DOI: 10.19666/j.rlfd.202408202

基于 LHS-MC 长时段随机场景的多类型电解槽制氢系统容量配置优化

罗宗杰[1]，谢定兵[1]，郝 鑫[1]，黄 滢[1]，吕美琪[1]，薛小军[2]
（1. 广东电网有限责任公司湛江供电局，广东 湛江 524000；
2. 山西大学电力与建筑学院，山西 太原 030031）

［摘 要］【目的】为加快实现“双碳”目标，提高绿氢系统投资经济性与供氢稳定性，设计一种离网型多类型电解槽集群制氢系统。【方法】首先，对系统内多类型电解槽集群启停运行特性进行建模，考虑后端化工生产稳定氢气供应约束，以净收益最大为目标建立离网绿氢系统容量配置优化模型。其次，对风光出力的不确定性进行分析，利用 *k*-means 聚类算法得到多组风光联合出力场景，采用拉丁超立方抽样（latin hypercube sampling，LHS）描述风光出力的日内随机性，构造马尔可夫链（Markov chain，MC）模拟风光出力的相邻日间相关性，并生成所需的长时段风光出力随机场景。最后，基于新疆某绿氢项目构造案例进行仿真分析。【结果】所提长时段随机场景生成方法能够有效模拟连续风光出力场景不确定性与相关性，相比于单一电解槽配置方案，多类型电解槽方案可以有效提高系统经济性。【结论】多类型电解槽集群与长时段随机场景生成方法相结合，可增强离网绿氢系统的经济性与运行可靠性，为高比例可再生能源制氢系统规划提供参考。

［关 键 词］风光不确定性建模；碱性电解槽；质子膜电解槽；绿氢；容量配置

［引用本文格式］罗宗杰，谢定兵，郝鑫，等. 基于 LHS-MC 长时段随机场景的多类型电解槽制氢系统容量配置优化[J]. 热力发电，2026，55(7)：122. Luo Z J, Xie D B, Hao X, et al. Optimization of capacity configuration for multi-type electrolyzer hydrogen production system based on long-term stochastic scenarios using LHS-MC[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(7): 122.

Optimization of capacity configuration for multi-type electrolyzer hydrogen production system based on long-term stochastic scenarios using LHS-MC

Luo Zongjie[1], Xie Dingbing[1], Hao Xin[1], Huang Ying[1], Lü Meiqi[1], Xue Xiaojun[2]
(1. Zhanjiang Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhanjiang 524000, China;
2. School of Electric Power, Civil Engineering and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: [Objective] To accelerate the realization of the “dual carbon” goals and improve both the economic viability and hydrogen supply stability of green hydrogen systems, this study designs an off-grid hydrogen production system utilizing a multi-type electrolyzer cluster. [Methods] First, the start-stop operational characteristics of the multi-type electrolyzer cluster were modeled. Considering the constraints of stable hydrogen supply for downstream chemical production, a capacity configuration optimization model for the off-grid green hydrogen system was established with the objective of maximizing net revenue. Second, the uncertainty of wind and solar power output was analyzed. The *k*-means clustering algorithm was utilized to obtain multiple joint wind-solar output scenarios. Latin hypercube sampling (LHS) was employed to describe the intraday randomness of wind and solar output, while a Markov Chain (MC) was adopted to simulate the inter-day correlation, thereby generating the required long-term stochastic scenarios. Finally, a case study was conducted based on a specific green hydrogen project in Xinjiang for simulation analysis. [Results] The proposed long-term stochastic scenario generation method can effectively simulate the uncertainty and correlation of continuous wind and solar power output. Compared with

收 稿 日 期：2026-01-08 修 回 日 期：2026-02-03 接 受 日 期：2026-03-10
基 金 项 目：广东电网有限责任公司湛江供电局科技项目（0308002023030201JF00060）
Supported by: Science and Technology Project of Zhanjiang Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd. (0308002023030201JF00060)
第一作者简介：罗宗杰（1984），男，硕士，主要研究方向为电网规划、配网生产，scutluozongjie@163.com。
通信作者简介：薛小军（1992），男，博士，讲师，主要研究方向为先进能源动力系统，XXJ377547176@163.com。

single-type electrolyzer configuration schemes, the multi-type electrolyzer scheme can significantly improve system economics. [Conclusion] The combination of a multi-type electrolyzer cluster and the long-term stochastic scenario generation method enhances the economic performance and operational reliability of off-grid green hydrogen systems, providing a reference for the planning of high-proportion renewable energy hydrogen production systems.
Key words: wind and solar uncertainty modeling; alkaline electrolyzers; proton exchange membrane electrolyzers; green hydrogen; capacity allocation

大力推动可再生能源技术的发展，提高可再生能源在能源结构中的占比，是实现双碳目标的重要途径[1]。然而，可再生能源本身的波动性和间歇性给电网稳定运行带来了挑战[2]。通过电解水制氢技术将可再生电力制成氢气，有望减弱可再生能源对电网冲击，实现规模化消纳[3]。同时，氢能具有能量密度高、储存时间长、损耗小等优点，广泛应用于石油炼制以及氨、甲醇和钢铁的生产，是现代化工不可缺少的重要组成部分[4]。利用可再生能源制取的绿氢替代传统灰氢，能显著降低氢能产业链的碳排放强度[5]。

对绿氢系统内各设备的容量与运行策略进行科学配置与优化，可以实现系统协调运行，提高系统经济性与供能稳定性。国内外学者已从多个角度对绿氢系统展开研究。文献[6-8]提出了一种风光氢综合能源系统，通过优化碱性电解槽（alkaline electrolyzer，AEL）设备容量有效提升了系统经济效益。文献[9-11]提出了对碱性电解槽、质子膜电解槽（proton exchange membrane electrolysis，PEMEL）动态运行特性进行建模，显著提升了系统运行效率。现有文献多关注于单一类型电解槽所构成的绿氢系统，并且通常将制氢设备模型简化为单台设备进行建模[12]。此外，上述研究中多假设绿氢产品直接向市场销售，未考虑绿氢系统下游用氢端的实际生产对氢气稳定供应需求，例如合成绿氨、合成绿色甲醇等大型化工工艺的连续、平稳氢气供应的要求。忽略多类型电解槽集群制氢过程中的运行特性差异及氢气稳定供应实际需求，会导致系统设备容量优化结果难以满足工程应用标准。

由于可再生出力具有较大的不确定性，其对绿氢系统容量规划结果的影响也不容忽视。场景集分析法广泛的应用于风光不确定性建模[13]，该方法基于风光概率模型或历史数据进行抽样，生成多组风光出力场景，用于综合能源系统的不确定性优化。文献[14-15]提出了基于蒙特卡洛模拟和拉丁超立方抽样的风光不确定场景集生成方法，为风电并网调度提供了技术支撑。文献[16-17]基于 Copula 理论分析了风电与光伏出力的相关性，构建了风光不确定性与相关性联合出力场景。文献[18-19]基于历史数据运用 *k*-means 聚类提取各典型日风光出力曲线，并通过设置置信区间生成风光不确定性场景集合。上述研究大多针对 24 h 典型日等短时段风光出力不确定性进行建模，而适用于绿氢化工生产仿真模拟的多日连续长时段风光出力不确定性场景生成方法较少。

本文针对上述问题，首先，提出一种多类型电解槽集群启停模型，考虑后端化工生产稳定氢气供应约束建立离网绿氢系统；其次，对风光出力的不确定性进行分析，利用 *k*-means 聚类算法得到多组风光联合出力场景，分别采用拉丁超立方抽样（latin hypercube sampling，LHS）与马尔可夫链（Markov chain，MC），模拟风光出力的日内随机性与日间相关性，生成所需的长周期风光出力场景；最后，通过构建算例分析验证了所提模型的有效性。

