

多状态柔性合成的离网型风光氢氨系统两阶段分布鲁棒调度*

王世杰 胡书瑞 程大运 李明涛 陈玉彬

(西安交通大学绿色氢电全国重点实验室, 710049, 陕西西安)

摘要: 针对离网型风光氢氨耦合系统中风光波动性与化工生产稳定性的矛盾, 本文提出一种考虑多状态柔性合成的两阶段分布鲁棒优化调度模型。首先, 通过分析实际生产中电解槽启停特性与合成氨设备多段爬坡机制, 构建混合整数线性规划精细化模型, 提升系统应对风光出力波动的运行灵活性; 其次, 耦合燃机掺氢、氨裂解与氨燃料电池构建电氢氨双向转换路径, 结合多元储能与氢、氨需求响应机制, 增强系统调节能力与新能源消纳水平。最后, 构建数据驱动的两阶段分布鲁棒优化框架, 建立风光出力不确定集及极端场景概率分布置信集, 日前优化机组状态与出力计划, 日内调整极端场景最恶劣分布下的机组出力, 采用非精确列与约束生成算法迭代求解, 在降低模型保守性的同时快速逼近最优策略。结果表明, 所提模型依托精细化建模适配风光波动性, 结合分布鲁棒优化基于场景样本的求解策略适配风光不确定性, 日内调整成本仅为传统线性模型49.74%, 新能源消纳率达到97.74%, 在保障离网系统氢、氨稳定生产的前提下实现了最优经济调度。

关键词: 风光氢氨系统; 电氢氨耦合; 精细化建模; 分布鲁棒优化; 椭球不确定集

中图分类号: TM732 **文献标志码:** AA

文章编号: 0253-987X(XXXX)XX-0001-32

Two-Stage Distributionally Robust Scheduling for Multi-State Flexible Synthesis in Off-Grid Wind-Solar-Hydrogen-Ammonia Systems

WANG Shijie, HU Shurui, CHENG Dayun, LI Mingtao, CHEN Yubin

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi 710049, China)

Abstract: In order to address the conflict between the volatility of renewable energy and the stability requirements of chemical production in an off-grid wind-solar-hydrogen-ammonia coupled system, this paper proposes a two-stage distributionally robust optimization scheduling model considering multi-state flexible synthesis. Firstly, an analysis was conducted of the start-stop characteristics of electrolyzers and the multi-stage ramp operation mechanism of ammonia synthesis units in practical production, and a refined mixed-integer linear programming model is constructed to improve the system's operational flexibility in responding to the inherent fluctuation characteristics of wind-solar

收稿日期: XXXX-XX-XX. 基金项目: 构建主问题(master problem, MP)混合整数线性规划问题。

output. Secondly, a bidirectional power-hydrogen-ammonia conversion pathway is constructed by integrating hydrogen-blended gas turbines, ammonia cracking, and ammonia fuel cells, along with multi-energy storage and hydrogen-ammonia demand response mechanisms, which enhances the system's regulation capability and renewable energy accommodation level. Finally, a data-driven two-stage distributionally robust optimisation framework has been developed. This framework is notable for its formulation of the uncertainty set of renewable generation and the confidence set of extreme scenario probability distributions. The day-ahead stage determines unit commitment and dispatch plans, while the intraday stage adjusts unit outputs under the worst-case distribution of extreme scenarios. The model is iteratively solved using the inexact column-and-constraint generation algorithm, which approaches the optimal strategy rapidly while reducing the model conservatism. Case analysis shows that the proposed model adapts to the volatility of wind-solar output by virtue of refined modeling and to the uncertainty of wind-solar output with the scenario sample-based solution strategy of distributionally robust optimization. Its intraday adjustment cost is only 49.74% of the traditional linear model, and the system's renewable energy consumption rate reaches 97.74%, which achieves optimal economic scheduling on the premise of ensuring the stable production of hydrogen and ammonia in the off-grid system.

Keywords: wind-solar-hydrogen-ammonia system; electricity-hydrogen-ammonia coupling; refined modeling; distributionally robust optimization; ellipsoidal uncertainty set

为响应国家“双碳”战略需求，我国风光装机总量预计将在2030年突破16亿千瓦^[1]。2024年底，国家发改委等部门联合印发意见指出，应重点发展风光氢氨一体化项目，推动工业领域深度脱碳，协同缓解绿电消纳与绿色化工脱碳问题^[2]。当前国内外风光氢氨示范项目在工程落地的核心瓶颈集中于风光出力的分钟级波动与电解槽、合成氨设备对稳定运行的刚性需求之间的矛盾，由此引发电解槽催化剂溶解、合成氨反应器床层温度失稳等问题^[3]，导致设备损耗加剧、冗余配储成本高昂，最终制约项目经济性^[4]。因此，提升系统灵活调节能力是推动风光氢氨一体化项目从示范走向产业化的关键。

风光氢氨耦合系统可分为并网模式^[5]与离网模式^[6]。并网模式虽能提升调度灵活性，但风光波动会增加电网调峰压力^[7]。相比之下，离网模式因其独立运行特性在偏远地区更具应用优势^[8]。现有研究主要通过引入中间转换设备提升系统调节能力，余志鹏等人^[9]将掺氢燃气轮机与氨分解装置加入系统，实现氢-电以及氨-氢能流转换，显著降低了碳排放成本。胡俊杰等人^[10]探究了掺氢比对系统能量转换经济性影响，分析得出掺氢燃气轮机的加入可显著提高风光发电系统调度积极性。潘超^[11]、Quach^[12]验证了直接氨燃料电池与电氢氨系统耦合的可行性，结果显示氨燃料电池相比于氢燃料电池能够进一

