DOI: 10.19666/j.rlfd.202504083

# 基于电解槽效率和成本模型的可再生能源制氢园区设备容量优化

刘　宇，毛煜东，杨开敏，刘吉营
（山东建筑大学热能工程学院，山东　济南　250101）

［摘　　要］为了解决风、光等可再生能源发电制氢中电力输出的间歇性与不稳定性问题，实现绿电制氢设备的最优配置非常重要。研究引入离散组合优化算法与多目标蛙跳优化算法，针对纯光伏、纯风电和光伏−风电混合系统可再生能源发电的园区规划展开优化，构建电解槽系统效率与运行功率、成本与容量的模型。结果显示：在光伏容量 2.60 MW 和风电容量 3.80 MW 的混合系统中，氢平准化成本最低为 17.83 元/kg，电解槽满负荷小时数约 3 400 h；经多目标蛙跳优化算法优化后，最优配置为光伏容量 1.50 MW、风电容量 0.55 MW，其最大制氢量 2 949.62 kg。光伏−风电混合系统既能降低氢平准化成本，又能增加满负荷运行时间，可为未来可再生能源制氢的科学规划提供理论参考。

［关　键　词］可再生能源；绿色制氢；电解槽；离散组合优化；多目标蛙跳优化算法

［引用本文格式］刘宇，毛煜东，杨开敏，等. 基于电解槽效率和成本模型的可再生能源制氢园区设备容量优化[J]. 热力发电，2026, 55(1): 102-112.　LIU Yu, MAO Yudong, YANG Kaimin, et al. Optimization of equipment capacity in renewable energy hydrogen production park based on electrolyzer efficiency and cost model[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 102-112.

# Optimization of equipment capacity in renewable energy hydrogen production park based on electrolyzer efficiency and cost model

LIU Yu, MAO Yudong, YANG Kaimin, LIU Jiying
(School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** To address the intermittent and unstable power output issues in hydrogen production from renewable energy sources such as wind and solar power, it is crucial to achieve the optimal configuration of green power hydrogen production equipment. The discrete combinatorial optimization algorithms and multi-objective shuffled frog leaping algorithms are study introduced to conduct optimization research on the planning of parks with pure photovoltaic, pure wind power, and photovoltaic-wind power hybrid systems for renewable energy generation. Models of electrolyzer system efficiency, operating power, cost, and capacity are constructed. The results show that in a hybrid system with a photovoltaic capacity of 2.60 MW and a wind power capacity of 3.80 MW, the lowest hydrogen levelized cost is 17.83 yuan/kg, and the full-load operating hours of the electrolyzer are approximately 3 400 hours. After optimization by the multi-objective shuffled frog leaping algorithm, the optimal configuration is a photovoltaic capacity of 1.50 MW and a wind power capacity of 0.55 MW, with a maximum hydrogen production of 2 949.62 kg. The photovoltaic-wind power hybrid system can not only reduce the hydrogen levelized cost but also increase the full-load operating time, providing a theoretical reference for the scientific planning of hydrogen production from renewable energy in the future.

**Key words:** renewable energy; green hydrogen production; electrolyzer; discrete combinatorial optimization; multi-objective shuffled frog leaping optimization algorithm

收 稿 日 期：2025-04-08　修 回 日 期：2025-06-19　接 受 日 期：2025-06-25
基 金 项 目：国家重点研发计划项目（2024YFE0106800）
Supported by: National Key Research and Development Program (2024YFE0106800)
第一作者简介：刘宇（2001），男，硕士研究生，主要研究方向为可再生能源制氢等，liuyu2020victory@163.com。
通信作者简介：刘吉营（1983），男，博士，教授，主要研究方向为暖通空调系统与节能优化等，jxl83@sdjzu.edu.cn。

随着气候变化的加剧和全球化石燃料储量的枯竭[1]，发展可再生能源技术对于实现“双碳”目标至关重要[2]。当前，全球正加速向可持续和零碳能源系统转型[3]。氢能作为一种清洁能源是目前发展势头强劲的可再生能源之一[4]。氢气的来源多种多样，主要分为灰氢、蓝氢和绿氢[5]。随着技术的进步和可再生能源的成本效益提高，预计未来绿氢的份额将显着增加[6]，基于可再生能源的发电厂通过水电解制取绿氢有望在这一发展中发挥关键作用[7]。通过电解水制氢是充分利用剩余可再生能源的不错选择[8]。电解水制氢技术具有动态响应速度快、体积紧凑和环保无污染等优势[9]，应用越来越广泛。可再生能源制氢技术主要有碱性水电解、质子交换膜（proton exchange membrane，PEM）水电解和固体氧化物水电解 3 种制氢技术路线[10]。

可再生能源制氢领域的研究正日益深入。文献[11]以风电制氢为例，针对“风电+PEM 电制氢”系统，提出了 3 种双层规划模型，对制氢系统全生命周期进行经济性分析。梁涛等[12]提出使用多目标金鹰算法对可再生能源制氢系统运行优化求解 Pareto 最优解集，结果表明该方法可以获得更优的优化结果。此外，为解决风能、太阳能的波动性、间歇性等问题，他还采用深度强化学习连续近端策略优化算法设计了适合解决可再生能源制氢系统调度问题的深度强化学习模型，并具有一定的可行性和有效性[13]。

将不同的可再生能源发电厂合并在一个可再生能源园区，可以进一步提高其他可再生能源在不同时期占主导地位地区的氢气产量。Hussam 等人[14]分析了科威特某发电厂利用可再生混合能源系统生产氢气的技术经济可行性，包括使用光伏、风力涡轮机和电池的离网，使用光伏和风力涡轮机并网，以及使用光伏、风力涡轮机和燃料电池的离网，可以最大限度降低能源成本、氢气成本和净现成本。在可再生能源的优化配置领域，Li 等人[15]提出了一种含氢分布式能源供应系统和一种改进的随电负载策略，并设计了一种旨在提高其经济、环境和能源效益的最优配置模型，最终获得含氢分布式能源系统内部设备的最优容量。

文献[16]风能和太阳能的互补特性有助于更好地匹配用户负荷的波动，促进可再生能源的消纳，并保障系统运行的安全性和稳定性。针对风光互补发电系统中的风能、太阳能发电特性，通过实验对影响风能、太阳能系统达到最优功率工作点的基本参数风速、风轮半径、负载、温度、光照强度等进行了研究。文献[17]针对风力发电、光伏发电二者存在的随机性和波动性问题，研究了风电和光伏在时间上的互补性，建立了储能容量最小、运营成本最低的微电网优化配置模型。陈梦萍等[18]通过对风光互补发电系统与电解水制氢系统的输出、输入功率进行建模仿真，改善了风光发电电解水制氢系统与系统负荷之间的负荷不平衡问题。Zhang 等人[19]建立了用于制氢的 PEM 电解槽系统，并推导出相应的效率表达式，论证了互补光伏−风能优化制氢具有良好的经济潜力。