1 离网型多类型电解槽集群制氢系统

1.1 系统描述

本文所设计的离网型多类型电解槽集群制氢系统，旨在充分消纳波动的风电、光伏可再生能源出力，实现绿氢的连续稳定供应，其结构如图 1 所示。该系统主要由风力发电设备、光伏发电设备、蓄电池、碱性电解槽与质子膜电解槽、储氢罐组成。首先通过蓄电池与 AEL/PEMEL 混合电解槽制氢设备的协调运行，将绿电转换为绿氢，再使用储氢罐平抑绿氢波动产量，以满足下游绿氢化工产业（如绿氨工厂、绿醇工厂）连续稳定的氢气供应要求。

1.2 系统设备模型

1.2.1 多类型电解槽集群启停模型

由于 AEL 和 PEMEL 制氢原理不同，其在经济技术特性上存在明显差异[20]。在经济性方面，AEL 成本较低，目前已经实现规模化应用；而 PEMEL 受限于质子膜材料成本及制备工艺，整体设备成本较高[12]。在动态特性方面，由于质子传导性能良好，PEMEL 具有更加灵活的动态响应特性，在电解效

率、启停特性等指标明显优于碱性电解槽。因此，本文选取 AEL 和 PEMEL 混合电解槽作为系统制氢设备，以兼顾系统整体经济性与制氢灵活性。

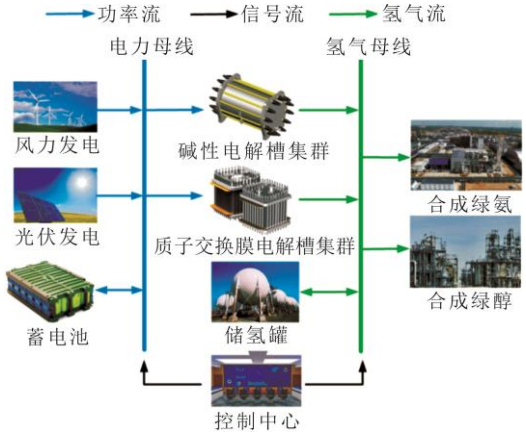


图 1 离网多类型电解槽集群制氢系统结构
Fig.1 Structural diagram of off-grid multi-type electrolyzer cluster hydrogen production system

大规模风光制氢系统通常采用多列、多类型电解槽集群并联运行的方式，以增加系统对波动电源的适应性。传统启停模型通过设置多组 0-1 变量来表征单台电解槽的运行状态，实现电解槽多状态的运行调度优化[21]。对于大规模绿氢系统容量配置优化问题，随着电解槽集群数量的增加，会造成维数爆炸，使优化模型难以求解。为此，本文提出一种考虑启停能耗特性的多类型电解槽集群模型。该模型通过考虑 AEL、PEMEL 在设备成本、制氢效率、运行负荷范围、小时级启停特性的差异，实现多类型电解槽最优容量配比。

考虑启停能耗特性的多类型电解槽集群模型数学建模如下：

$$\begin{cases} 0 \leqslant Q_t^{\mathrm{EC}} \leqslant U_{\max}^{\mathrm{EC}} \\ P_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{EC}} = \lambda_{\mathrm{H_2}}^{\mathrm{EC}} \cdot M_{\mathrm{H_2},t}^{\mathrm{EC}} \\ M_{\mathrm{H_2O},t}^{\mathrm{EC}} = \lambda_{\mathrm{H_2O}}^{\mathrm{EC}} \cdot M_{\mathrm{H_2},t}^{\mathrm{EC}} \\ \theta_{\min}^{\mathrm{EC}} \cdot P_{\mathrm{R}}^{\mathrm{EC}} \cdot Q_t^{\mathrm{EC}} \leqslant P_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{EC}} \leqslant \theta_{\max}^{\mathrm{EC}} \cdot P_{\mathrm{R}}^{\mathrm{EC}} \cdot Q_t^{\mathrm{EC}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：Q_t^{EC} 为 t 时刻多类型制氢设备集群运行台数；$U_{\max}^{\mathrm{EC}}$ 为多类型制氢设备集群总台数；$P_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{EC}}$ 为 t 时刻多类型制氢设备集群耗电功率；$\lambda_{\mathrm{H_2}}^{\mathrm{EC}}$ 为多类型制氢设备制氢气耗电系数；$M_{\mathrm{H_2},t}^{\mathrm{EC}}$ 为 t 时刻多类型制氢设备电解制氢气质量；$M_{\mathrm{H_2O},t}^{\mathrm{EC}}$ 为 t 时刻多类型制氢设备耗水质量；$\lambda_{\mathrm{H_2O}}^{\mathrm{EC}}$ 为多类型制氢设备制氢耗水系数；$\theta_{\min}^{\mathrm{EC}}$、$\theta_{\max}^{\mathrm{EC}}$ 为单台多类型制氢设备运行功率下、上限系数；$P_{\mathrm{R}}^{\mathrm{EC}}$ 为单台多类型制氢设备额定运行功率。

多类型制氢设备集群运行特性如图 2 所示。从多类型制氢设备集群运行角度来看，单台制氢设备启停运行状态的切换可以由改变制氢设备在线总数体现，如果有新的电解槽启动加入到制氢设备集群中，此时制氢设备总在线数量将会增加，反之则有电解槽停机。

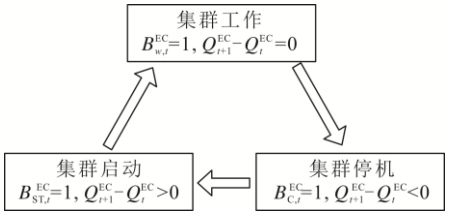


图 2 多类型制氢设备集群运行特性
Fig.2 Operation characteristics of multi-type hydrogen production equipment cluster

因此，引入 3 个二进制 0-1 变量来表征多类型制氢设备集群运行过程中因启停调度所引起的制氢设备在线数量变化状态，其模型表达式为：

$$\begin{cases} B_{\mathrm{ST},t}^{\mathrm{EC}} = 1,\ Q_{t+1}^{\mathrm{EC}} - Q_t^{\mathrm{EC}} > 0 \\ B_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{EC}} = 1,\ Q_{t+1}^{\mathrm{EC}} - Q_t^{\mathrm{EC}} < 0 \\ B_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{EC}} = 1,\ Q_{t+1}^{\mathrm{EC}} - Q_t^{\mathrm{EC}} = 0 \\ B_{\mathrm{ST},t}^{\mathrm{EC}} + B_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{EC}} + B_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{EC}} = 1 \end{cases} \tag{2}$$

式中：$B_{\mathrm{ST},t}^{\mathrm{EC}}$ 为 t 时刻多类型制氢设备集群在线数量增加状态变量，增加为 1，否则为 0；$B_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{EC}}$ 为 t 时刻多类型制氢设备集群在线数量减小状态变量，减小为 1，否则为 0；$B_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{EC}}$ 为 t 时刻多类型制氢设备集群在线数量不变状态变量，不变为 1，否则为 0；Q_{t+1}^{EC} 为 t+1 时刻多类型制氢设备集群在线运行台数。

