电均来源于燃煤机组发电，以实际碳排放量最小为目标：

$$\min E = \sum_{t=0}^T (\xi_1 + \xi_2 |\min\{P_{grid}, 0\}| + \xi_3 |\min\{P_{grid}, 0\}|^2) \quad (11)$$

其中， $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ 均为燃煤机组发电碳排放计算参数。

(3) 为确保该海岛微网的经济效益，以周期内的利润最大为目标：

$$\max R = I - C \quad (12)$$

其中，总收益和总成本分别为：

$$I = I_{dwe} + I_{grid} + I_{sub} + I_H + I_L + I_E \quad (13)$$

$$C = C_{inv} + C_{man} + C_{rep} + C_p + C_H \quad (14)$$

上式中， $I_{dwe}$ 是向岛内居民售电所得收益； $I_{grid}$ 是向大电网售电所得收益； $I_{sub}$ 为新能源发电的政策补贴； $I_H$ 为电氢耦合储能的政策补贴； $I_L$ 为需求响应的政策补贴； $I_E$ 是在碳市场交易碳配额所得收益； $C_{inv}$ 是投资成本； $C_{man}$ 是运维损耗成本； $C_{rep}$ 是设备更换成本； $C_p$ 是能源断供惩罚； $C_H$ 是储能设备运营成本。

设需求响应调节后实际电价为 $p(t)$ 元/kWh， $\chi_e$ 为燃煤发电机组单位电力消耗碳排放权配额(kg/kWh)，碳配额交易价格为 $c_E$ (元/kg)，电解槽、氢燃料电池、储氢罐单位成本分别为 $c_1, c_2, c_3$ (元/kWh)，则

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{dwe} = \sum_{t=0}^T p P_L \\ I_{grid} = \sum_{t=0}^T (p_{grid}^{sell} \max\{P_{grid}, 0\} - p_{grid}^{buy} \min\{P_{grid}, 0\}) \\ I_E = c_E \left( \chi_e \sum_{t=0}^T P_G - E \right) \\ C_H = \sum_{t=0}^T (c_1 P_H^{dj} + c_2 P_H^{qdc} + c_3 P_H^{cq}) \end{array} \right. \quad (15)$$

## 2. 约束条件

### (1) 等式约束

记发电机组在 $t$ 时段输出总功率 $P_G(t) = P_b(t) + P_c(t) + P_f(t) + P_g(t)$ , 根据电能生产消耗守恒:

$$P_G = P_L + P_H^{cq} + P_{grid} \quad (16)$$

### (2) 不等式约束

#### A. 电源约束

各发电机组输出功率均存在额定功率曲线限制, 即

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_b \leq P_{bN}(t) \\ 0 \leq P_c \leq P_{cN}(t) \\ 0 \leq P_f \leq P_{fN}(t) \\ 0 \leq P_g \leq P_{gN}(t) \end{array} \right. \quad (17)$$

#### B. 储能约束

对于电解槽和氢燃料电池, 其输入功率存在上下限, 且存在功率爬坡约束, 则

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Emin}^{dj} \leq P_E^{dj} \leq P_{Emax}^{dj} \\ P_{Hmin}^{qdc} \leq P_H^{qdc} \leq P_{Hmax}^{qdc} \\ \Delta P_{Hmin}^{qdc} \leq P_H^{qdc}(t+1) - P_H^{qdc}(t) \leq \Delta P_{Hmax}^{qdc} \\ \Delta P_{Emin}^{dj} \leq P_E^{dj}(t+1) - P_E^{dj}(t) \leq \Delta P_{Emax}^{dj} \end{array} \right. \quad (18)$$

其中, 电解槽输入功率和功率爬坡上下限分别为 $P_{Emax}^{dj}, P_{Emin}^{dj}, \Delta P_{Emax}^{dj}, \Delta P_{Emin}^{dj}$ , 氢燃料电池输入功率上下限分别为 $P_{Hmax}^{qdc}, P_{Hmin}^{qdc}, \Delta P_{Hmax}^{qdc}, \Delta P_{Hmin}^{qdc}$ .

对于储氢罐, 其内存储的能量应在任意时段皆不超过容积 $\mathcal{K}$ 且非负, 则

$$0 \leq \sum_{t=0}^n P_H^{cq}(t) \leq \mathcal{K}, n \in \{0, 1, 2, \dots, T\} \quad (19)$$

#### C. 负荷约束

令分时电价中的峰、平、谷段电价分别为 $p_{high}, p_{mid}, p_{low}$ , 考虑电力生产成本、社会经济发展和用户承受能力, 应有:

$$\begin{cases} p_{high}^{min} \leq p_{high} \leq p_{high}^{max} \\ p_{mid}^{min} \leq p_{mid} \leq p_{mid}^{max} \\ p_{low}^{min} \leq p_{low} \leq p_{low}^{max} \end{cases} \quad (20)$$

根据国家发展改革委员会最新的文件指示以及近年来分时电价实施的成功经验，峰谷电价比应满足以下关系：

$$\begin{cases} 3 \leq \frac{p_{high}}{p_{low}} \leq 5 \\ p_{high} > p_{mid} > p_{low} \end{cases} \quad (21)$$

令 $p_0$ 为需求响应调节前的电价，分时电价制定还应保证用户在执行分时电价后利益不受到损失：

$$\sum_{t=0}^T p P_L \leq \sum_{t=0}^T p_0 (P_{RL} + P_{FL}) \quad (22)$$

### (三) 基于 PF-APSO 的求解算法

所构建的海岛微网源荷储优化调度模型涉及多个非线性目标函数和复杂的约束条件，决策变量数量众多且搜索范围广泛，这直接导致了问题的求解难度大幅增加，使其成为一个较复杂的非线性优化问题。为了有效应对这一挑战，我们设计了 PF-APSO 算法——在现有自适应粒子群优化算法（Adaptive Particle Swarm Optimization, APSO）<sup>[22]</sup>的基础上引入了外点罚函数（Penalty Function, PF）。这一罚函数能够有效地反映解对约束条件的违反程度。

根据我们所构建的优化模型，我们设定第*i*个粒子的组成如下：

$$s_i = (s_{ij})_{1 \times n} = [P_b, P_c, P_f, P_g, P_H^{dj}, P_E^{qdc}, P_{grid}, p_{high}, p_{mid}, p_{low}]^T \quad (23)$$