尽管现有研究已证实混合光伏−风电系统在制氢领域具备优越性能[20]，但对电解槽成本的精细化建模，尤其是考虑其容量变化影响的研究尚有不足。此外，电解槽效率无论是理论模型还是经验模型，都呈现出对运行功率的非线性响应。若忽略这一特性，将导致氢气产量计算产生偏差。部分研究基于经验数据提出了电解槽效率曲线[21]。综上所述，采用精确的电解槽效率模型对于提升制氢系统分析的准确性至关重要。考虑到可再生能源发电厂输出功率的波动性，采用恒定效率值可能导致电解槽负荷小时数的评估失真，故本研究采用非线性回归拟合方法构建电解槽成本与效率模型，并深入探讨光伏与风电在 PEM 电解槽制氢系统中的最优容量配置。研究开展 2 种规划优化案例。第一案例以最小化氢气平准化成本（levelized cost of hydrogen，LCOH）为目标函数，旨在确定光伏、风电与 PEM 电解槽的最优装机容量；第二案例侧重于确定光伏与风力发电容量之间的最优比例，以最大化氢气产量并最小化与电网之间的能量交换。考虑到 LCOH 在大规模应用中的关键作用，第一优化方案采用离散组合优化方法以确保全局最优解；为精准得到光伏与风力发电之间的容量比例，第二方案在更大搜索空间内引入多目标蛙跳优化算法（multi objective shuffled frog leaping algorithm，MOSFLA），以期在更大的搜索空间内获得更优的解集。

# 1 建立模型

## 1.1 可再生能源园区介绍

可再生能源园区是部署可再生能源利用的特定区域，园区内能源配置形式多样，既可是单一的可再生能源，也可是多种并存，研究将其与 PEM 电

解槽集成，以实现绿氢生产。园区内所有发电设备均通过各自的电流转换器连接至交流母线。例如，光伏通过逆变器将直流电转换为交流电接入母线，另一方面，电解槽则需整流器将母线的交流电转换为直流电，将水电解产生氢气和氧气，在此过程中，水先经过水处理设备，且电解槽需一系列配套设备维持系统平衡。水电解会产生热量，需冷却，阴极侧产生的氢气经干燥器除湿后储存在氢罐中，需要压缩机进行压缩，阳极侧产生的氧气通常直接排入大气。这些平衡装置运行会消耗电能，导致电解槽整体系统效率降低。

由于可再生能源装置输出功率的不确定性，有时即使以最小运行功率运行，可再生能源装置的输出功率也不足以提供电解槽运行所需的功率。为确保电解槽能够持续稳定运行，该可再生能源园区接入外部电网，实现可再生能源园区与上游电网之间的能量传输，具体如图 1 所示。当园区电力不足或过剩时，有效平衡了园区内的电力供应，保障设备正常运行。

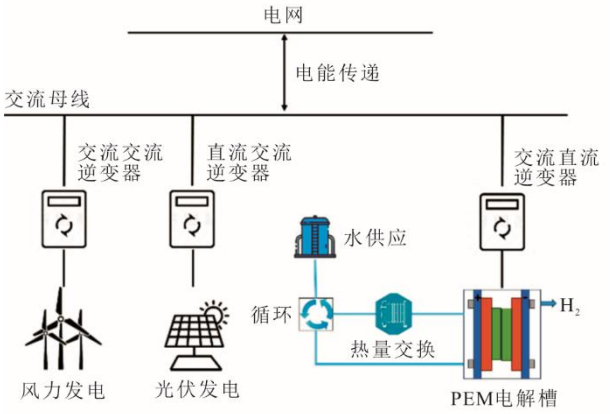



**图 1 含有 PEM 电解槽的可再生能源园区**
**Fig.1 Renewable energy park with PEM electrolyzer**

$y$ 年 $h$ 小时可再生能源总输出功率 $P_{\mathrm{RE},h,y}$ 计算如式(1)。若 $P_{\mathrm{RE},h,y}$ 小于电解槽的最小运行功率，则可再生能源园区将从上游引入电力 $P_{\mathrm{import},h,y}$，如式(2)；若 $P_{\mathrm{RE},h,y}$ 高于电解槽的额定功率 $P_{\mathrm{EL,rated}}$，可再生能源园区将其多余的功率 $P_{\mathrm{export},h,y}$ 输出到电网中，如式(3)。

$$P_{\mathrm{RE},h,y}=P_{\mathrm{PV},h,y}+P_{\mathrm{WT},h,y} \tag{1}$$

$$P_{\mathrm{import},h,y}=P_{\mathrm{EL,rated}}\times 0.05+P_{\mathrm{RE},h,y} \tag{2}$$

$$P_{\mathrm{export},h,y}=P_{\mathrm{RE},h,y}+P_{\mathrm{EL,rated}} \tag{3}$$

式中：$P_{\mathrm{RE},h,y}$ 为可再生能源总输出实时功率，MW；$P_{\mathrm{import},h,y}$ 为园区引入电网的实时功率，MW；$P_{\mathrm{export},h,y}$ 为园区输出到电网的实时功率，MW；$P_{\mathrm{PV},h,y}$ 为光伏实时功率，MW；$P_{\mathrm{WT},h,y}$ 为风电实时功率，MW；$P_{\mathrm{EL,rated}}$ 为电解槽额定功率，MW。

## 1.2 构建数学模型

建立可再生能源园区各组成部分和电解槽成本的数学模型。建模时，为了确保绿色制氢不受削减，整个系统在不限制储氢的条件下展开，因此，储氢规模并非约束因素之一。基于该假设，计算 LCOH 时不考虑储氢成本。

### 1.2.1 光伏发电系统建模

光伏阵列的输出功率受到太阳辐射强度和光伏组件温度的影响，因此，光伏阵列采用稳态模型：

$$P_{\mathrm{pv,out}}=P_{\mathrm{PV,rated}}f_{\mathrm{d}}\frac{\mathrm{GTI}}{G_{\mathrm{stc}}}\left(1+k_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{pv}}-T_{\mathrm{stc}}\right)\right)P_{\mathrm{loss}} \tag{4}$$

式中：$P_{\mathrm{PV,rated}}$ 为光伏组件的额定功率，MW；$f_{\mathrm{d}}$ 光伏组件的衰减系数；GTI为太阳辐照强度，kW/m$^2$；$G_{\mathrm{stc}}$ 为在标准测试条件下的太阳辐射常数，kW/m$^2$；$k_{\mathrm{p}}$ 为影响光伏组件输出功率的温度系数；$T_{\mathrm{pv}}$ 为光伏组件的温度，℃；$T_{\mathrm{stc}}$ 标准测试条件下光伏组件的温度，℃；$P_{\mathrm{loss}}$ 光伏组件的损失系数。

济南市光伏板的安装倾角为 32°，太阳辐照强度要通过水平太阳辐射强度求得：

$$\mathrm{GTI}=\mathrm{GHI}\frac{\sin\left(\sigma+\theta\right)}{\sin\sigma} \tag{5}$$

式中：$\sigma$为仰俯角；$\theta$为光伏组件的倾斜角，济南市为 32°；GHI 为水平太阳辐射强度，kW/m$^2$。

$$\sigma=90-\varphi+\delta \tag{6}$$

$$\delta=23.4\cos\left[\frac{360}{365}\left(d+284\right)\right] \tag{7}$$

式中：$\varphi$为济南市的纬度，其值为 36.7°；$\delta$为济南市的赤纬角；$d$ 为日指数。

通过气象数据（环境温度、水平太阳辐射强度、风速等）对光伏组件温度按下式进行预测：

$$T_{\mathrm{pv}}=\mathrm{GHI}\mathrm{e}^{(r_1+r_2\times v)}+T_a \tag{8}$$

式中：$T_{\mathrm{a}}$ 为环境温度，℃；$v$ 当地风速，m/s；$r_1$ 和 $r_2$ 均为常数，$r_1$=–3.139，$r_2$=–0.305。

### 1.2.2 风电系统建模

风力发电机组的功率与风速有关，在理论上风电机组的输出功率为：

$$P_{\mathrm{wt}}=0.5\eta_{\mathrm{wt}}\rho Ac_{\mathrm{p}}\left(\lambda,\beta\right)v^3 \tag{9}$$