通过统计多类型制氢设备集群启动数量变化，可以得到该时刻所需启动能耗，启动能耗损失表达式为：

$$P_{\mathrm{ST},t}^{\mathrm{EC}} = B_{\mathrm{ST},t}^{\mathrm{EC}} \cdot \lambda_{\mathrm{ST}}^{\mathrm{EC}} \cdot P_{\mathrm{R}}^{\mathrm{EC}} \cdot (Q_{t+1}^{\mathrm{EC}} - Q_t^{\mathrm{EC}}) \cdot \Delta T \tag{3}$$

式中：$P_{\mathrm{ST},t}^{\mathrm{EC}}$ 为 t 时刻多类型制氢设备集群启动功率；$\lambda_{\mathrm{ST}}^{\mathrm{EC}}$ 为多类型制氢设备启动耗电系数。

1.2.2 储能设备模型

蓄电池作为风光发电设备与电解槽之间的缓冲装置，其模型表达式为：

$$S_t^{\mathrm{BA}} = S_{t-1}^{\mathrm{BA}} \cdot (1-\sigma) + \left(P_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{BA}} \cdot \eta_{\mathrm{C}} - \frac{P_{\mathrm{D},t}^{\mathrm{BA}}}{\eta_{\mathrm{D}}} \right) \tag{4}$$

式中：S_t^{BA} 为 t 时刻蓄电池内电量；S_{t-1}^{BA} 为 t–1 时刻

蓄电池内电量；σ为蓄电池的自损率；$P_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{BA}}$为 t 时刻蓄电池充电量；η_{C}为蓄电池的充电效率；$P_{\mathrm{D},t}^{\mathrm{BA}}$为 t 时刻蓄电池放电量；η_{D}为蓄电池的放电效率。

蓄电池充放电状态及运行约束为：

$$\begin{cases} B_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{BA}}+B_{\mathrm{D},t}^{\mathrm{BA}}\leqslant 1 \\ 0\leqslant P_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{BA}}\leqslant U_{\max}^{\mathrm{BA}}\cdot B_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{BA}} \\ 0\leqslant P_{\mathrm{D},t}^{\mathrm{BA}}\leqslant U_{\max}^{\mathrm{BA}}\cdot B_{\mathrm{D},t}^{\mathrm{BA}} \\ \theta_{\min}^{\mathrm{BA}}\cdot U_{\max}^{\mathrm{BA}}\leqslant S_t^{\mathrm{BA}}\leqslant \theta_{\max}^{\mathrm{BA}}\cdot U_{\max}^{\mathrm{BA}} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$B_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{BA}}$、$B_{\mathrm{D},t}^{\mathrm{BA}}$为蓄电池 t 时刻的充、放电状态变量，0 为停止，1 为工作；$U_{\max}^{\mathrm{BA}}$为蓄电池的设备容量；$\theta_{\min}^{\mathrm{BA}}$为蓄电池储能下限；$U_{\max}^{\mathrm{BA}}$为蓄电池储能上限。

储氢设备可以平抑电解槽制氢波动量，设备类型选取 2 000 m^3（标准工况下）低压储氢球罐，其模型表达式为：

$$S_t^{\mathrm{TA}}=S_{t-1}^{\mathrm{TA}}+(M_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{TA}}-M_{\mathrm{D},t}^{\mathrm{BA}}) \tag{6}$$

式中：S_t^{TA}为 t 时刻储氢罐内部储氢量；S_{t-1}^{TA}为 t–1 时刻储氢罐内部储氢量；$M_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{TA}}$为 t 时刻储氢罐充气量；$M_{\mathrm{D},t}^{\mathrm{BA}}$为 t 时刻储氢罐放气量。

储氢罐在充放调度运行过程中还需要满足压力约束：

$$\begin{cases} p_{\min}^{\mathrm{TA}}\leqslant p_t^{\mathrm{TA}}\leqslant p_{\max}^{\mathrm{TA}} \\ p_t^{\mathrm{TA}}\cdot C_{\max}^{\mathrm{TA}}\cdot U_{\max}^{\mathrm{TA}}=M_t^{\mathrm{TA}}\cdot \mathrm{Rg}\cdot T_t^{\mathrm{TA}} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$p_{\min}^{\mathrm{TA}}$为储氢罐压力下限；p_t^{TA}为 t 时刻储氢罐压力；$p_{\max}^{\mathrm{TA}}$为储氢罐压力上限；$C_{\max}^{\mathrm{TA}}$为单个储氢罐额定容量；$U_{\max}^{\mathrm{TA}}$为储氢罐装机数量；M_t^{TA}为 t 时刻储氢罐中氢气质量；Rg 为氢气气体常数；T_t^{TA}为 t 时刻储氢罐中氢气温度。

1.3 新型系统运行设计协同优化模型

1.3.1 新型系统目标函数

本文以新型系统的净收益最大化建立混合整数线性规划模型，其目标函数为：

$$\max E=C_{\mathrm{OP}}-C_{\mathrm{INV}} \tag{8}$$

式中：C_{OP}为售氢收益；C_{INV}为系统投资成本。

C_{INV}表达式为：

$$C_{\mathrm{INV}}=\sum_{i=1}^{n}\left[c_{\mathrm{inv},i}\cdot U_{\max}^{i}\cdot\frac{\alpha_i\cdot(1+\alpha_i)^{T_{\mathrm{f}}}}{(1+\alpha_i)^{T_{\mathrm{f}}}-1}\right] \tag{9}$$

式中：n 为设备总数；$c_{\mathrm{inv},i}$为单位容量投资成本；$U_{\max}^{i}$为系统各设备的容量；α_i为贴现率，本文取 5%；T_{f}为系统规划年限，本文取 20 年。

C_{OP}表达式为：

$$C_{\mathrm{OP}}=C_{\mathrm{INC}}-C_{\mathrm{OM}}-C_{\mathrm{SS}}-C_{\mathrm{RM}} \tag{10}$$

式中：C_{INC}为系统产品收益；C_{OM}为系统设备运维成本；C_{SS}为人力成本；C_{RM}为系统原料成本。

1.3.2 新型系统约束条件

1）各设备容量约束

$$G_{\min}^{i}\leqslant U_{\max}^{i}\leqslant G_{\max}^{i} \tag{11}$$

式中：$U_{\max}^{i}$为各设备容量；$G_{\max}^{i}$为各设备容量约束上限值；$G_{\min}^{i}$为各个设备容量约束下限值。

2）电平衡约束

$$\begin{aligned} &P_t^{\mathrm{PV}}+P_t^{\mathrm{WT}}+P_{\mathrm{D},t}^{\mathrm{BA}}= \\ &P_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{BA}}+P_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{AEL}}+P_{\mathrm{ST},t}^{\mathrm{AE}}+P_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{PEM}}+P_{\mathrm{ST},t}^{\mathrm{PEM}}+P_t^{\mathrm{AB}} \end{aligned} \tag{12}$$

式中：P_t^{PV}为 t 时刻光伏发电功率；P_t^{WT}为 t 时刻风力发电功率；$P_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{AEL}}$为 t 时刻碱性电解槽工作电耗；$P_{\mathrm{ST},t}^{\mathrm{AE}}$为 t 时刻碱性电解槽启动电耗；$P_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{PEM}}$为 t 时刻质子交换膜电解槽工作电耗；$P_{\mathrm{ST},t}^{\mathrm{PEM}}$为 t 时刻质子交换膜电解槽启动电耗；P_t^{AB}为系统 t 时刻弃电功率。

3）氢平衡约束

$$M_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{AE}}+M_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{PEM}}+M_{\mathrm{D},t}^{\mathrm{BA}}=M_{\mathrm{C},t}^{\mathrm{TA}}+M_t^{\mathrm{CM}} \tag{13}$$