上述粒子分量中除分时电价外，均为包含*T*个元素的向量，即包含对应量在*t* = 0, 1, …, *T* – 1的取值。

结合约束条件，引入惩罚项组成初步增广目标函数：

令 $p_0$ 为需求响应调节前的电价，分时电价制定还应保证用户在执行分时电价后利益不受到损失：

$$\begin{aligned} f_i \pm & \left( \alpha_1 \max_t \{ \max \{ \Delta P_H^{qdc} - P_H^{qdc}(t+1) + P_H^{qdc}(t), 0 \} \right. \\ & + \alpha_2 \max_t \{ \max \{ P_H^{qdc}(t+1) - P_H^{qdc}(t) - \Delta P_H^{qdc}, 0 \} \} \\ & + \alpha_3 \max_t \{ \{ \Delta P_H^{qdc} - P_H^{qdc}(t+1) + P_H^{qdc}(t), 0 \} \} \\ & + \alpha_4 \max_t \{ P_H^{qdc}(t+1) - P_H^{qdc}(t) - \Delta P_H^{qdc}, 0 \} + \sum_{n=0}^T \alpha_5 \max \left\{ - \sum_{t=0}^n P_H^{cq}(t), 0 \right\} \right. \\ & + \sum_{n=0}^T \alpha_6 \max \left\{ \sum_{t=0}^n P_H^{cq}(t) - \mathcal{K}, 0 \right\} + \alpha_7 \max \left\{ 3 - \frac{p_{high}}{p_{low}} \right\} + \alpha_8 \max \left\{ \frac{1}{5} - \frac{p_{low}}{p_{high}} \right\} \\ & \left. + \alpha_9 \max \left\{ \sum_{t=0}^T p P_L - \sum_{t=0}^T p_0 (P_{RL} + P_{FL}), 0 \right\} \right) \triangleq f_i + \sum_{j=1}^9 \alpha_j \varphi_j(s_i) \end{aligned} \quad (24)$$

其中， $\alpha_j > 0$ 为惩罚因子， $f_i$ 是第*i*个目标函数值，目标函数值后的±在最大化目标时为负，在最小化目标时为正。

为更好确定惩罚因子的取值，我们在决策变量的自然定义域下，对增广目标函数各项进行并行蒙特卡洛搜索（数学模型详情请见 Appendix A），得出其各项大致取值，取多次独立重复试验结果的算术平均值作为最终的均值 $\mu_i$ 和标准差 $\sigma_i$ ，最后进行 Z-Score 标准化得出最终的增广目标函数：

令 $p_0$ 为需求响应调节前的电价，分时电价制定还应保证用户在执行分时电价后利益不受到损失：

$$\mathcal{Z} = F_i \pm \sum_{j=1}^9 \alpha_j \psi_j(s_i) \quad (25)$$

令 $p_0$ 为需求响应调节前的电价，分时电价制定还应保证用户在执行分时电价后利益不受到损失：

$$\begin{pmatrix} F \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \vdots \\ \psi_9 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0 & & & & \\ & \sigma_1 & & & \\ & & \sigma_2 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \sigma_9 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_9 \end{bmatrix} - \begin{pmatrix} \mu_0 \\ \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_9 \end{pmatrix} \quad (26)$$

最后，使用 APSO 算法对最终增广目标函数进行优化处理（算法数学模型详情请见 Appendix A）。PF-APSO 算法流程图如图 5 所示。

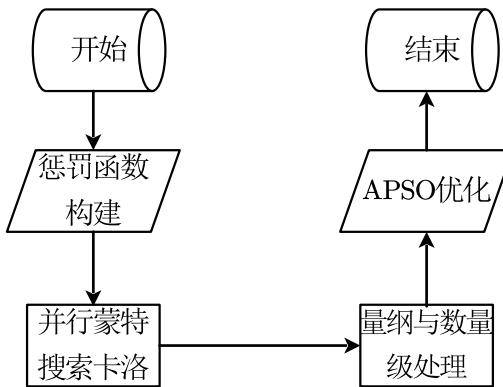


图 5 PF-APSO 算法的总体流程图

## 四、算例分析

### (一) 发用电数据

为了验证所提出的微网优化运行方法的有效性，本研究选取我国东部某典型海岛作为仿真对象。我们基于该海岛某年的详细气象、海洋和电力负荷数据进行了深入的仿真分析。数据来源于国家海洋科学数据中心<sup>[23]</sup>，确保了数据的准确性和可靠性。图 6-11 为该海岛某年的 8760 条真实数据所绘制的图像。