式中：$\rho$为空气密度，m$^3$/kg；$A$ 为风力发电机的叶片扫过的面积，m$^2$；$\eta_{\mathrm{wt}}$ 为风力发电机的机械效率；$c_{\mathrm{p}}$ 为风力发电机的功率系数，即叶尖速比$\lambda$和叶片桨

距角$\beta$的函数。

建立风电机组的多项式模型，采用风力发电机组功率曲线表的数据进行拟合，得到风电机组的数学模型，绘制 1 MW 风力发电机功率曲线如图 2 所示。当风速较小未达到切入风速时，输出功率为零，当达到切入风速时，则开始产生电能（图 2 区域 1）；随着风速的越来越高到达额定风速时，按照额定功率运行，当达到切断风速时，停止运转（图 2 区域 3）。风力发电机组的输出功率与风速的关系可以看作为分段函数，切入风速与额定风速之间（图 2 区域 2）建立了输出功率与风速的多项式模型[22]：

$$P_{\mathrm{wt}}(v)=k_i v^i+k_{i-1}v^{i-1}+\cdots+k_1 v+k_0 \tag{10}$$

式中：$k_1,\ldots,k_i$为系数；$k_0$为常数；$i$为多项式的次数。采用多项式回归的方法确定 $k_0,\ldots,k_i$的值。

计算了采用多项式模型拟合得出的功率与数据表中所给的功率之间的标准化均方根误差，多项式的次数越高，标准化均方根误差越小，为了简化模型，采用 7 次多项式对图 2 功率曲线中的区域 2 进行拟合。

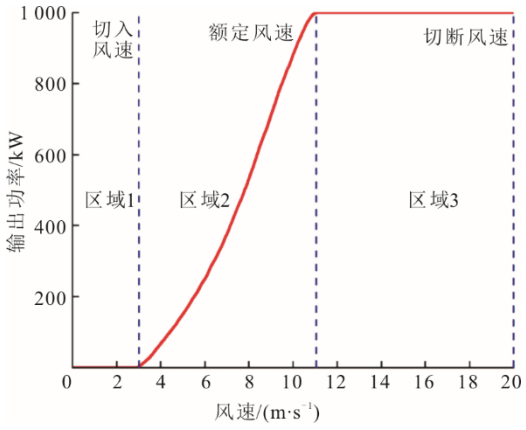



**图 2 1 MW 风力发电机功率曲线**
**Fig.2 Power curve of a 1 MW wind turbine**

由于每台风力机都会有不同的轮毂高度，通常较大的风力机轮毂高度较高；然而，只有部分特定轮毂高度的风速数据可以在网上获得，比如 10、50、100 m。因此，为了计算风力机的输出功率，将根据式(11)用每个风力机的轮毂高度对风速数据进行调整。

$$\frac{v(z_1)}{v(z_2)}=\left(\frac{z_1}{z_2}\right)^{\alpha} \tag{11}$$

式中：$z$为轮毂距离地面的高度，m；$\alpha$为风切变指数，取$\alpha$=0.143。

### 1.2.3 电解槽效率模型

在王尊博等[23]对电解槽建模的基础上对电解槽效率进行建模，得到电解槽系统的效率与其运行效率的关系曲线如图 3 所示。

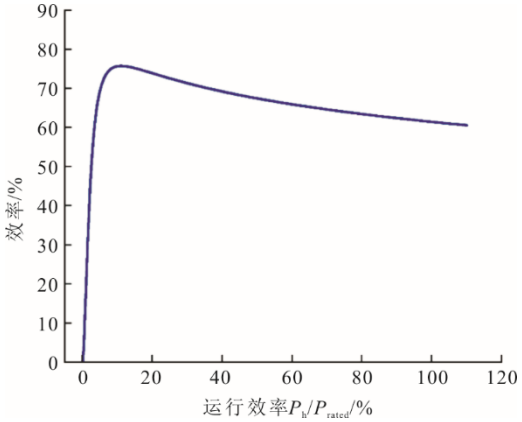



**图 3 仿真出的电解槽系统效率与其运行效率的关系曲线**
**Fig.3 The simulated relationship between the efficiency of the electrolytic cell system and its operating efficiency**

根据仿真所得系统效率与运行效率的关系曲线，采用指数模型为：

$$\eta_{\mathrm{el}}=b_1+b_2P_{\mathrm{el}}+b_3e^{\left(b_4\frac{P_{\mathrm{el}}}{P_{\mathrm{el,rated}}}\right)} \tag{12}$$

拟合得到参数 $b_1$=76.578 5，$b_2$=–0.016 2，$b_3$=–87.945 0，$b_4$=–47.371 8。

电解槽产生的氢气和用水量为：

$$m_{\mathrm{H_2}}=\frac{\eta_{\mathrm{el}}P_{\mathrm{el}}}{\mathrm{HHV}_{\mathrm{H_2}}} \tag{13}$$

$$m_{\mathrm{H_2O}}=30.3\cdot m_{\mathrm{H_2}} \tag{14}$$

式中：$\mathrm{HHV}_{\mathrm{H_2}}$为氢气的高热值为 38.9 (kW·h)/kg。

### 1.2.4 成本模型

基于 Reksten 等人[24]对 PEM 电解槽未来成本的研究中给出的电解槽成本数据，使用非线性拟合模型拟合出电解槽成本曲线，拟合模型如下：

$$C_{\mathrm{El}}=a\times\left(1-\mathrm{e}^{\left(-b\cdot P_{\mathrm{El,rated}}\right)}\right)^{c} \tag{15}$$

式中：$P_{\mathrm{El,rated}}$为电解槽额定功率；$a$、$b$、$c$为拟合参数；$C_{\mathrm{El}}$为电解槽成本，元/kW。

得出参数 $a$=7 934.734 32，$b$=0.116 99，$c$=–0.254 88，图 4 展示了通过使用非线性拟合模型拟合得出的 PEM 电解槽成本曲线。

整个可再生能源制氢园区的成本除了电解槽的成本以外还包含可再生能源设备（光伏和风电）的投资成本、运行及维护成本、电解槽的运行及维护成本、电解槽冷却用水和生产氢气的用水成本、

从电网购电成本。根据政策风力发电的投资成本约为 380 万元/MW，光伏发电的投资成本约为 345 万元/MW，风电的运行及维护成本按照风电成本的 3%计算，光伏的运行及维护成本按照光伏成本的 2%计算。电解槽的运行及维护成本按照电解槽成本的 2%计算。济南市非居民用水价格为 6.05 元/m$^3$，从国家电网查得购电成本，电价采用两部制电价。

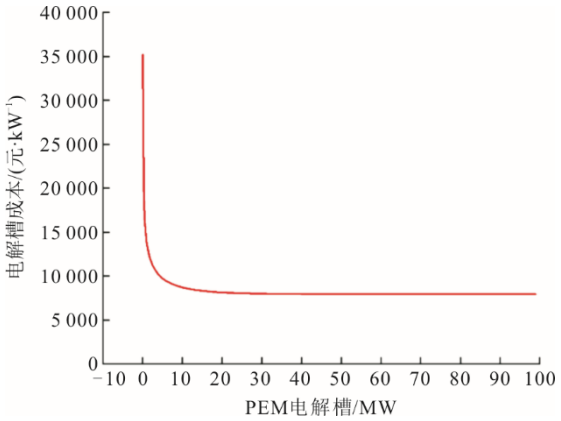



图 4 电解槽成本曲线

**Fig.4 Cost curve of the electrolyzer**

### 1.3 离散组合优化

为了探寻以 LCOH 较低为目标的纯光伏制氢系统、纯风电制氢系统和混合制氢系统的最佳容量配置，将光伏和电解槽额定功率的变化范围设置为 $P_{\mathrm{PV,rated}}$，$P_{\mathrm{EL,rated}}$=[1:0.25:5]，风力发电额定功率设置为 $P_{\mathrm{WT,rated}}$=[1 1.25 1.5 1.75 2 2.3 2.5 .75 3 3.3 3.5 3.8 4 4.2 4.5 4.8 5]。