式中：$M_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{AE}}$为 t 时刻碱性电解槽产氢量；$M_{\mathrm{W},t}^{\mathrm{PEM}}$为 t 时刻质子交换膜电解槽产氢量；M_t^{CM}为 t 时刻化工氢气供应量。

4）弃电率约束

全年系统弃电量应小于风光发电总量的一定比例，其表达式为：

$$0\leqslant\sum_{t=0}^{T}P_t^{\mathrm{AB}}\leqslant\eta_{\mathrm{AB}}\sum_{t=0}^{T}(P_t^{\mathrm{PV}}+P_t^{\mathrm{WT}}) \tag{14}$$

式中：η_{AB}为系统允许最大弃电比例系数，本文取10%。

5）稳定供氢约束

绿氢系统下游用氢端的实际生产对氢气稳定供应需求较高，例如合成绿氨、合成绿色甲醇等大型化工工艺的负荷调整时间尺度在数小时以上，且难以频繁启停[22]。因此，本文提出离网绿氢系统稳定供氢约束，即氢气供应仅在每日 00:00—04:00 进行灵活调整，其余 04:00—24:00 时间氢气供应负荷保持不变。对此需要引入 2 个二进制 0-1 变量来表征 1 天中氢气供应状态，其表达式为：

$$\begin{cases} B_{\mathrm{F},t}^{\mathrm{CM}}+B_{\mathrm{S},t}^{\mathrm{CM}}=1 \\ \forall t\in\{t_1,\cdots,t_{24}\} \end{cases} \tag{15}$$

式中：$B_{\mathrm{F},t}^{\mathrm{CM}}$表示氢气供应变化状态；$B_{\mathrm{S},t}^{\mathrm{CM}}$表示氢气供应稳定状态。

在氢气供应变化时（00:00—04:00），还需满足最低供氢量约束、爬坡速率约束及均匀供应约束，其表达式为：

$$\begin{cases} B_{\mathrm{F},t}^{\mathrm{CM}}=1 \\ \theta_{\min}^{\mathrm{CM}}\cdot M_{\max}^{\mathrm{EC}}\leqslant M_t^{\mathrm{CM}} \\ \varphi_{\min}^{\mathrm{CM}}\cdot M_{\max}^{\mathrm{EC}}\leqslant M_t^{\mathrm{CM}}-M_{t-1}^{\mathrm{CM}} \\ M_t^{\mathrm{CM}}-M_{t-1}^{\mathrm{CM}}\leqslant \varphi_{\max}^{\mathrm{CM}}\cdot M_{\max}^{\mathrm{EC}} \\ M_t^{\mathrm{CM}}-M_{t-1}^{\mathrm{CM}}=M_{t+1}^{\mathrm{CM}}-M_t^{\mathrm{CM}} \\ \forall t_f\in\{t_1,\cdots,t_4\} \end{cases} \tag{16}$$

式中：$\theta_{\min}^{\mathrm{CM}}$为氢气供应下限系数；$M_{\max}^{\mathrm{EC}}$为多类型电解槽最大制氢量；$\varphi_{\min}^{\mathrm{CM}}$、$\varphi_{\max}^{\mathrm{CM}}$为氢气供应变化率下限、上限系数；$t_f$为化工爬坡时间域。

在氢气稳定供应时（04:00—24:00），需满足稳态供应约束，其表达式为：

$$\begin{cases} B_{\mathrm{S},t}^{\mathrm{CM}}=1 \\ M_t^{\mathrm{CM}}=\alpha_{\mathrm{S}}^{\mathrm{CM}}\cdot M_{\max}^{\mathrm{EC}} \\ \forall \alpha_{\mathrm{S}}^{\mathrm{CM}}\in\{30\%\sim 110\%\} \\ \forall t_f\in\{t_5,\cdots,t_{24}\} \end{cases} \tag{17}$$

式中：$\alpha_{\mathrm{S}}^{\mathrm{CM}}$为氢气稳定供应负荷率。

2 LHS-MC 风光长时段随机场景生成

传统场景生成方法大多选取典型日为调度周期，然而大规模绿氢系统后端化工生产的优化时间尺度往往在 7 天以上。因此，本文提出考虑大规模绿氢化工长时生产特性的拉丁超立方抽样−马尔可夫链（LHS-MC）风光长时段随机场景生成方法。并基于所生成的长时段随机场景对离网绿氢系统进行容量优化配置，优化流程如图 3 所示。

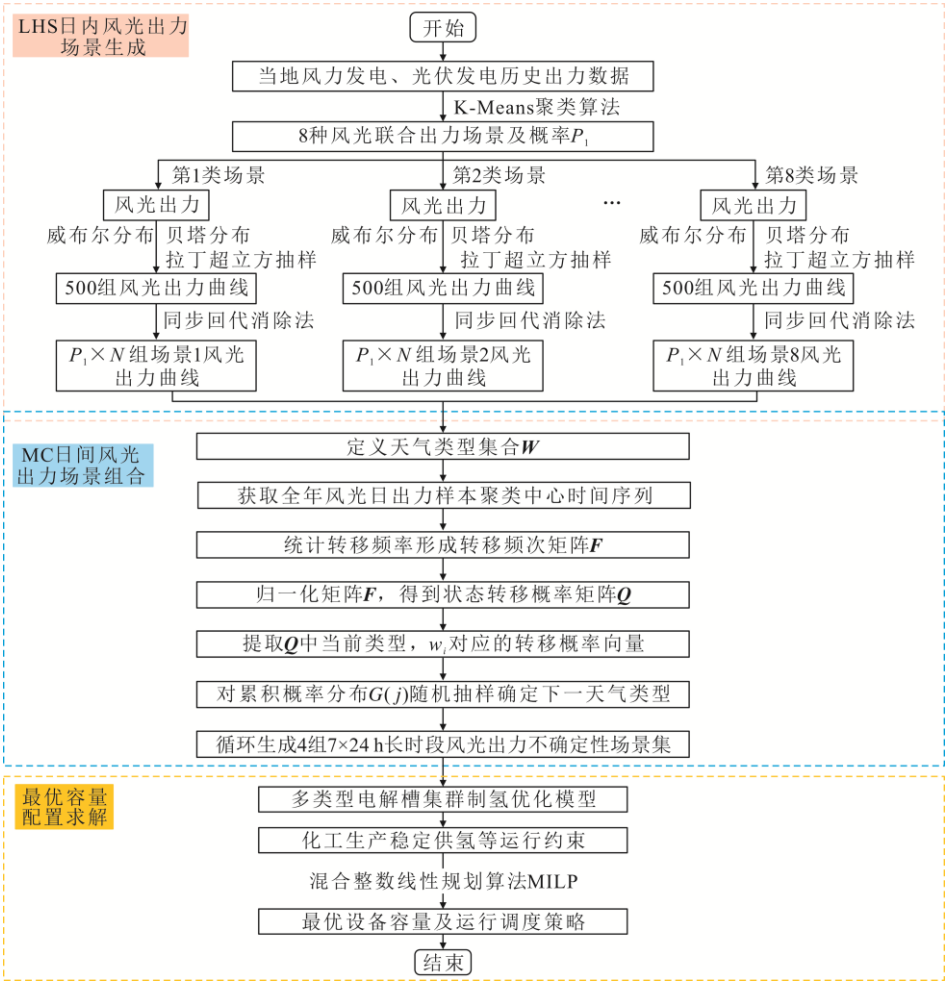


图 3 基于 LHS-MC 方法的绿氢系统容量配置优化流程

Fig.3 Flow chart for optimizing capacity configuration of green hydrogen system based on LHS-MC method