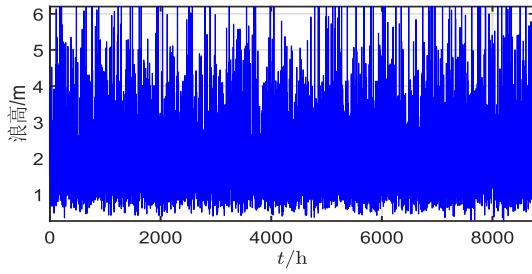


图 6 全年波浪高度曲线

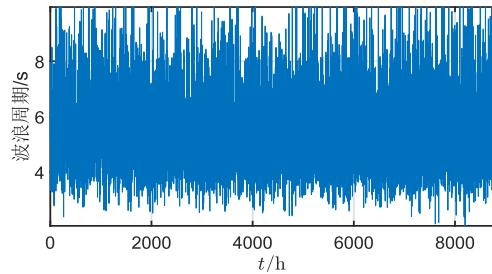


图 7 全年波浪周期曲线

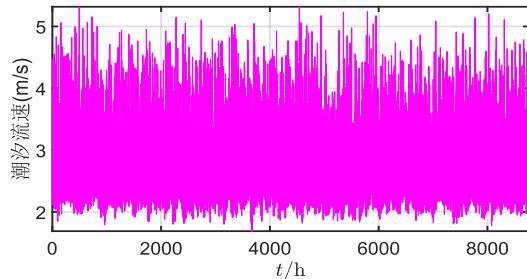


图 8 全年潮汐流速曲线

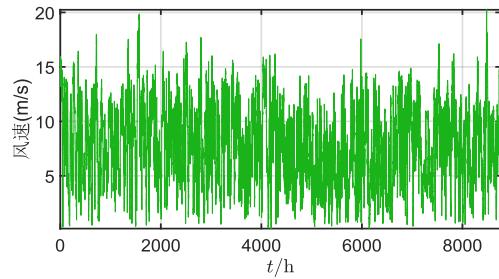


图 9 全年风速曲线

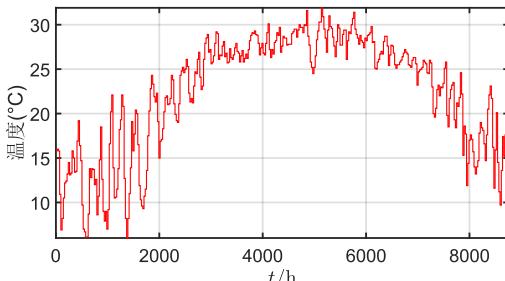


图 10 全年温度曲线

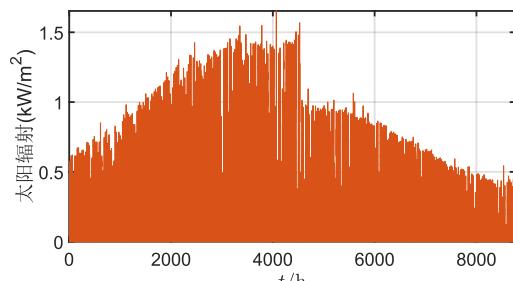


图 11 全年太阳辐射强度曲线

该海岛全年的电负荷见图 12。

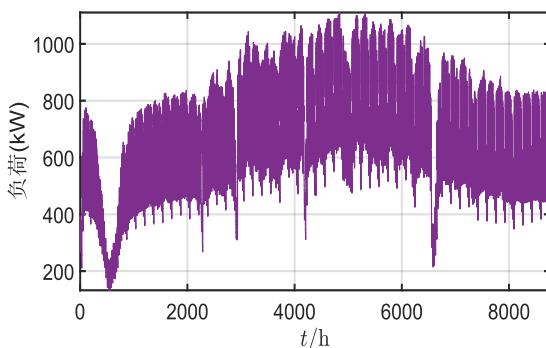


图 12 我国东部某典型海岛全年电负荷

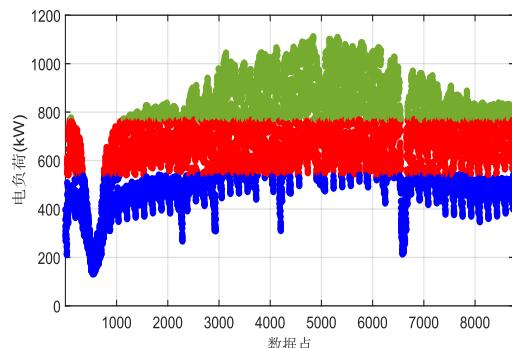


图 13 K-means 聚类分类结果

对海岛全年负荷采用 K-means 聚类进行分类结果如图 13，不同颜色代表不同负荷类型。

分析 K-means 聚类结果，经统计所得每天的峰段时间为 17:00-23:00，谷段时间 00:00-06:00，平段时间 6:00-17:00 或 23:00-00:00。

## (二) 结果分析

我们所选定的研究周期为一周，共 $7 \times 24 = 168$ 小时。为了更加客观、准确、真实地反映源、网、荷、储之间的耦合、配置情况，结合前文的数据，我们分别在春季、夏季、秋季、冬季各选取一个星期作为案例，分别进行优化调度。

### 1. 春季

结合原始数据资料，我们选取3月21日至3月27日作为春季的典型周，进行仿真验证，得出的目标函数值见表1：

表1 春季案例所得最优目标函数值

最大新能源发电消纳量(kWh)	最小实际碳排放(kg)	最大总利润(元)
145564.65	6985.95	740120.04

各分布式清洁能源发电机组发电量如图14所示，海岛居民负荷如图15所示。

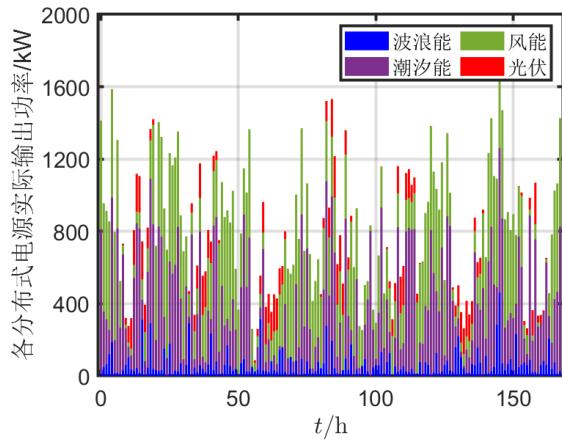


图14 春季各分布式发电机组出力

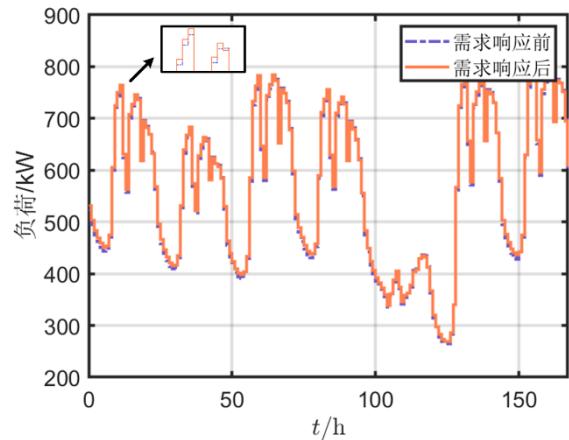


图15 春季海岛居民负荷

向大电网传输的功率和储氢罐存储的能量分别被展示在图16、图17中。

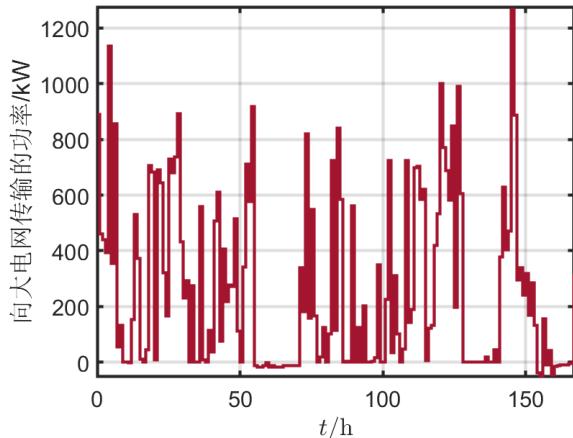


图16 春季向大电网传输的功率

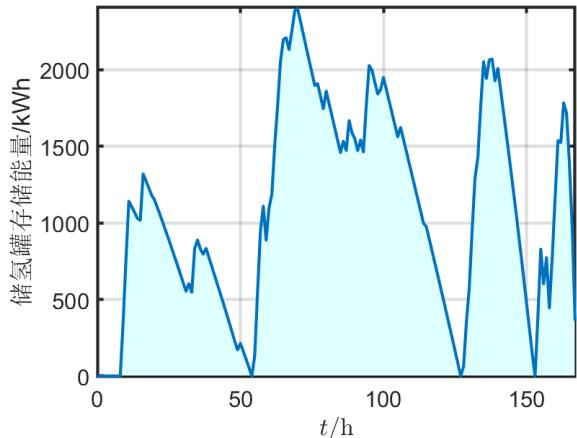


图17 春季储氢罐储能

波浪能、潮汐能。风电、光伏机组相比于燃煤机组减少的碳排放量分别为 8855.35881、47196.58475、44204.74413、7287.52734 kg。