针对离散组合优化首先获取太阳辐照度、风速、干球温度等气象数据，然后纯光伏制氢系统、纯风电制氢系统和混合制氢系统分别生成了 441、357 和 7 497 种组合。针对每种组合，依次计算电力平衡、制氢量、水消耗量，以及投资成本、运行维护成本、电力成本、水消耗成本，再据此算出氢的平准化成本和满载小时数，最终分类找出最小氢的平准化成本及其对应的满载小时数。采用离散组合优化的流程（图 5）。计算各组合氢的平准化成本 LCOH 和电解槽的满载小时数 $\mathrm{EL_{fulloadhour}}$，对每种组合进行对比分析，其公式分别如下：

$$\mathrm{LCOH}=\frac{\sum_{y=1}^{Y}\left(C_{\mathrm{invest}}^{y}+C_{\mathrm{O\&M}}^{y}+C_{\mathrm{water}}^{y}+C_{\mathrm{ET}}^{y}\right)/(1+r)^{y}}{\sum_{y=1}^{Y}m_{\mathrm{H_2}}^{y}/(1+r)^{y}} \tag{16}$$

$$\mathrm{EL_{fullloadhour}}=\frac{\sum_{h=1}^{HY}P_{\mathrm{EL},h,y}/P_{\mathrm{EL,rated}}}{HY} \tag{17}$$

式中：$C_{\mathrm{invest}}^{y}$ 为投资成本，元；$C_{\mathrm{O\&M}}^{y}$ 为运维成本，元；$C_{\mathrm{water}}^{y}$ 为用水成本，元；$C_{\mathrm{ET}}^{y}$ 为电力成本，元；$m_{\mathrm{H_2}}^{y}$ 为制氢量，kg。

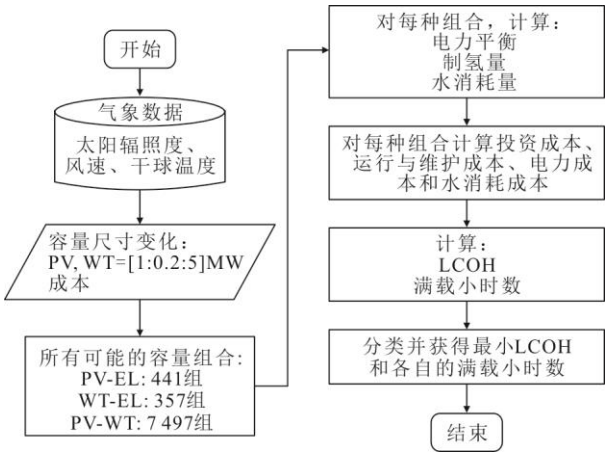



图 5 计算最佳 LCOH 流程

**Fig.5 Flow chart for calculating the optimal LCOH**

### 1.4 MOSFLA 模型优化

在确定园区内光伏和风电制取绿色氢的最佳容量比时，无论电解槽的大小研究均采用较小规模的增量步长。由于该步长设置会增加计算量，为满足算力需求，研究采用一种元启发式多目标优化算法—多目标蛙跳算法，来获得近似最优解。图 6 展示了在特定电解槽容量下采用 MOSFLA 模型得到最佳光伏和风力发电容量比的流程。

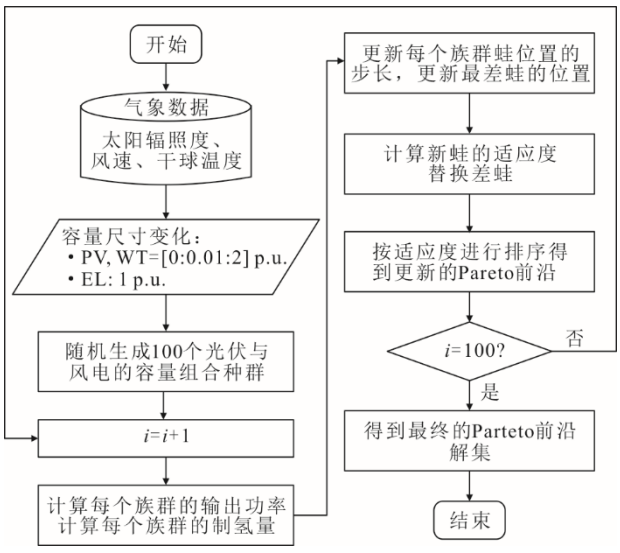



图 6 MOSFLA 模型优化一定电解槽容量下的最佳光伏和风力发电容量比的流程

**Fig.6 The process of MOSFLA optimizing the optimal ratio of photovoltaic and wind power generation capacities at a certain electrolyzer capacity**

优化流程首先确定初始输入数据，包括天气数据以及光伏和风力发电的额定功率阵列。阵列中的

容量大小标幺值（p.u.）表示相对于电解槽容量的数值。将电解槽的标称容量定义为 1 来表示电解槽的任意容量。优化过程中，光伏和风电的容量变化设置在 0~2 的范围内，设置该约束主要考虑到风电可能一直存在，1 个容量为 2 的风力涡轮机足以连续供应最大容量为 1 的电解槽。将步长设置为 0.01，光伏和风电的容量变化范围设置为：

$$P_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{MOSFLA}}, P_{\mathrm{WT}}^{\mathrm{MOSFLA}} = [0:0.01:2] \tag{18}$$

采用 MOSFLA 模型优化时首先进行参数初始化，随机生成 100 个蛙的种群，即随机生成光伏与风电的组合。对 MOSFLA 模型优化中与目标函数相关的各粒子进行适应度检查，采用非支配排序（pareto non-dominated sorting）评估个体适应度。优化中考虑最大化绿色制氢和最小化可再生能源发电厂部署成本 2 个目标函数。

$$\mathrm{OF}_1 = \max \sum_{h=1}^{H} m_{\mathrm{H}_2,h} \tag{19}$$

$$\mathrm{OF}_2 = \min \sum_{h=1}^{H} P_{\mathrm{export},h} \tag{20}$$

按青蛙适应度值排序，将其划分到 20 个族群中，每个族群 5 只青蛙。依次把适应度最优的青蛙分配到各族群，保证每个族群有较优个体引导搜索，保证族群的多样性。

确定各族群的最优蛙 $P_{\mathrm{b}}$ 和最差蛙 $P_{\mathrm{W}}$，按式(21)更新蛙位置步长 $D$，按式(22)更新最差蛙位置。所有子群体完成局部搜索后，重组为新的种群，重新评估个体适应度，更新 Pareto 前沿。达到最大迭代次数时输出最终的 Pareto 前沿解集。