2.1 拉丁超立方 LHS 日内风光出力场景生成

本文选取该地区全年 8 760 h 风光历史数据作为输入，采用 *k*-means 算法将全年风电、光伏每日的发电数据做聚类划分，并使用肘部法获取最佳

聚类簇数，具体步骤参见文献[23]。

2.1.1 风力发电不确定性

本文假设风机、光伏出力的预测误差分别服从 Weibull 分布、Beta 分布。

Weibull 分布是一种单分布函数模型，其概率密度函数为：

$$f(P_{\mathrm{WT}})=\frac{\sigma}{\beta}\left(\frac{P_{\mathrm{WT}}}{\beta}\right)^{\sigma-1}\exp\left[-\left(\frac{P_{\mathrm{WT}}}{\beta}\right)^{\sigma}\right] \tag{18}$$

式中：σ、β、P_{WT} 分别为 Weibull 形状参数、尺度参数和风机出力。

2.1.2 光伏发电不确定性

Beta 分布理论认为光伏出力取决于太阳辐射强度，因此其概率密度函数可表示为：

$$f(P_{\mathrm{V}})=P_{\mathrm{V}}\tau_{\max}(A\cos\alpha)\varepsilon \tag{19}$$

式中：P_{V}、$\tau_{\max}$、A、α、ε 分别为光伏出力、最大功率点的跟踪率、太阳辐射面积、太阳入射角和光电转换效率。

2.1.3 拉丁超立方 LHS 抽样

本文使用 LHS 生成随机场景，LHS 是分层随机抽样，具有均匀分层的特性，可以在较少抽样的情况下保证每个变量范围的全覆盖[24]。首先计算风电、光伏出力的累积分布，并将其累积分布函数 $F(P)$分成 N 个等份区间，并从中随机选取 1 个样本 q_i，计算其反函数 $F^{-1}(q_i)$从而得到所需风光随机出力样本，抽样过程如图 4 所示。

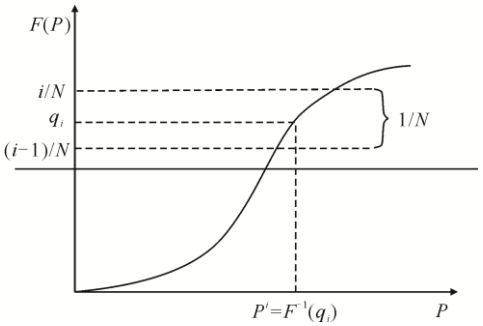


图 4 LHS 抽样过程示意

Fig.4 Illustration of the LHS process

2.1.4 同步回代场景缩减

为了降低计算量，需要对 LHS 抽样所生成的大量风光联合出力进行化简。本文根据各类型概率，采用同步回代消除法对初始抽样场景进行削减，该方法每次删减 1 个与其他场景概率距离最近的场景直到满足要求，具体步骤参见文献[25]。

2.2 MC 日间风光出力场景组合

通过上述步骤可以得到多组风光日内出力场景，为了生成多日长时段连续风光场景，还需对每日间风光出力类型进行预测。MC 研究随机序列的状态及状态转移规律的理论，具有无后效性的特点[26]。它认为随机序列 t+1 时刻的状态仅与 t 时刻的状态有关，而与 t 时刻之前的状态无关，每一状态转移到另一状态的概率是确定的，可通过状态转移概率矩阵进行描述，因此 MC 可以解决日间出力类型的预测问题，具体步骤如下。

1）定义天气类型集合 $W=\{w_1, w_2, \ldots, w_8\}$表示通过聚类得到的 8 种天气类型。获取全年 365 天的风光出力样本点对应的天气聚类中心序列$\{x_1, x_2, \ldots, x_{365}\}$。

2）统计相邻 2 天风光出力所属类别的转移次数，形成转移频次矩阵 $\boldsymbol{F}$。矩阵 $\boldsymbol{F}$ 为 8×8 的形式，$\boldsymbol{F}$ 的结构为：

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{18} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{28} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{81} & f_{82} & \cdots & f_{88} \end{bmatrix} \tag{20}$$

式中：f_{ij} 表示从类别 w_i 转移到类别 w_j 的次数。

3）对转移频次矩阵 $\boldsymbol{F}$ 进行归一化处理，计算出状态转移概率矩阵 $\boldsymbol{Q}$。矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 的形式为：

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{18} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{28} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{81} & q_{82} & \cdots & q_{88} \end{bmatrix} \tag{21}$$

式中：q_{ij} 表示从状态 w_i 转移到状态 w_j 的概率。

4）确定当天的风光出力场景所属天气类别 w_i，从状态转移概率矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 中提取当前类型 w_i 对应的转移概率向量 $\boldsymbol{q}_i=[q_{i1}, q_{i2}, \ldots, q_{i8}]$。然后，通过生成一个[0, 1]区间的随机数，对当前类别 w_i 的累积概率分布 $G(j)$进行随机抽样，确定一天的天气类型 w_j。

$$G(j)=\sum_{k=1}^{j}q_{ik},\ j=1,\ 2,\ \ldots,\ 8 \tag{22}$$

根据预测出的天气类型 w_j，在类别 w_j 中的同步回代所得风光日出力场景中随机选择 1 个，作为下 1 天的风光出力场景。将预测得到的场景作为新的当前状态，持续重复该过程，直到生成所需的所有日间风光出力场景序列。

3 案例仿真与分析

3.1 风光出力不确定性场景生成结果

本文以新疆某离网绿氢项目为例进行仿真分析，使用 *k*-means 算法对全年风光日出力数据进行聚类，并根据肘部法则选出最佳聚类中心数量为 8 个。图 5 为得到的风光日出力场景聚类中心。