对海岛负荷最终确定的峰段、平段、谷段电价分别为 0.83、0.40、0.17 元。

## 2.夏季

我们选取 6 月 22 日至 6 月 28 日作为夏季典型周进行仿真，得出目标函数值见表 2：

表 2 夏季案例所得最优目标函数值

最大新能源发电消纳量(kWh)	最小实际碳排放(kg)	最大总利润(元)
145844.52	5758.08	-803685.91238

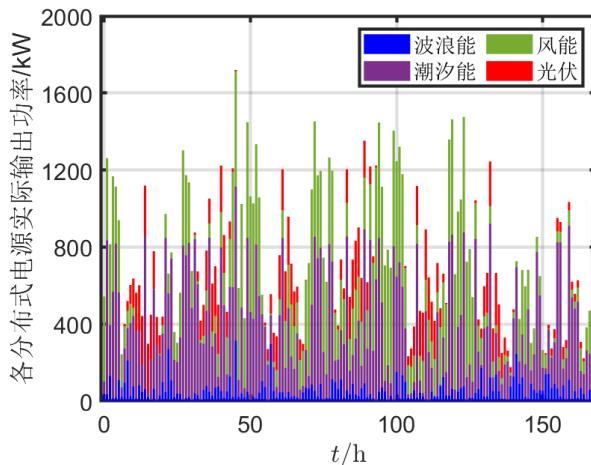


图 18 夏季各分布式发电机组出力

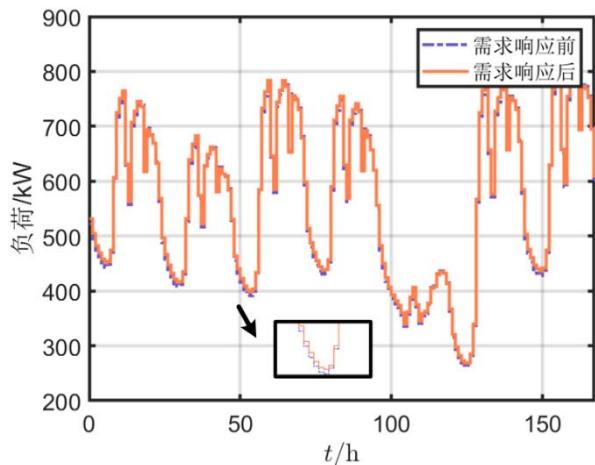


图 19 夏季海岛居民负荷

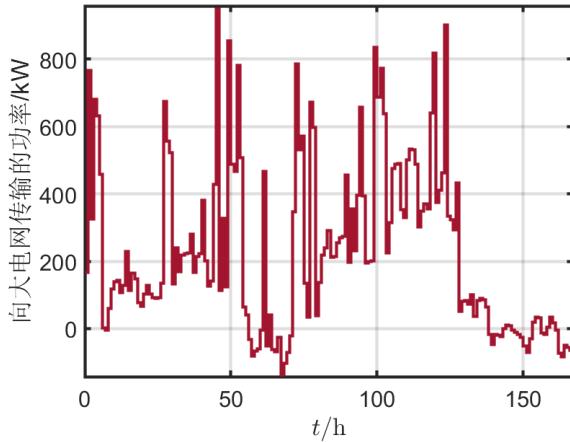


图 20 夏季向大电网传输的功率

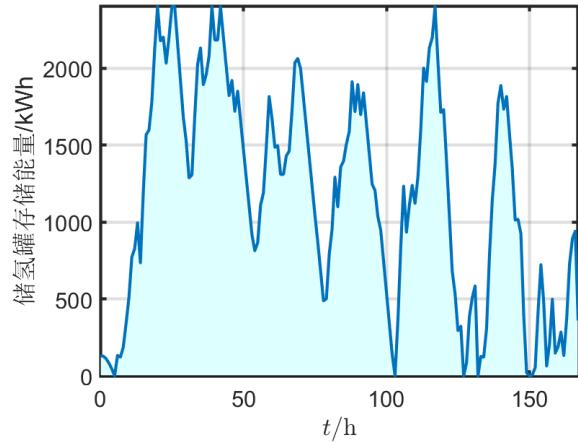


图 21 夏季储氢罐储能

波浪能、潮汐能。风电、光伏机组相比于燃煤机组减少的碳排放量分别为 7383.26741、47765.36928、432230.61097、10268.29881 kg。对海岛负荷最终确定的峰段、平段、谷段电价分别为 0.85、0.40、0.17 元。

### 3.秋季

我们选取9月23日至9月29日作为秋季的典型周，进行仿真验证，得出的目标函数值见表3：

表3 秋季案例所得最优目标函数值

最大新能源发电消纳量(kWh)	最小实际碳排放(kg)	最大总利润(元)
121166.41	6662.70	769861.53

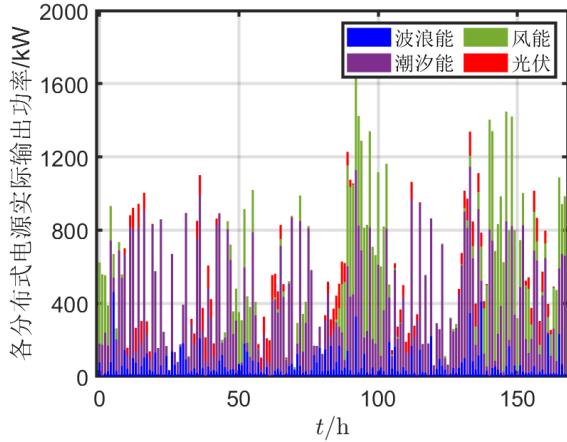


图 22 秋季分布式发电机组出力

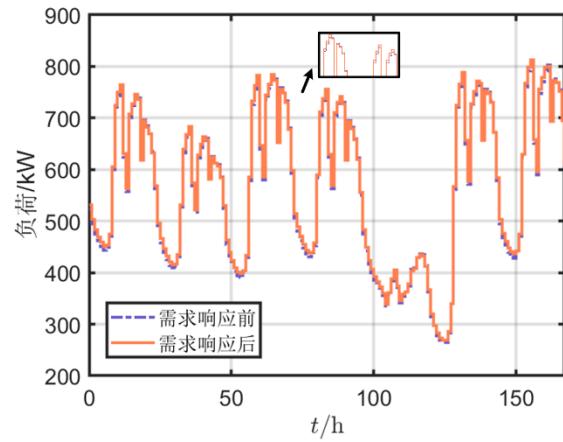


图 23 秋季海岛居民负荷

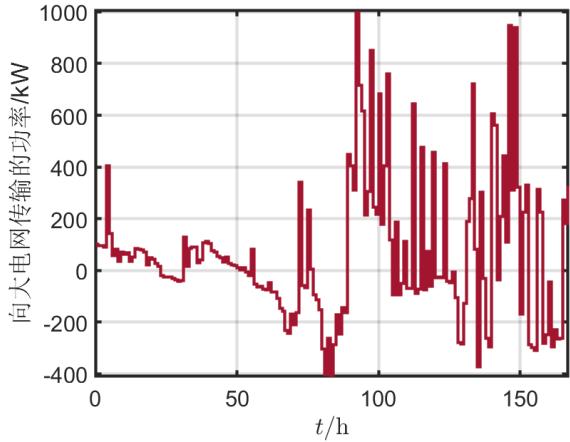


图 24 秋季向大电网传输的功率

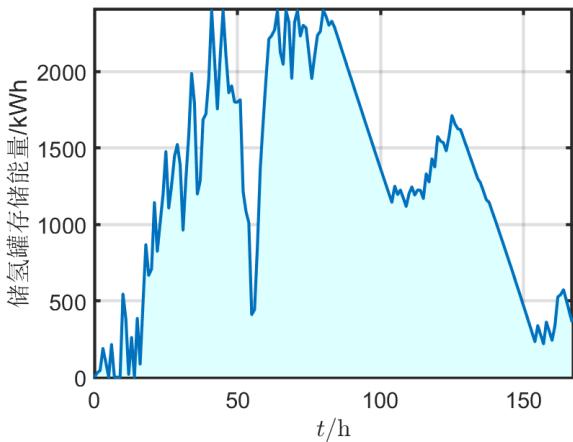


图 25 秋季储氢罐储能

波浪能、潮汐能、风电、光伏机组相比于燃煤机组减少的碳排放量分别为 8601.71527、45483.61207、19690.17172、4571.76146 kg。对海岛负荷最终确定的峰段、平段、谷段电价分别为 0.82、0.40、0.16 元。