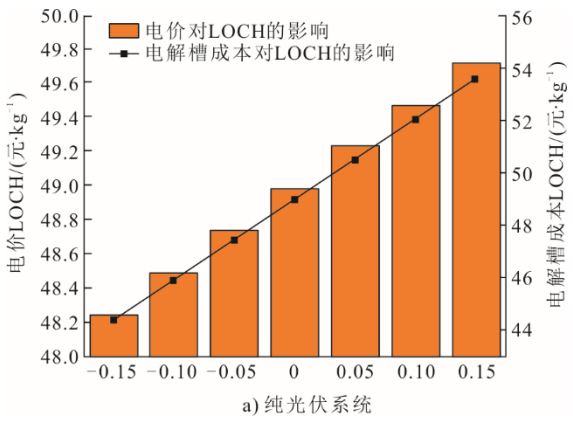
$$D = \mathrm{rand} \times \left(P_{\mathrm{b}} - P_{\mathrm{w}}\right) \tag{21}$$

$$P'_{\mathrm{w}} = P_{\mathrm{w}} + D \tag{22}$$

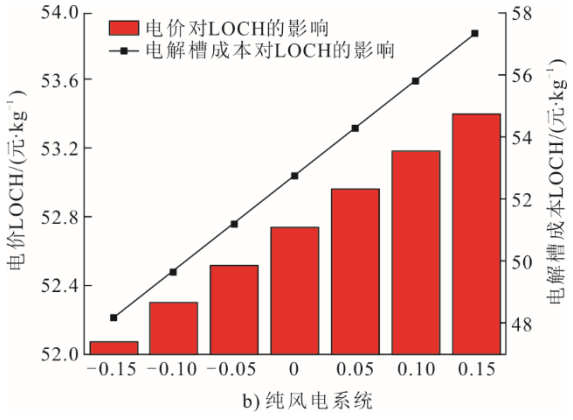
与传统多目标遗传算法相比，MOSFLA 模型通过“族群局部搜索−全局重组”机制提升了优化效率，一方面族群的划分确保了搜索空间的均匀覆盖，避免了传统遗传算法中“精英保留策略”导致的早熟收敛；另一方面蛙位置更新式(21)引入随机扰动因子 rand，增强了对复杂非线性目标函数的适应性。仿真表明，MOSFLA 模型的 Pareto 前沿解集在总容量 2.05 MW 的制氢量 2 949.62 kg，MOSFLA 模型的解集分布更为均匀，验证了该算法在处理风光互补系统多目标优化问题时的优越性。

### 1.5 敏感性分析

针对电价和电解槽成本对 LCOH 的影响进行敏感性分析，光伏投资成本设定为 345 万元/MW，运维成本按照投资成本的 2%设置[23-25]，风电投资成本为 380 万/MW，运维成本按投资成本的 3%设置[26]，给定电解槽成本和电价一个基准值，电解槽投资成本的基准值是通过式(15)的成本模型计算得出，其运维成本按投资成本的 2%设置，电价的基准值采用的是从国家电网获取的济南市工业两部制逐时电价数据，电价变化指对全年 8 760 h 的电价进行等比例的调整。电解槽水消耗量为 0.89 kg/m$^3$（以单位体积 $H_2$ 计，下同），制氢量为 1 000 m$^3$/h 设置[27]。分析时，在基准值的基础上，将电价和电解槽成本分别在±15%的范围内，以 5%为步长进行单因素调整变化，即调整一个变量时另一个变量保持基准值不变进行计算 LCOH。图 7 为 3 个系统 LCOH 对电价和电解槽成本敏感性。图 7 分析表明，电价和电解槽成本与 LCOH 均呈现正相关的趋势，其中电价波动对 3 类系统的 LCOH 影响均较小。对于纯光伏系统，在给定的电价波动区间内 LCOH 为 48.247~49.728 元/kg（以单位体积 $H_2$ 计，下同），其变化范围较小，经计算其平均变化值约为 0.004 元/kg。这是由于光伏发电自供率较高，电网购电占比小，且购售电价同步变化削弱了净成本影响。而电解槽成本每降低 10%，纯光伏系统 LCOH 下降约 7.2%，印证了设备成本对该系统的核心影响。




a) 纯光伏系统




b) 纯风电系统

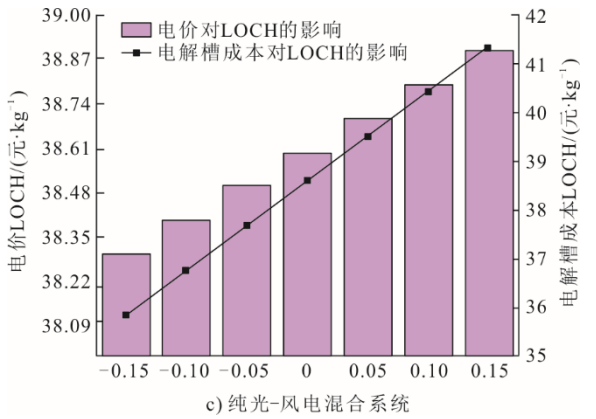



**图 7 LCOH 对电价和电解槽成本敏感性**
**Fig.7 Sensitivity analysis of LCOH to electricity prices and electrolyzer costs**

对于纯风电系统，电价每变化 5%，LCOH 平均波动约 0.005 元/kg，尽管其波动在 3 类系统中相对最大，但整体成本依然较小，这可能归因于风电输出的间歇性导致电力调配对外部电价更为敏感。同时，电解槽成本变化对风电系统 LCOH 的影响也很大，但与光伏系统相比影响较小，当电解槽成本降低 30%时，LCOH 从 57.346 元/kg 下降到 48.143 元/kg，电解槽成本每降低 5%，LCOH 随之下降约 1.5 元/kg，电解槽成本的敏感性比较高。

光伏风电混合系统在电价方面展现出比较好的抗扰动能力，当电价上下浮动 15%时，LCOH 从 38.303 元/kg 变化到 38.896 元/kg，仅变化了 0.593 元/kg，说明混合系统能够降低电价波动引起的成本变化。在电解槽成本方面对于混合系统的 LCOH 的影响仍然很显著，当电解槽成本在基准值上下浮动 15%时，LCOH 从 35.838 元/kg 变化到 41.360 元/kg，总波动幅度为 5.522 元/kg。这表明电解槽技术的成本优化对于降低混合系统制氢成本至关重要。

3 类系统中 LCOH 随电价波动均很小，电解槽成本对系统经济性影响的差异显著。纯光伏系统对设备成本敏感性较高，纯风电系统受电价波动影响相对突出，光伏−风电混合系统中 LCOH 受影响较小，混合系统能源互补特性展现出对成本波动更好的适应性。这表明在降低 LCOH 的策略制定中，可以通过混合系统的优化能源配置来实现较小的成本波动，为制氢项目的经济性优化和风险规避提供了重要决策依据。

## 2 模拟结果与讨论

### 2.1 可再生能源容量配置对 LCOH 的影响

#### 2.1.1 纯光伏园区

对于纯光伏可再生能源发电系统，式(4)中的 $f_d$ 和 $k_p$ 分别为 0.5%和–0.003 6，光伏组件倾斜角度 $\theta$ 为 32 °。根据如图 5 所示最佳 LCOH 的计算方法，通过迭代 441 个纯光伏系统条件下不同光伏−电解槽配置组合，选择其中 10 个最小的 LCOH 值见表 1。光伏和 PEM 电解槽容量在 1~5 MW 内，纯光伏系统的 LCOH 的平均值为 31.60 元/kg，平均满载小时数为 1 598 h。光伏和 PEM 电解槽容量分别为 5.0、4.2 MW 时，纯光伏系统 LCOH 最小（31.48 元/kg），此时电解槽满负荷时长约为 1 590 h，经济性较低。