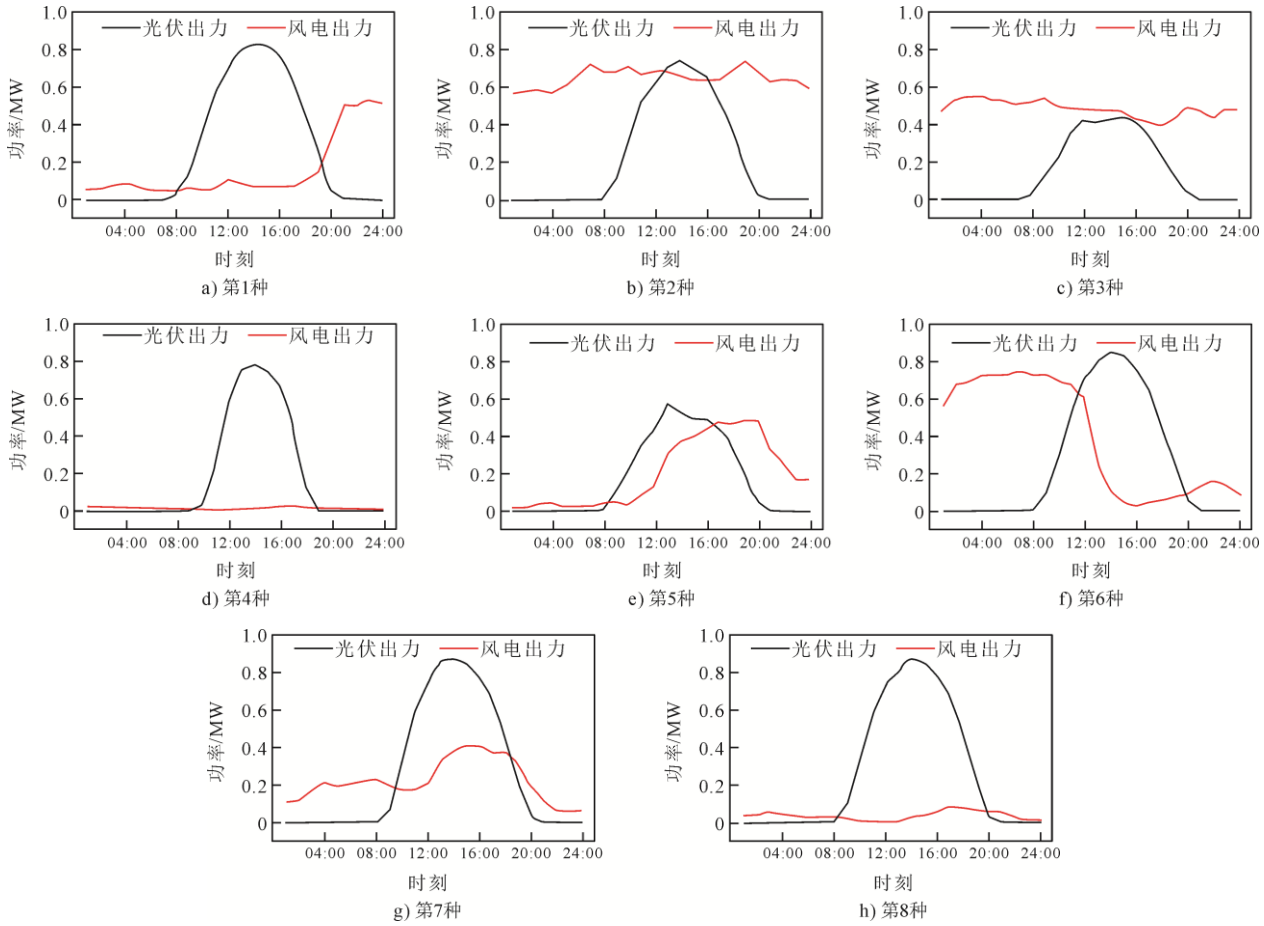


图 5 风光日出力场景聚类结果

Fig.5 Clustering results of wind and solar power output scenarios

本文目标生成时间尺度为 4 组 7×24 h 共 28 日的风光连续调度场景，根据各场景的概率可以得到每个类型风光出力场景数量如表 1 所示。

表 1 各风光聚类场景概率及其所需同步回代场景数量

Tab.1 Probability of wind-solar clustering scenarios and the required number of scenarios after synchronous back substitution

风光聚类场景	场景概率	同步回代场景数量
第 1 种	0.095 9	3
第 2 种	0.126 0	4
第 3 种	0.117 8	3
第 4 种	0.202 7	6
第 5 种	0.087 7	2
第 6 种	0.109 6	3
第 7 种	0.178 1	5
第 8 种	0.082 2	2

由于要生成 28 日连续风光出力调度场景，例如第 1 种风光出力场景的概率为 0.095 9，即需要同步回代得到该种风光场景为 3 天。随后，根据全年 365 天风光出力场景所属类别时间序列，依次统计相邻 2 个风光场景相邻频次。根据各类别转移频次构造 MC 状态转移矩阵。MC 转移矩阵热力图如图 6 所示。

其中，每个元素表示从当前日风光联合出力类别（纵轴）到下一日风光类别（横轴）的转移概率。对角线元素显示了自转移概率，其中类别 4 的自转移概率高达 0.6，表明该类别的风光出力较为稳定，连续 2 天出现该场景的可能性较大。非对角线元素则反映了不同类别之间的转移关系，如类别 2 转移到类别 6 的概率最大为 0.307 7，而类别 2 转移到类别 5 的概率为 0。这是由于风光出

力都是逐渐变化的，突然变化在现实中是很少出现的，也符合真实世界中气象的连续变化性。热力图揭示了风光出力类别之间的强弱转移关系，通过对转移概率矩阵随机抽样，能够有效地反映风光出力在相邻日间的随机性与相关性，为长时间尺度下风光出力预测及系统优化提供支持。

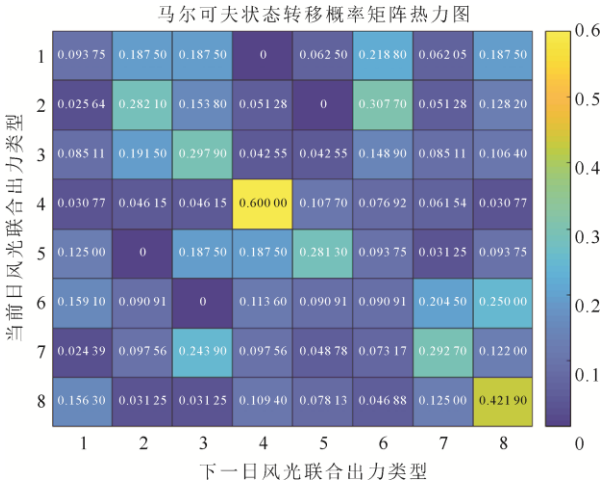


图 6 风光出力马尔可夫状态转移矩阵热力图
Fig.6 Heat map of Markov state transition matrix for wind and solar power output

最后将所生成的各类型天气分型场景使用 LHS-MC 算法进行日间风光出力排序预测，生成仿真所需要的 4 组 7×24 h 共 28 日风光长时段不确定性场景，结果如图 7 所示。

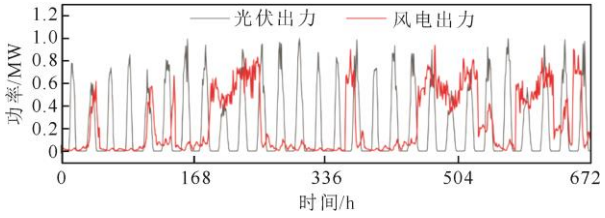


图 7 风光长时段不确定性场景生成结果
Fig.7 Generation results of long-term uncertain wind-solar scenarios

3.2 方案与系统参数

为验证本文所提多类型电解槽协同制氢优化模型的有效性，设置 3 个优化方案对新疆风电装机 350 MW、光伏装机 100 MW 的离网绿氢系统进行仿真与分析。

方案 1：绿氢系统仅配置 PEMEL 设备制氢。

方案 2：绿氢系统仅配置 AEL 设备制氢。

方案 3：绿氢系统配置 AEL 与 PEMEL 多类型设备协同制氢。

该系统内设备的经济指标、技术参数分别如表 2、表 3 所示。

表 2 系统各设备经济指标
Tab.2 Economic indicators of various devices in the system

设备	投资成本	运维成本与投资成本之比/%
光伏机组	3 500 元/kW	1
风电机组	4 800 元/kW	1
碱性电解槽	2 000 元/kW	2
质子膜电解槽	8 000 元/kW	2
储氢罐（标况）	340 元/ m^3	1
锂电池	2 200 元/(kW ħ)	2

表 3 多类型制氢设备技术指标
Tab.3 Technical indicators of multiple types of hydrogen production equipment

设备	项目	数值
碱性电解槽	制氢能耗/(kW ħ m^{-3})	5.0
	单台额定功率/MW	5.0
	负荷范围/%	30~100
	启动耗时/min	60
	启动电能损失/%	15
	1 t 氢耗 H_2O 量/t	28
质子膜电解槽	制氢能耗/(kW ħ m^{-3})	4.5
	单台额定功率/MW	0.9
	负荷范围/%	5~120
	启动耗时/min	5
	启动电能损失/%	15
	1 t 氢耗 H_2O 量/t	28