### 4.冬季

我们选取12月22日至12月28日作为冬季的典型周，进行仿真验证，得出的目标函数值见表4：

表4 冬季案例所得最优目标函数值

最大新能源发电消纳量(kWh)	最小实际碳排放(kg)	最大总利润(元)
150834.51	6555.52	14697288.99

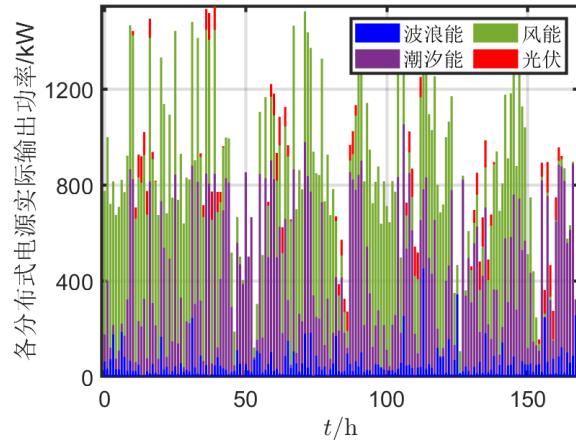


图26 冬季分布式发电机组出力

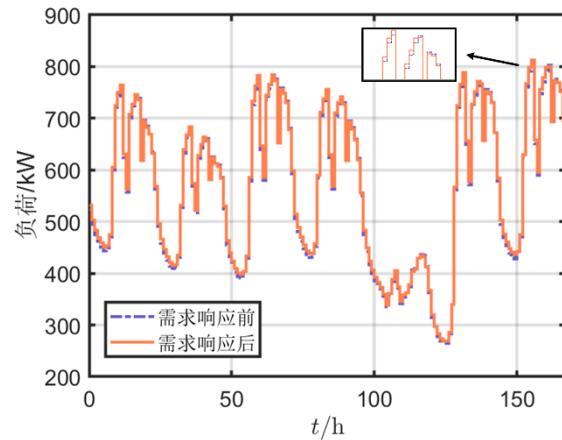


图27 冬季海岛居民负荷

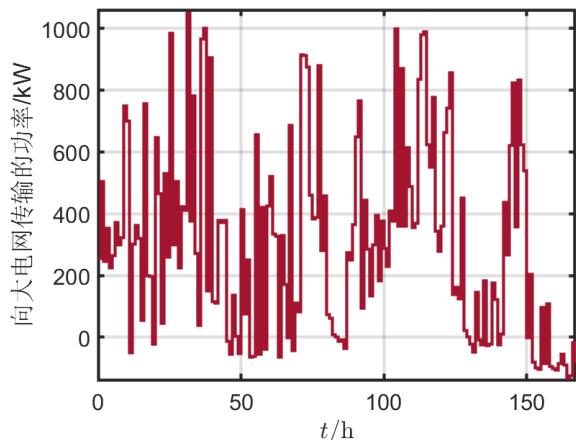


图28 冬季向大电网传输的功率

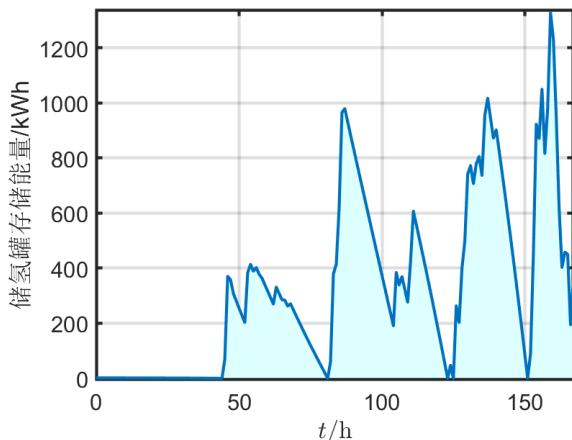


图29 冬季储氢罐储能

波浪能、潮汐能、风电、光伏机组相比于燃煤机组减少的碳排放量分别为 7695.77551、49769.34707、54234.65401、3451.62859 kg。

对海岛负荷最终确定的峰段、平段、谷段电价分别为 0.81、0.40、0.15 元。

综合观察、比较、分析对于春夏秋冬四季的仿真案例，我们所提出的方法能够促进新能源消纳、降低碳排放和提高经济效益。

## 五、结论

为保障以新能源为主的海岛微网的供电稳定性，同时提高近岸海岛建设的经济性，本文提出基于电氢耦合和需求响应的海岛微网优化运行模型，主要贡献如下：

- 1) 分析海岛特有的电源特性，当分布式新能源发电机大量覆盖时，其发电量较为可观。建立以风电、光伏、潮汐能、波浪能为主的清洁能源体系，能够最大化的利用海岛可再生资源，助力实现双碳目标。
- 2) 引入氢储能装置和需求响应策略，能够有效解决或者缓解新能源发电不稳定的问题。氢储能能够实现长时、跨周期储能，利用峰谷价差实现套利，需求响应通过调节用户的用电需求，能够降低用电成本，实现海岛的经济利益最大化。
- 3) 提出 PF-APSO 算法求解多目标函数，能够动态地调整算法参数，将有约束条件的优化问题转化为无约束条件的优化问题，可以适用于任何非线性优化模型的求解。
- 4) 分析各个目标函数值可知，本文所述的优化调度模式在一些情况下具有利润空间，但并不一定总是盈利的，经济性的保障可能依赖于政策补贴。

## 参考文献

- [1] 杨欢, 赵荣祥, 辛焕海, 等. 海岛电网发展现状与研究动态[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 95-105.
- [2] 李加林, 沈满洪, 马仁锋, 等. 海洋生态文明建设背景下的海洋资源经济与海洋战略[J]. 自然资源学报, 2022, 37(4): 829-849.
- [3] 黎嘉明, 郑雪阳, 艾小猛等. 独立海岛微网分布式电源容量优化设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 176-184.
- [4] 王成山, 王守相. 智能微网在分布式能源接入中的作用与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(02): 232-240.
- [5] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报 (社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [6] 郑亚先, 杨争林, 冯树海, 等. 碳达峰目标场景下全国统一电力市场关键问题分析[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 1-19.
- [7] 吴亚楠, 吴国伟, 武贺, 等. 海岛海洋能应用需求和发展建议探讨[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(9): 39-44.
- [8] 肖先勇, 郑子萱. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统: 贡献, 关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 47-59.
- [9] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [10] 牛耕, 季宇, 陈培坤, 等. 含海洋能发电的海岛微网能量优化调度方法[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 96-104.