**表 1 纯光伏系统条件下最优 LCOH**
**Tab.1 Optimal LCOHs under pure PV system conditions**

| 序号 | LCOH/(元·kg⁻¹) | 满载小时数/h | 光伏容量/MW | 电解槽容量/MW | PV-PEM 比率 | 能源出口/(MW·h·a⁻¹) | 能源进口/(MW·h·a⁻¹) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 31.48 | 1 590 | 5.0 | 4.2 | 1.19 | 5 407.21 | 1 943.64 |
| 2 | 31.50 | 1 511 | 5.0 | 4.4 | 1.14 | 5 097.13 | 2 039.20 |
| 3 | 31.51 | 1 673 | 5.0 | 4.0 | 1.25 | 5 733.00 | 1 848.31 |
| 4 | 31.54 | 1 440 | 5.0 | 4.6 | 1.09 | 4 801.39 | 2 135.26 |
| 5 | 31.57 | 1 756 | 5.0 | 3.8 | 1.32 | 6 075.55 | 1 752.29 |
| 6 | 31.62 | 1 359 | 5.0 | 4.8 | 1.04 | 4 521.62 | 2 231.33 |
| 7 | 31.67 | 1 596 | 4.8 | 4.0 | 1.20 | 5 241.88 | 1 850.29 |
| 8 | 31.68 | 1 518 | 4.8 | 4.2 | 1.14 | 4 929.61 | 1 945.73 |
| 9 | 31.69 | 1 850 | 5.0 | 3.6 | 1.39 | 6 436.28 | 1 657.17 |
| 10 | 31.70 | 1 687 | 4.8 | 3.8 | 1.26 | 5 570.85 | 1 754.52 |

此外，特定电解槽容量下光伏容量增量与 LCOH 的关系如图 8 所示。可以看出，LCOH 不随光伏容量的变化而线性增加或减少。当光伏容量远小于电解槽的额定容量时，LCOH 较高，因为系统

需要更多的进口电力来运行电解槽最小运行容量。

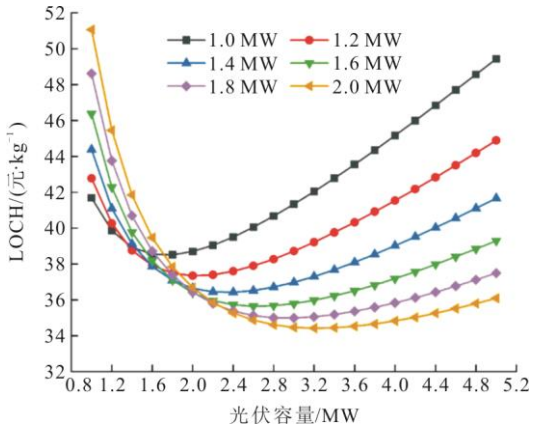



**图 8 特定电解槽容量下不同 LCOH 随光伏容量变化**
**Fig.8 Change curves of different LCOHs with photovoltaic capacity at specific cell capacities**

LCOH 随着光伏容量的增加而减小，并在某一时刻达到最优值；随着光伏容量继续增加，LCOH 值逐渐增加。这是因为在达到最优值后，在较高的光伏容量下及高辐照强度下光伏发电系统的输出功率将大于电解槽额定功率；因此，这些能量将被输出到电网，而不是被转换成氢气。同时，光伏容量越大，光伏装置的投资成本越高，LCOH 值也越高。光伏容量与电解槽容量的最佳容量比计算结果显示，在迭代达到仿真中最大光伏容量即 5.0 MW 之前，光伏容量与电解槽容量的最佳容量比约为 2.2。

### 2.1.2 纯风电园区

与纯光伏系统相比，风力发电具有全天可发电的优势，但其投资成本相对较高。仿真中使用的每台风力机都有自己的功率特性曲线和预期轮毂高度，因此每台风力机的容量因子均有所不同。按照风力机从小到大的容量顺序，每台风力机的容量因子为：

$$C_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}0.24,0.23,0.21,0.22,0.29,0.31,0.34,0.29,0.43,\\0.44,0.43,0.45,0.41,0.52,0.56,0.45,0.50\end{bmatrix}$$

根据如图 5 最佳 LCOH 的计算方法，通过迭代 357 个纯风电系统条件下不同风电−电解槽配置组合，选择其中 10 个最小的 LCOH 值，具体如表 2 所示。纯风电系统 LCOH 的平均值为 22.62 元/kg。平均满载小时数为 2 685 h。风电装机容量为 4.8 MW，电解槽装机容量为 5.0 MW 时为最优组合，LCOH 为 22.3 元/kg。可见，与光伏相比，选择风电为电解槽供电更经济。

**表 2 纯风电系统条件下最优 LCOH**
**Tab.2 Optimal LCOHs under pure wind power system conditions**

| 序号 | LCOH/(元·kg⁻¹) | 满载小时数/h | 风电容量/MW | 电解槽容量/MW | PV-PEM 比率 | 能源出口/(MW·h·a⁻¹) | 能源进口/(MW·h·a⁻¹) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 22.30 | 3 154 | 4.8 | 5.0 | 0.96 | 22 016.06 | 1 833.00 |
| 2 | 22.41 | 3 154 | 5.0 | 5.0 | 1.00 | 23 590.48 | 1 833.00 |
| 3 | 22.53 | 3 154 | 4.8 | 4.8 | 1.00 | 22 646.86 | 1 759.68 |
| 4 | 22.57 | 1 590 | 4.5 | 4.8 | 0.94 | 20 459.77 | 1 759.68 |
| 5 | 22.60 | 3 154 | 4.5 | 4.6 | 0.98 | 20 916.03 | 1 686.36 |
| 6 | 22.65 | 3 154 | 5.0 | 4.8 | 1.04 | 24 221.28 | 1 759.68 |
| 7 | 22.71 | 1 590 | 4.5 | 5.0 | 0.90 | 20 141.77 | 1 833.00 |
| 8 | 22.73 | 1 590 | 4.2 | 4.4 | 0.95 | 19 222.99 | 1 613.04 |
| 9 | 22.79 | 3 154 | 4.8 | 4.6 | 1.04 | 23 277.66 | 1 686.36 |
| 10 | 22.87 | 3 154 | 4.5 | 4.4 | 1.02 | 21 546.83 | 1 613.04 |

图 9 为固定电解槽容量下风电容量与 LCOH 值的关系。可以看出，随着风电装机容量的增加，LCOH 将增大，这可能是由于随着风电容量的增大初投资也增大。

风力发电机与 PEM 电解槽容量的最佳容量比计算结果表明，当电解槽容量在 1.0~1.4 MW 时，1.5 MW 的风电功率较优，可以提供 1.4 MW 容量电解槽所需要的电力。

### 2.1.3 光伏−风电混合可再生能源园区

根据如图 5 最佳 LCOH 的计算方法，通过迭代 7 497 个光伏−风电混合系统条件下不同光伏−风电−电解槽配置组合，选择其中 10 个最小的 LCOH 值，具体如表 3 所示。可以看出，与纯风系统相比，光伏−风电混合系统将 LCOH 的平均值由 22.62 元/kg 降低至 17.84 元/kg，降低了 4.78 元/kg。光伏−风电混合系统最优的 LCOH 为 17.83 元/kg，与邓振宇等[28]的研究相比 LCOH 降低了 2.17 元/kg。与表 1、表 2 对比可见，混合系统的平均 LCOH 较纯光伏降低 43.54%，较纯风电降低 21.13%；混合系统满负荷小时数较纯光伏提升 1.1 倍，较纯风电提升