3.3 案例仿真结果

将上文所生成的风光长时段不确定性场景及系统经济技术参数输入到离网绿氢系统容量优化配置模型中进行仿真计算，得到 3 个案例设备容量优化结果如表 4 所示。

表 4 多类型电解槽制氢方案优化结果对比
Tab.4 Comparison of optimization results for hydrogen production schemes considering multiple types of electrolyzers

优化结果	方案1	方案2	方案3
PEMEL容量/MW	198.9	0	11.7
AEL容量/台	0	290	275
电储能容量/(MW ħ)	0.43	27.94	26.16
储氢罐容量（标况）/万m^3	44.0	50.6	50.6
每年总制氢量/万t	1.77	1.67	1.70
绿氢系统净收益/万元	16 911	21 794	21 847

优化结果表明，得益于 PEMEL 优良的动态特性与较高的制氢效率，采用单一 PEMEL 的绿氢系统年总制氢量最高为 1.77 万吨，且对电储能、储氢罐的需求量最低。然而方案 1 过高的设备成本使得其净收益远低于其他 2 个方案。相比

于方案 2 的单一 AEL 制氢，采用多类型电解槽协同制氢的方案 3，通过合理配置 AEL 与 PEMEL 容量，有效改善了离网绿氢系统的动态特性。方案 3 相比于方案 2，电储能容量降低了 1.78 MW h，年制氢量增加了 0.03 万吨，年净收益增加 53 万元。

为进一步凸显本文所提多类型电解槽集群启停模型及稳定供氢约束优势，增设参比方案 4 进行验证。方案 4：基于现有研究构造，在方案 3 基础上，不考虑电解槽集群启停能耗特性、不考虑氢气稳定供应约束。方案 3、方案 4 设备容量优化结果如表 5 所示，全场景运行调度情况如图 8、图 9 所示。

方案 4 优化后电储能容量为 0，考虑电解槽集群启停能耗特性后，方案 3 电储能容量相比方案 4 增加了 26.16 MW h。配置合理的电储能容量可以为电解制氢设备提前开机提供电能保障，同时还可以在风光短时出力不足时放电，提供低负荷制氢电能需求，避免制氢设备频繁启停。由图 8 及表 5 可得，通过电储能与多类型电解槽的协同运行，制氢设备稳定性大幅度提升，AEL 启停次数每年由 351 次减少到 123 次，减少了 228 次，降幅达 64.96%；PEMEL 启停次数由 181 次下降到 26 次，减少了 155 次，降幅达 85.64%。

表 5 考虑实际运行约束对优化方案的影响

Tab.5 Effect of considering actual operational constraints on optimization schemes

优化结果	方案 4	方案 3	差值
PEMEL 容量/MW	9.0	11.7	+2.7
AEL 容量/MW	285	275	–10
电储能容量/(MW h)	0	26.16	+26.16
储氢罐容量（标况）/万 m^3	0	50.6	+50.6
AEL 年启停次数	351	123	–228
PEMEL 年启停次数	181	26	–155
弃电率/%	0.86	0.67	–0.19
日供氢波动率/%	69.83	4.41	–65.42

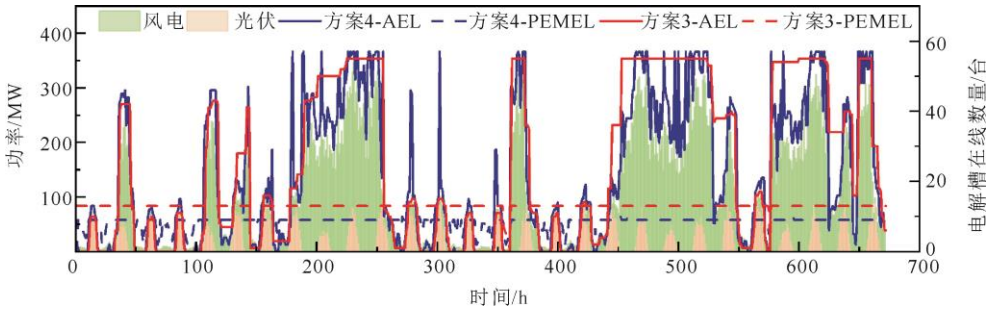


图 8 实际运行约束对多类型制氢设备运行调度的影响

Fig.8 Effect of actual operational constraints on operation scheduling of multiple types of hydrogen production equipment

两方案的氢气供应曲线如图 9 所示。方案 3 为满足后端化工设备的供氢平稳性约束，控制中心会根据当日风光出力情况优化出每日最优氢气稳定供应产量（图 9 红色曲线）。方案 4 中并未考虑后端化工氢气稳定性约束，因此氢气供应随风光出力而随机波动（图 9 中蓝色曲线）。本文所提方案 3 的供氢波动率由方案 4 的 69.83%降低至 4.41%，降低了 65.42 百分点。

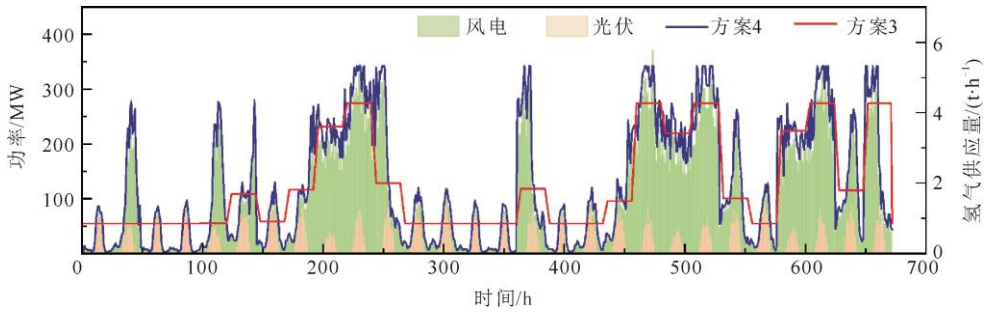


图 9 实际运行约束对氢气供应的影响

Fig.9 Effect of actual operational constraints on hydrogen supply

因此，本文方案一方面可以实现各设备间协同运行，减少电解槽频繁启停所带来的安全性问题；另一方面，通过合理配置储氢罐容量，提高系统氢气供应的稳定性，使得优化结果更加贴近工程实际要求。

4 结　论

本文设计一种离网型多类型电解槽制氢系统，提出基于 LHS-MC 风光相关性场景生成方法的两阶段随机优化模型，并以新疆地区某风光氢能生产应用基地为案例进行仿真分析，得出以下结论。

1）提出基于 LHS-MC 方法的长时段风光出力随机场景生成方法。采用 LHS 抽样描述风光出力的日内随机性，构造 MC 模拟风光出力的相邻日间相关性，对长时段风光出力不确定性进行有效建模。

2）提取 AEL 与 PEMEL 动态运行特性差异，提出多类型电解槽集群容量配置优化模型，相比于单一类型电解槽方案，多类型电解槽协同运行方案可以有效提高绿氢系统的经济性。

3）考虑电解槽集群启停能耗特性、稳定供氢约束充分发挥电储能与氢储能的作用，平抑了风光不稳定，电解槽启停次数降低 64.96%，供氢波动率降低 65.42 百分点，实现了后端绿色化工稳定连续氢气供应。

[参 考 文 献]

[1] 刘红. 基于改进粒子群算法的储能调峰容量优化配置研究[J]. 广东电力, 2023, 36(1): 68.
Liu H. Research on optimal configuration of energy storage peak shaving capacity based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(1): 68.

[2] 田松峰, 姚静, 杨智好, 等. 基于混合储能的风光储联合发电系统优化调度策略及评价[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 21.
Tian S F, Yao J, Yang Z H, et al. Optimal dispatching strategy and evaluation of wind-solar-storage combined power generation system based on hybrid energy storage[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 21.