- [11] 刘柏良, 黄学良, 李军. 计及可时移负荷的海岛微网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4250-4258.
- [12] 荆朝霞, 胡荣兴, 袁灼新, 等. 含风/光/抽水蓄能并计及负荷响应的海岛微网优化配置[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 65-72.
- [13] 孙景钉, 周泰斌, 胡长洪, 等. 基于综合需求响应的海岛式多能微网优化调度[J]. 电工技术, 2021 (7): 17-22.
- [14] 邢晓敏, 杜钧淇, 李贻涛等. 海岛低碳综合能源微网优化方案设计[J]. 南方电网技术, 2023, 17(01): 3-13.
- [15] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值, 挑战及展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 89-99.
- [16] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18.
- [17] 李建林, 李光辉, 梁丹曦, 等. “双碳目标”下可再生能源制氢技术综述及前景展望[J]. 分布式能源, 2021, 6(5): 1-9.
- [18] 蒙志全, 楼贤嗣, 时涵等. 面向电力系统调度需求的负荷资源调控技术研究综述[J]. 浙江电力, 2022, 41(08): 31-40.
- [19] 吴珊, 边晓燕, 张菁娴, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1662-1677.
- [20] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 2-9.
- [21] 张涛, 刘景, 杨晓雷, 霍然, 郭玥彤, 李逸鸿. 计及主/被动需求响应与条件风险价值的微网经济调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(09): 3292-3304.
- [22] Harrison K R, Engelbrecht A P, Ombuki-Berman B M. Self-adaptive particle swarm optimization: a review and analysis of convergence[J]. Swarm Intelligence, 2018, 12: 187-226.
- [23] 感谢国家科技资源共享服务平台—国家海洋科学数据中心(<http://mds.nmdis.org.cn/>)提供数据支撑.

## 附录

### Appendix A. PF-APSO 模型求解算法

#### 一、多目标函数处理

多目标决策问题需同时考虑多个目标或因素，而这些目标或因素之间往往并不是单一的、一致的关系，它们可能是相互冲突或矛盾的。然而每个目标都有其重要性和价值。因此，我们的目的通常是找到一个或多个“满意”的解。这些解能在不让所有目标均劣化的前提下，使得部分优化目标取得令人满意的结果。即所谓的 Pareto 最优解。

优先级法是处理优化模型中多目标函数的常见办法。假设我们已知一个多目标优化模型：

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})]^T \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} g_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p \\ h_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, 2, \dots, q \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{A-1})$$

式中， $\mathbf{x}$  为决策变量组成的向量， $\mathbf{f}$  为目标函数组成向量， $g_i, h_j$  分别为不等式约束和等式约束条件。

依据“优先级法”处理多目标函数的具体步骤如下：

**Step1:** 确定优先级——此处假设  $f_1$  为第一优先级；

**Step2:** 求解第一级单目标最优值  $f_1^* = \min f_1(\mathbf{x})$ ；

**Step3:** 以第一级的目标函数不低于最优值及相关阈值为约束，求第二级目标函数最优值，即求解：

$$\begin{aligned} \min \quad & f_2(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} g_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p \\ h_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, 2, \dots, q \\ f_1(\mathbf{x}) \leq f_1^* + \Delta f_1^* \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

#### 二、海岛优化调度模型求解

海岛微网源荷储优化调度模型有多个非线性目标函数与约束条件，且决策变量数量较多、搜索范围较广，难以直接遍历。因此，建立了 PF-APSO (Penalty Function — Adaptive Particle Swarm Optimization) 优化算法。在 APSO 的基础上，通过约束条件构造外点罚函数，与原目标函数线性组合形成新的等价目标函数。但在线性组合过程中，我们需要考虑各目标函数和约束条件的数量级关系，为此，我们先通过并行算法下的多次蒙特卡洛模拟，在自由定义域下搜索各个目标函数和根据约束条件构造的外点罚函数的大致可能取值，分别得到每个解析式对应的均值和标准差，且将多次独立重复试验的结果取算术平均值作为最终的均值和标准差，再把目标函数、罚函数表达式进行 Z-Score 标准化，这便实现了数量级的统一。

##### (一) 并行蒙特卡洛模拟

并行蒙特卡洛模拟的流程图如图 A.1 所示：

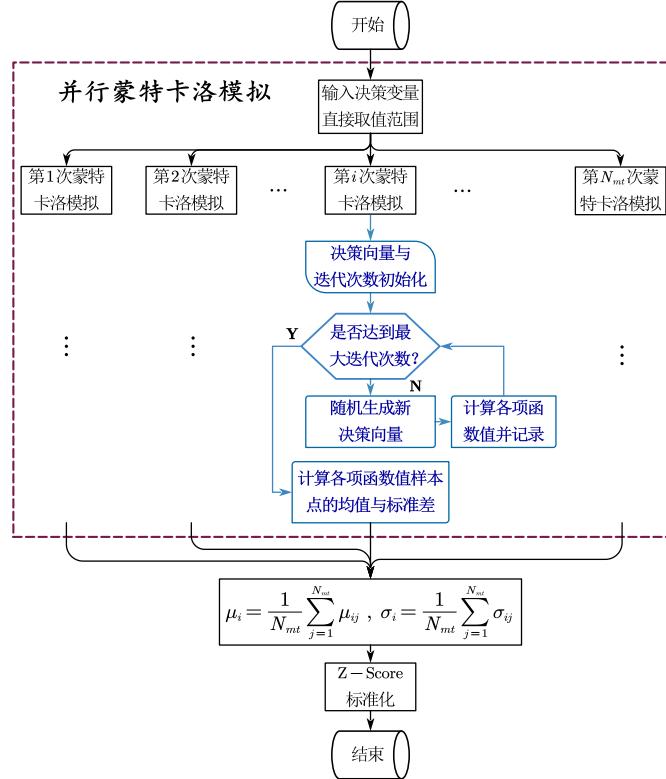


图 A.1 并行蒙特卡洛模拟流程图

## (二) APSO 模型优化建立

### 1. 适应度函数构造

为使得自适应粒子群算法中体现出约束条件，我们选择将约束条件更改为惩罚项并与目标函数线性组合构成粒子适应度函数。

因此，第*i*个体在第*k*次迭代中的适应度函数为：

$$fitness(s_i^{(k)}) = F + \sum_{j=1}^m \alpha_j \psi_j \quad (A-3)$$

式中， $\alpha_j$ 为惩罚因子，用来控制惩罚项所占权重。

基于适应度函数，我们可以得到个体极值  $p$  和全局极值  $g$ ：

$$p_i^{(k)} = [p_{i1}^{(k)}, p_{i2}^{(k)}, \dots, p_{in}^{(k)}] \quad (A-4)$$

$$g_i^{(k)} = [g_{i1}^{(k)}, g_{i2}^{(k)}, \dots, g_{in}^{(k)}] \quad (A-5)$$

### 2. 粒子位置更新

由粒子的位置、速度、个体极值、群体极值对粒子的速度和位置进行更新，更新公式为：

$$v_i^{(k+1)} = w v_i^{(k)} + c_1 r_1 [p_i^{(k)} - s_i^{(k)}] + c_2 r_2 [g_i^{(k)} - s_i^{(k)}] \quad (A-6)$$

$$s_i^{(k+1)} = s_i^{(k)} + v_i^{(k+1)} \quad (A-7)$$

式中， $c_1$ 、 $c_2$ 为学习因子， $r_1$ 、 $r_2$ 为两个各分量皆均匀分布在[0,1]的随机向量， $w$ 为权重因子，满足：

$$w = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min})k}{\text{ITE}_{\max}} \quad (\text{A-8})$$

$$c_1 = c_{1\max} - \frac{(c_{1\max} - c_{1\min})k^2}{\text{ITE}_{\max}^2} \quad (\text{A-9})$$

$$c_2 = c_{2\min} + \frac{(c_{2\max} - c_{2\min})k^2}{\text{ITE}_{\max}^2} \quad (\text{A-10})$$