25.44%，从而验证了风光互补对设备利用率与经济性的双重优化。

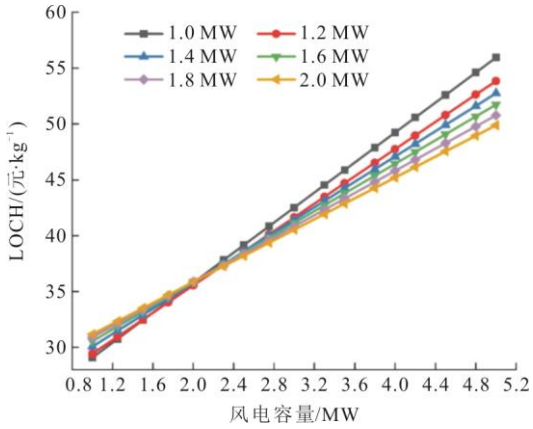



图 9 特定电解槽容量下不同 LCOH 随风电容量变化

**Fig.9 Changes of different LCOHs with the capacity of wind power at specific cell capacities**

表 3 光伏−风电混合系统条件下最优的 LCOH

**Tab.3 Optimal LCOHs under the conditions of photovoltaic wind power hybrid system**

| 序号 | LCOH/(元 kg$^{-1}$) | 满载小时数/h | 光伏容量/MW | 风电容量/MW | 电解槽容量/MW |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 17.83 | 3 357 | 2.6 | 3.8 | 5 |
| 2 | 17.83 | 3 378 | 2.8 | 3.5 | 5 |
| 3 | 17.83 | 3 310 | 2.6 | 3.5 | 5 |
| 4 | 17.83 | 3 376 | 2.6 | 4.0 | 5 |
| 5 | 17.83 | 3 423 | 2.8 | 3.8 | 5 |
| 6 | 17.84 | 3 361 | 2.8 | 3.3 | 5 |
| 7 | 17.84 | 3 296 | 2.6 | 3.3 | 5 |
| 8 | 17.84 | 3 445 | 2.8 | 4.0 | 5 |
| 9 | 17.84 | 3 414 | 2.6 | 4.2 | 5 |
| 10 | 17.85 | 3 324 | 2.8 | 3.0 | 5 |

### 2.2 可再生能源最佳容量配置

采用 MOSFLA 模型对园区内可再生能源的容量配比进行优化，得到最大制氢量。以 1 表示电解槽容量，单位为 p.u.，光伏和风电容量为电解槽容量的相对容量，对光伏−风电混合园区生产绿氢的规模进行优化模拟。模拟种群为 100 个，迭代 50 次。图 10 为采用 MOSFLA 进行 10 次模拟运算的结果。模拟得出最优配置为光伏容量 1.50 MW，风电容量 0.55 MW，总装机容量（风电与光伏）为 2.05 MW 时，可实现最大制氢量 2 949.62 kg。从模拟结果可见，各次模拟所得的最优光伏容量、最优风电容量、最大制氢量以及最小总容量呈现出一定的离散性与规律性。光伏容量在整体系统配置中的占比相对重要且具有一定弹性，最优光伏容量在 0.99~1.72 MW 间波动，均值为 1.50 MW。最优风电容量范围为 0.04~0.96 MW，均值为 0.55 MW，相较于光伏容量，其波动范围较大且整体均值相对较低。就最大制氢量而言，不同模拟次数下制氢量从 2 587.44 kg 至 3 368.61 kg 不等，平均值达到 2 949.62 kg，反映出系统在不同的光伏、风电容量配比下，制氢能力存在差异，但整体的制氢水平较好。最小总容量方面，数值区间为 1.52~2.66 MW，平均为 2.05 MW，体现了系统在追求最大制氢量时，总容量在一定范围内变化。

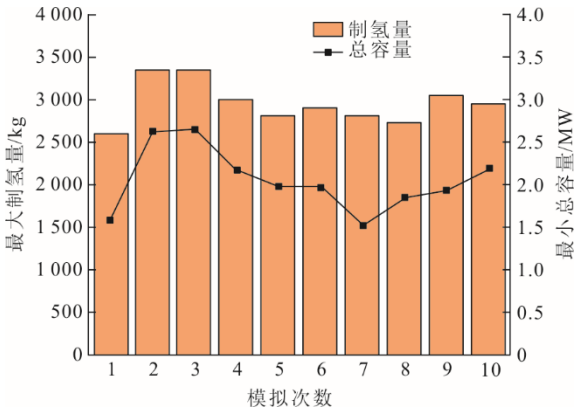



图 10 以电解槽容量为基础容量的 MOSFLA 优化结果

**Fig.10 Optimization results of MOSFLA using electrolytic cell capacity as the base capacity**

图 11 为优化得到最大制氢量与最小总容量的帕累托前沿。整体来看，制氢量与总容量呈现正相关趋势，随着总容量的增加，制氢量随之上升，表明随着总容量的增加制氢量增加的幅度逐渐减小，同时成本也会随之增加。优化输出的最佳容量配置约为 2.05 MW，此时制氢量约 2 950 kg。

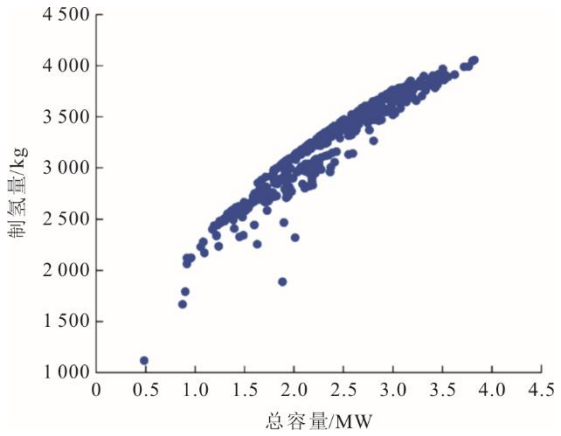



图 11 MOSFLA 优化的帕累托前沿

**Fig.11 Pareto frontier of MOSFLA optimization**

## 3 结 论

本研究针对光伏和风力发电为动力的水电解制氢系统进行了深入的规划与优化。考虑到可再生

能源输出的间歇性对制氢经济性的影响，构建了电解槽系统效率与运行功率、投资成本与容量之间的详细数学模型，分别采用离散组合算法和多目标蛙跳优化算法，确定了使氢气平准化成本最小化的光伏、风电和电解槽的最优容量配置，优化光伏与风电最佳容量比，确定最大化氢气产量。主要研究结论如下。

1）在太阳能资源潜力较低的区域，纯光伏系统的 LCOH 高达每千克 $H_2$ 31.48 元；此外，纯光伏制氢系统中电解槽的满负荷运行小时数仅约 1 590 h，表明其在经济性上存在较大劣势。

2）光伏与风电混合配置在电解槽满负荷运行小时数达到约 3 400 h 时，可实现最低 LCOH，仅为每千克 $H_2$ 17.83 元。

3）随着光伏容量的增加，混合系统 LCOH 呈先下降后上升的趋势，表明存在一个最优容量配置。通过 MOSFLA 优化，最优配置为光伏容量 1.50 MW、风电容量 0.55 MW，总装机容量为 2.05 MW 时，可实现最大制氢量 2 949.62 kg。在混合系统中风电相对于光伏具有更明显的优势。

4）与传统多目标遗传算法相比，MOSFLA 通过“族群局部搜索-全局重组”机制提升了优化效率，在处理风光互补系统多目标优化问题时更具优越性。

## [参 考 文 献]


[1] 李琳红, 郑淑晶, 陈吉升, 等. 中国氢能供热行业发展战略研究[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 56-64.
LI Linhong, ZHENG Shujing, CHEN Jisheng, et al. Develop-ment strategy of hydrogen heating industry in China[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 56-64.

[2] 杜冬梅, 曹冬惠, 何青. “双碳”目标下我国电力行业低碳转型的思路探讨[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 1-9.
DU Dongmei, CAO Donghui, HE Qing. Discussion on low-carbon transformation of China's power industry under the “double-carbon” goal[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 1-9.