[3] 李星仪, 沈小军, 金钰. 基于氢储能的偏远地区零碳微能网构建及运行策略研究[J]. 可再生能源, 2024, 42(2): 223.
Li X Y, Shen X J, Jin Y. Research on construction and operation strategy of zero-carbon micro-energy network based on hydrogen storage in remote areas[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(2): 223.

[4] 宋震, 张龙, 徐广强, 等. 耦合氢储能的火电机组在新型电力系统中的应用研究[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 140.
Song Z, Zhang L, Xu G Q, et al. Application study of thermal power unit coupled with hydrogen energy storage in new type electric power system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 140.

[5] 孟凡奇, 王鹏, 王海利, 等. 高水电占比地区电氢混合储能优化配置研究[J]. 热力发电, 2024, 53(9): 126.
Meng F Q, Wang P, Wang H L, et al. Overview of the progress and development prospects of key technologies for hydrogen production under the goal of carbon neutrality[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 126.

[6] 赵宇洋, 赵钰欢, 郭英军, 等. 离网型风光氢储系统容量配置与控制优化[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 50.
Zhao Y Y, Zhao Y H, Guo Y J, et al. Capacity configuration and control optimization of off-grid wind solar hydrogen storage system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(7): 50.

[7] 白金彤, 董鹤楠, 杨雨琪, 等. 风光储氢综合能源系统容量配置策略优化研究[J]. 东北电力技术, 2024, 45(3): 44.
Bai J T, Dong H N, Yang Y Q, et al. Research on capacity allocation strategy optimization of wind-solar hydrogen storage integrated energy system[J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(3): 44.

[8] 姚芳, 杨晓娜, 葛磊蛟, 等. 风−光−氢能源系统容量优化配置研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(5): 56.
Yao F, Yang X N, Ge L J, et al. Optimization of capacity allocation scheme for wind-solar-hydrogen energy system[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(5): 56.

[9] 王舜彦, 任永峰, 张小龙, 等. 基于混合电解槽自适应控制的光伏制绿氢系统研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 20.
Wang S Y, Ren Y F, Zhang X L, et al. Study on photovoltaic green hydrogen production system based on adaptive control of hybrid electrolyzer[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(7): 20.

[10] 陈磊磊, 年珩, 赵建勇, 等. 含多电解槽的新能源制氢能量管理优化[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 2.
Chen L L, Nian H, Zhao J Y, et al. Energy management optimization of new energy hydrogen production system including multiple electrolyzers[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 2.

[11] 年珩, 陈磊磊, 赵建勇, 等. 基于电解槽状态识别的风光制氢系统能量管理优化[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 10.
Nian H, Chen L L, Zhao J Y, et al. Energy management optimization of wind-solar hydrogen production system based on electrolytic cell state recognition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 10.

[12] 郭富民, 徐广强, 王小君, 等. 基于 8 760 h 生产模拟的离网风光储氢系统规划方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2227.
Guo F M, Xu G Q, Wang X J, et al. A planning method for stand-alone wind-solar hydrogen storage system based on 8760 hours production simulation[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2227.

[13] 杨春祥, 张烜榕, 姚巽, 等. 基于风电出力场景集的电力现货市场两阶段随机规划模型[J]. 供用电, 2022, 39(6): 76.
Yang C X, Zhang X R, Yao X, et al. Two-stage stochastic programming model for electricity spot market based on wind power output scenario set[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(6): 76.

[14] 左逢源, 张玉琼, 赵强, 等. 计及源荷不确定性的综合能源生产单元运行调度与容量配置两阶段随机优化[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8205.
Zuo F Y, Zhang Y Q, Zhao Q, et al. Two-stage stochastic

optimization for operation scheduling and capacity allocation of integrated energy production unit considering supply and demand uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8205.

[15] 张晶晶, 陈俊, 曹辉, 等. 计及风光资源不确定性的独立型微电网容量优化配置[J]. 电力与能源, 2024, 45(3): 347.
Zhang J J, Chen J, Cao H, et al. Capacity optimization configuration of stand-alone microgrid considering uncertainty of wind and solar resources[J]. Power & Energy, 2024, 45(3): 347.

[16] 惠振国, 艾澜, 常鹏霞, 等. 计及风光出力相关性的风光水储互补系统优化调度[J]. 水电能源科学, 2024, 42(8): 218.
Hui Z G, Ai L, Chang P X, et al. Optimal scheduling of wind-solar-water-storage complementary system considering the correlation of wind-solar output[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(8): 218.

[17] 付婷婷, 边俐争, 李嫚, 等. 基于 Copula 理论的风光互补配网经济运行联合配网重构优化[J]. 可再生能源, 2023, 41(1): 122.
Fu T T, Bian L Z, Li M, et al. Copula theory-based economic operation of wind-solar complementary distribution network and joint distribution network reconstruction optimization[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(1): 122.

[18] 常青松, 杨昭, 杨熠辉, 等. 基于相似日聚类的超短期光伏功率组合预测模型[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 123.
Chang Q S, Yang Z, Yang Y H, et al. Ultrashort term photovoltaic power combinatorial forecasting model based on similar day clustering[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 123.

[19] 覃日升, 况华, 何鑫, 等. 基于改进 PSO-Kmeans 算法的实际日负荷曲线聚类分析[J]. 电工技术, 2022(11): 1.
Qin R S, Kuang H, He X, et al. Cluster analysis of actual daily load curve based on improved PSO-Kmeans algorithm[J]. Electric Engineering, 2022(11): 1.

[20] Yu D, Li X, Araya S S, et al. Data-driven diagnosis of high temperature PEM fuel cells based on the electrochemical impedance spectroscopy: robustness improvement and evaluation[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 96(9): 544.

[21] Li Y, Deng X, Zhang T, et al. Exploration of the configuration and operation rule of the multi-electrolyzers hybrid system of large-scale alkaline water hydrogen production system[J]. Applied Energy, 2023, 331: 1.

[22] 张润之, 周家辉, 梁士兴, 等. 离网式风光氢醇一体化系统容量配置运行调度优化及经济性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(2): 48.
Zhang R Z, Zhou J H, Liang S X, et al. Capacity configuration-operation scheduling optimization and economic analysis of the off grid wind and solar hydrogen alcohol integrated system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 48.

[23] 付文杰, 王喻玺, 申洪涛, 等. 基于拉丁超立方抽样和场景消减的居民用户基线负荷估计方法[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2298.
Fu W J, Wang Y X, Shen H T, et al. Residential customer baseline load estimation based on latin hypercube sampling and scenario subtraction[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2298.

[24] 贾永基, 恽博文, 许媛媛. 基于抽样和变邻域搜索的随机共享单车重平衡问题[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 115.
Jia Y J, Yun B W, Xu Y Y. Stochastic bike-sharing rebalance problem based on sampling and variable neighbourhood search[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2022, 48(5): 115.

[25] 韩志永, 张宇华, 李兵. 基于多场景技术的冷热电虚拟电厂两阶段优化调度[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 174.
Han Z Y, Zhang Y H, Li B. Two-stage optimal dispatching of CCHP virtual power plant based on multi-scenario technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 174.

[26] 刘迪, 吴林林, 巩宇, 等. 基于滚动采样马尔可夫链模型的光伏时序功率模拟研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3): 207.
Liu D, Wu L L, Gong Y, et al. Study on time series power simulation of photovoltaic output based on rolling sampling Markov chain model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 207.

（责任编辑　杨嘉蕾）