其中  $w_{\max}$  和  $w_{\min}$ 、 $c_{1\max}$  和  $c_{1\min}$ 、 $c_{2\max}$  和  $c_{2\min}$  分别为的  $w, c_1, c_2$  上、下界， $\text{ITE}_{\max}$  是最大迭代次数。关于权重因子，在迭代初期，较大的  $w$  使搜索步长更大，利于全局搜索；在迭代后期，较小的  $w$  有利于局部搜索，使迭代更容易收敛。

关于学习因子， $c_1, c_2$  分别与粒子的自我学习能力、社会学习能力正相关。在迭代初期，较大的  $c_1$  和较小的  $c_2$  有利于粒子广度搜索，更有利于实现全局最优；在迭代后期，较小的  $c_1$  和较大的  $c_2$  有利于粒子深度搜索，更有利于实现算法收敛。

### 3. 粒子位置更新

对于搜索过程中超出边界矩阵对应分量的位矢分量和速度分量，我们采用以下方式进行纠正处理：

$$s_{ij}^{(k)} = (s_{\max}^i - s_{\min}^i) \text{rand} + s_{\min}^i \quad (\text{A-11})$$

$$v_{ij}^{(k)} = (v_{\max}^i - v_{\min}^i) \text{rand} + v_{\min}^i \quad (\text{A-12})$$

其中  $s_{\min}^i, s_{\max}^i, v_{\min}^i, v_{\max}^i$  分别表示第  $i$  个位矢分量的上下界和分别表示第  $i$  个速度分量的上下界， $\text{rand}$  为区间  $[0,1]$  内均匀分布的一个随机数。

APSO 优化算法流程如图 A.2 所示：

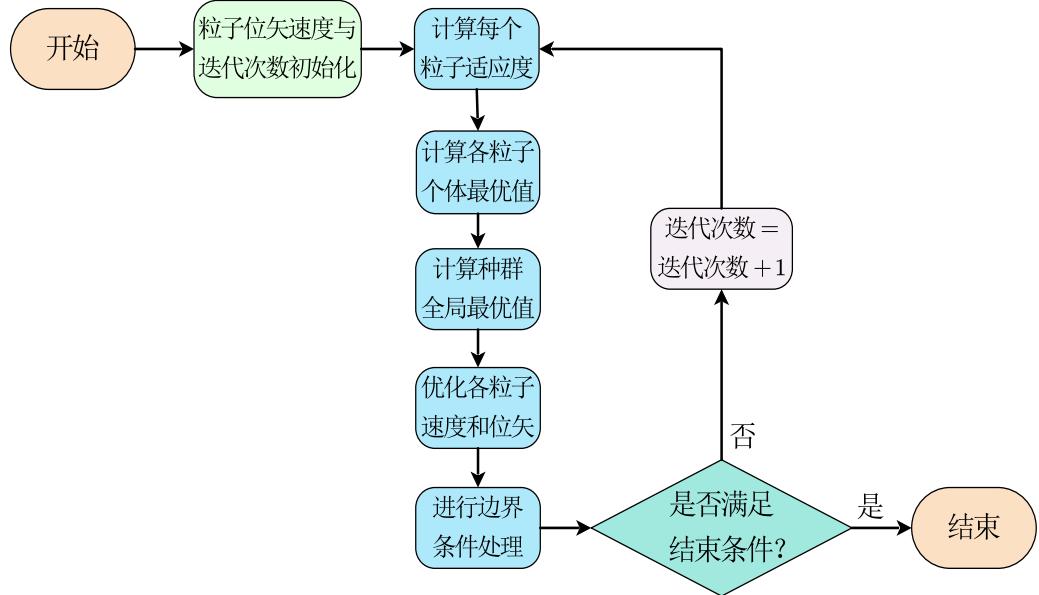


图 A.2 APSO 优化算法流程图

## Appendix B. 参数设置

通过查阅相关企业、厂家的产品手册，我们可以得出以下表格中的数据。

[1] 电源方面：

表 B.1 分布式电源参数

设备	技术参数	数值
分布式风电机组	切入速度/(m· s <sup>-1</sup> )	3
	切出速度/(m· s <sup>-1</sup> )	20
	额定速度/(m· s <sup>-1</sup> )	11
	额定功率/(kW)	600
	成本/(元· kWh <sup>-1</sup> )	8000
	运维费用/(元· kWh <sup>-1</sup> )	0.0296
	补贴费用/(元· kWh <sup>-1</sup> )	0.85
	高度/m	10
	使用寿命/year	20
分布式潮汐能机组	切入速度/(m· s <sup>-1</sup> )	2
	切出速度/(m· s <sup>-1</sup> )	5
	额定速度/(m· s <sup>-1</sup> )	3.5
	额定功率/(kW)	800
	成本/(元· kWh <sup>-1</sup> )	12000
	运维费用/(元· kWh <sup>-1</sup> )	0.0875
	补贴费用/(元· kWh <sup>-1</sup> )	0
	使用寿命/year	20
	额定功率/(kW)	200
分布式光伏机组	成本/(元· kWh <sup>-1</sup> )	2000
	运维费用/(元· kWh <sup>-1</sup> )	0.0096
	补贴费用/(元· kWh <sup>-1</sup> )	0.67
	使用寿命/year	20
	额定浪宽(m)	1.5
分布式波浪能机组	成本/(元· kWh <sup>-1</sup> )	10000
	运维费用/(元· kWh <sup>-1</sup> )	0.0875
	补贴费用/(元· kWh <sup>-1</sup> )	0
	使用寿命/year	15

[2] 储能部分:

表 B.2 储能部分参数

	电解槽	氢燃料电池	储氢罐
容量(kWh)	800	600	2400
效率	0.88	0.85	\
爬坡约束(kW)	250	200	\
成本(元·kW <sup>-1</sup> )	2000	3200	3000
使用寿命(year)	15	5	20

[3] 关于碳排放:

表 B.3 燃煤发电机燃烧碳排放参数

$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$
36	-0.38	0.0034

燃煤发电机单位碳配额  $\chi_e = 0.798\text{kg/kWh}$ , 碳市场交易价格  $c_E = 302.542 \text{ 元/kg}$ 。

[4] 基本电价:

表 B.4 海岛居民基本电价

	峰段	谷段	平段
价格(元·kW <sup>-1</sup> )	0.75	0.32	0.56

表 B.5 向大电网售电/购电电价

时间	07:00-08:00 或 12:00-16:00	22:00-次日 07:00	08:00-12:00 或 16:00-22:00
售电价格(元·kW <sup>-1</sup> )	0.75	0.22	0.54
购电价格(元·kW <sup>-1</sup> )	1.02	0.35	0.68