[3] 葛磊蛟, 李京京, 李昌禄, 等. 面向零碳园区的综合能源系统优化运行技术综述[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1821-1835.
GE Leijiao, LI Jingjing, LI Changlu, et al. Overview of integrated energy system optimal operation technology for zero-carbon parks[J]. Power Grid Technology, 2024, 48(5): 1821-1835.

[4] WANG Y, MAO Y, YANG K, et al. Enhancing PEMEC Efficiency: a synergistic approach using CFD analysis and Machine learning for performance optimization[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 255: 124018.

[5] MOHIDEEN M M, SUBRAMANIAN B, SUN J, et al. Techno-economic analysis of different shades of renewable and non-renewable energy-based hydrogen for fuel cell electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 174: 113153.

[6] NONG K, SUN W, SHEN L, et al. Future pathways for green hydrogen: Analyzing the nexus of renewable energy consumption and hydrogen development in Chinese cities[J]. Renewable Energy, 2024, 237: 121507.

[7] 张琪. 基于可再生能源水电解制氢技术发展概述[J]. 当代化工研究, 2023(2): 14-16.
ZHANG Qi. Overview of the development of hydrogen production technology by water electrolysis based on renewable energy[J]. Modern Chemical Research, 2023(2): 14-16.

[8] CHI J, YU H. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2018, 39(3): 390-394.

[9] 何壮, 戚明睿. PEM 水电解制氢研究现状与展望[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(11): 129-133.
HE Zhuang, QI Mingrui. Current status and prospects of hydrogen production by PEM electrolysis[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2024, 50(11): 129-133.

[10] 张正, 宋凌珺. 电解水制氢技术: 进展、挑战与未来展望[J]. 工程科学学报, 2025, 47(2): 282-295.
ZHANG Zheng, SONG Lingjun. Hydrogen production by water electrolysis: advances, challenges and future prospects[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(2): 282-295.

[11] 滕越, 赵骞, 张红, 等. 新能源-质子交换膜电解槽电制氢容量双层规划模型研究[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 37-46.
TENG Yue, ZHAO Qian, ZHANG Hong, et al. Study on double-layer planning model for hydrogen production capacity of new energy proton exchange membrane electrolyzer[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 37-46.

[12] 梁涛, 孙博峰, 刘伟, 等. 可再生能源制氢系统多目标优化调度[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 226-235.
LIANG Tao, SUN Fufeng, LIU Wei, et al. Multi-objective optimal scheduling of renewable energy hydrogen production system[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(1): 226-235.

[13] 梁涛, 孙博峰, 谭建鑫, 等. 基于深度强化学习算法的风光互补可再生能源制氢系统调度方案[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2264-2274.
LIANG Tao, SUN Bofeng, TAN Jianxin, et al. Scheduling scheme of wind-solar complementary renewable energy hydrogen production system based on deep reinforcement learning[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2264-2274.

[14] HUSSAM W K, BARHOUMI E M, ABDUL-NIBY M, et al. Techno-economic analysis and optimization of hydrogen production from renewable hybrid energy systems: Shagaya renewable power plant-Kuwait[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 58: 56-68.

[15] LI L L, ZHANG Z Y, SETHANAN K, et al. Multi-energy synergistic planning of distributed energy supply system: Wind-solar-hydrogen coupling energy supply[J]. Renewable Energy, 2024, 237: 121769.

[16] LV M, GOU K, CHEN H, et al. Optimal Design of Wind-Solar complementary power generation systems considering the maximum capacity of renewable energy[J]. Energy, 2024, 312: 133650.

[17] 郝晓弘, 王锐, 裴婷婷, 等. 基于改进鲸鱼算法的微电网系统容量优化研究[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(3): 11-16.
HAO Xiaohong, WANG Rui, PEI Tingting, et al. Research on microgrid system capacity optimization based on improved whale algorithm[J]. Automation & Instrumentation, 2022, 37(3): 11-16.
[18] 陈梦萍, 任建兴, 李芳芹. 风光互补与电解水制氢系统负荷的协调稳定运行[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 344-350.
CHEN Mengping, REN Jianxing, LI Fangqin. Coordinated and stable operation of wind solar complementarity and load of electrolytic water hydrogen production system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(3): 344-350.
[19] ZHANG H, SU S, LIN G, et al. Efficiency calculation and configuration design of a PEM electrolyzer system for hydrogen production[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2012, 7(5): 4143-4157.
[20] 胡兵, 徐立军, 何山, 等. 碳达峰与碳中和目标下 PEM 电解水制氢研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(9): 4595-4604.
HU Bing, XU Lijun, HE Shan, et al. Researching progress of hydrogen production by PEM water electrolysis under the goal of carbon peak and carbon neutrality[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(9): 4595-4604.
[21] 李军舟, 赵晋斌, 陈逸文, 等. 考虑动态功率区间和制氢效率的电转氢(P2H)设备容量配置优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38: 4864-4874.
LI Junzhou, ZHAO Jinbin, CHEN Yiwen, et al. Optimization of capacity configuration for power-to-hydrogen (P2H) equipment considering dynamic power range and hydrogen production efficiency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38: 4864-4874.
[22] 吴玲玲, 冯再勇, 张轶, 等. 基于多项式拟合的大型风电场运行状况分析[J]. 科技创新与应用, 2021(9): 60-62.
WU Lingling, FENG Zaiyong, ZHANG Yi, et al. Analysis of operating conditions for large-scale wind farms based on polynomial fitting[J]. Technology Innovation and Application, 2021(9): 60-62.
[23] 王尊博, 徐超群, 何勇, 等. 基于 simulink 的三种质子交换膜电解槽模型对比[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(3): 486-494.
WANG Zunbo, XU Chaoqun, HE Yong, et al. Comparison of three proton exchange membrane cell models using simulink[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(3): 486-494.
[24] REKSTEN A H, THOMASSEN M S, MØLLER-HOLST S, et al. Projecting the future cost of PEM and alkaline water electrolysers: a CAPEX model including electrolyser plant size and technology development[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(90): 38106-38113.
[25] 王恒田, 杨晓龙. 平价上网光伏发电项目经济性评价、影响因素及对策[J]. 企业经济, 2021, 40(3): 96-104.
WANG Hengtian, YANG Xiaolong. Economic evaluation, influencing factors and countermeasures of grid-parity photovoltaic power generation projects[J]. Enterprise Economy, 2021, 40(3): 96-104.
[26] 闫庆友, 朱明亮. 基于 LCOE 法的风电并网经济性实证研究[J]. 技术经济与管理研究, 2017(11): 21-25.
YAN Qingyou, ZHU Mingliang. Empirical research on economy of wind power grid connected based on LCOE method[J]. Technical Economics and Management Research, 2017(11): 21-25.
[27] 张理, 叶斌, 尹晨旭, 等. 风电制氢经济性及发展前景分析[J]. 东北电力技术, 2020, 41(7): 5-9.
ZHANG Li, YE Bin, YIN Chenxu, et al. Economy and development prospects analysis of wind power hydrogen production[J]. Northeast Electric Power Technology, 2020, 41(7): 5-9.
[28] 邓振宇, 张润之, 张文韬, 等. 风光电解水制氢平准化成本优化空间分析[J]. 广东电力, 2024, 37(7): 22-31.
DENG Zhenyu, ZHANG Runzhi, ZHANG Wentao, et al. Levelized cost optimization space analysis for wind-solar electrolytic water electrolyzing hydrogen generation[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(7): 22-31.

（责任编辑 杨嘉蕾）