[5] 分时电价上下限:

表 B.6 分时电价上下限

	峰段	谷段	平段
下限价格(元·kW <sup>-1</sup> )	0.83	0.12	0.40
上限价格(元·kW <sup>-1</sup> )	1.20	0.28	0.70

[6] 政策补贴:

表 B.7 周平均政策补贴

	需求响应补贴	氢气储能补贴
价格(万元)	150	200

## Appendix C. 模型检验

### (一) 误差分析

在模型建立过程中，我们将时间离散化，用阶梯曲线描述功率，而实际的功率曲线应当是连续曲线，这样我们的数值计算可能存在误差。为此，我们需要对上述数值计算方法进行误差分析。我们以  $y = f(x) = \sin \frac{\pi x}{24}, x \in [0, 24]$  为算例。

$f(x)$  的导数、定义域上定积分解析解:

$$\int_0^{24} f(x) \, dx = \frac{48}{\pi} \quad (C-1)$$

$$\frac{d}{dx} f(x) = \frac{\pi \cos \frac{\pi x}{24}}{24} \quad (C-2)$$

以 1 为单位间隔，用阶梯曲线近似计算:

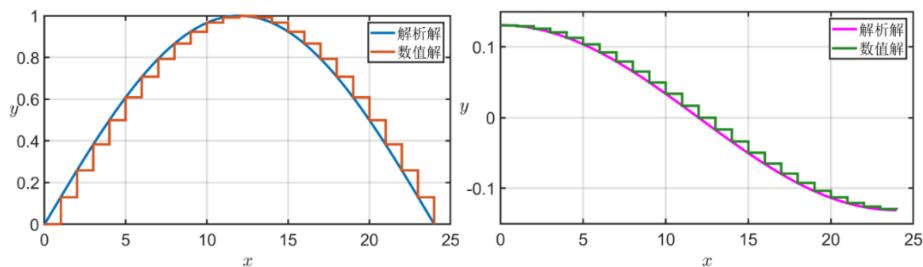


图 C.1 算例函数解析解与数值解

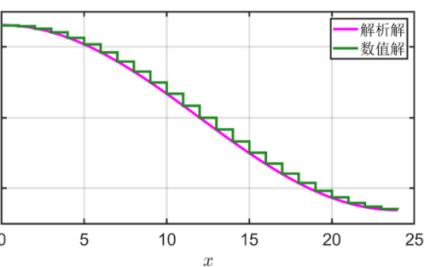


图 C.2 算例函数导函数解析解与数值解

数值积分结果：

$$\int_0^{24} f(x) dx \approx \sum_{i=0}^{23} f(i) = 15.2571 \quad (C-3)$$

比较解析解与数值解，进行误差分析，结果见下表：

表 C.1 误差分析结果

	平均误差	最大误差
原函数	0.04165	0.13033
导函数	0.00545	0.01708
定积分	0.02182	0.02182

分析上表可知，平均误差和最大误差都较小，近似计算方法满足精度要求，是具有可行性的。

## (二) 灵敏度分析

在设计和优化海岛微网系统时，灵敏度分析是一个至关重要的步骤，它有助于我们深入理解系统性能对关键参数变量的敏感性。在本研究中，我们分别对储氢罐容量、电解槽-燃料电池效率进行灵敏度分析。

### 1. 储氢罐容量灵敏度分析

我们将储氢罐容量上下变动 20%，观察记录目标函数最优值的变化情况，根据记录结果绘制出图 C.3。

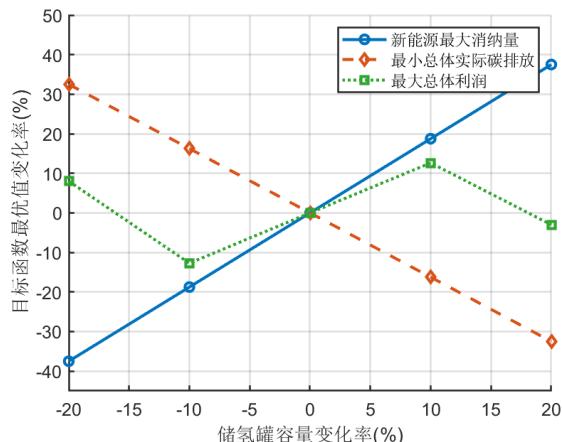


图 C.3 储氢罐容量改变对目标函数影响

分析上图可知，当储氢罐容量较小范围变化时，新能源发电机组消纳量、总体实际碳排放量与储氢罐容量呈正向变化关系，即当储氢罐容量增大，新能源发电机组最大消纳量、最小总体实际碳排放量会往期望方向变化。若储氢罐容量在合理范围内，最大总利润随着储氢罐容量增大而增大，但如果储氢罐容量过大或者过小，最大总利润则会与其呈反向变化关系。

并且当储氢罐容量变化很小时，上述三个目标函数的最佳值变化率也较小，因此所构建的多目标优化模型对于参数“储氢罐容量”是较稳定的。

## 2. 电解槽—氢燃料电池效率灵敏度分析

我们将电解槽和氢燃料电池效率分别单独上下变动 20%，观察记录目标函数最优值的变化情况，根据记录结果绘制出图 C.4。

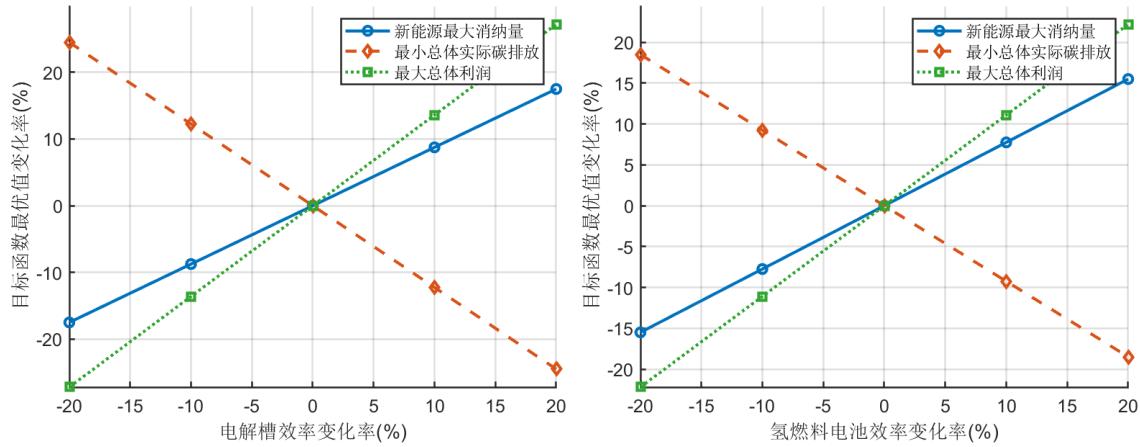


图 C.4 电解槽—氢燃料电池效率改变对目标函数影响

通过分析上图可知，提高电解槽—氢燃料电池效率均有利于三个目标函数积极变化。且三个目标函数对于电解槽—氢燃料电池效率皆较稳定。