步提高新能源利用率。然而,上述研究多聚焦于单一能量转换环节,未能充分发挥多能流协同优化的潜力,特别是在离网场景下仍需深入研究如何协调波动性电源与稳定性负荷之间的矛盾。

在系统建模层面,现有研究对风光氢氨耦合系统的描述仍不够精细。张润之等人^[13]基于特定场景分析了系统经济性,但其模型仅考虑电解槽和合成氨设备的能量平衡约束,未充分反映化工生产的动态变载特性,导致优化结果过于理想。李龙艳等人^[14]虽对电解槽进行精细化建模,分析了电热老化对制氨成本的影响,但忽略了电解槽的多状态切换与合成氨设备的柔性运行约束,尤其是变负荷生产的爬坡机制。而实际系统中,电解槽具备启动、工作、待机、停机四种状态^[15],可灵活响应风光波动;合成氨设备通过调节反应温度和压力实现变负荷生产,其爬坡速率远低于风光波动频率,且在低负荷工况下响应延迟更为显著^[16]。针对这一矛盾,Yu^[17]、Zhou^[18]以柔性合成氨精细化模型为基础,提出了多种可提高风光消纳率的应用场景。李伊竹林^[19]、廖思阳^[20]则尝试引入负荷侧需求响应以提高系统调度灵活性,验证了其在稳定生产需求的同时能够降低综合用电成本,但现有研究尚未建立电氢氨设备精细化模型与负荷侧需求响应策略的协同优化框架。

风光氢氨系统的运行计划需要基于天气预测数据提前制定,面临误差数据的不确定性。当前研究中,随机优化方

法依赖于精确概率分布^[21-22],在实际工程中历史数据往往难以满足数量和质量要求。鲁棒优化通过设定风光出力硬性边界得到的极端场景调度结果具有系统可靠性^[23-24],但是策略过于保守。相较而言,分布鲁棒优化仅需有限历史误差数据构建模糊概率分布^[25-26],具有求解效率高、保守性适中的优势。张宇华等人^[27]融合了分布鲁棒优化中基于矩信息与基于统计距离的两类方法,构建最小体积封闭椭圆加范数约束的模糊集,有效兼顾了风光出力的极端场景及其概率分布特征。

本文建立了考虑多状态柔性合成的离网型风光氢氨耦合系统的两阶段分布鲁棒优化模型。首先,基于混合整数线性规划框架,构建了电解槽多状态切换模型与合成氨装置多段爬坡状态约束,更好地协调了化工生产柔性 with 风光波动性;其次,通过耦合掺氢燃气轮机、氨裂解装置与直接氨燃料电池,建立了“电-氢-氨-氢-电”双向转换机制,显著提升了系统的运行灵活性;最后,采用数据驱动的最小体积包围椭圆(minimum volume enclosing ellipsoid, MVEE)算法构建风光出力不确定集,结合范数约束构建置信集,通过非精确列与约束生成(inexact column and constraint generation, I-C&CG)算法求解两阶段优化问题获得最优调度策略。算例结果表明,所提模型能够显著促进风光消纳并保障氢、氨稳定生产,同时具有经济效益。

1 离网型风光氢氨耦合系统架构

离网型风光氢氨耦合系统的基本架构及能流运行结构如图1所示。在能源供给侧，风光机组提供清洁电力，并通过燃气轮机来补偿功率缺口。电氢氨多

能流转换的核心为电解槽阵列与合成氨装置，并集成变压吸附制氮装置、掺氢燃气轮机、氨裂解装置及直接氨燃料电池，形成双向可逆的能量转换路径。此外，通过配置多元储能设备及氢、氨负荷的需求响应机制，进一步增强离网系统的稳定性。

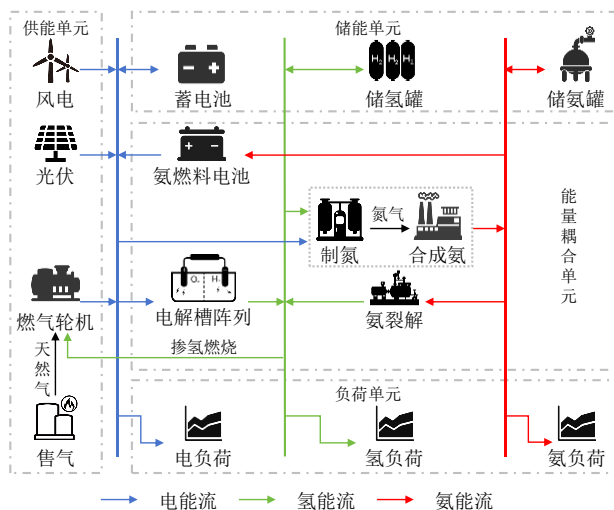


图1 电氢氨耦合系统架构

Fig. 1 Structure of electric-hydrogen-ammonia coupling system

在离网生产场景中，多能转换能够显著提升系统灵活调节能力。在风光出力充裕时段，富余电力通过电解槽制氢并进一步合成绿氨实现能量存储；当风光出力不足时，系统启动氨裂解制氢并供给燃料电池发电，或通过掺氢燃气轮机进行快速功率补偿，从而实现氢、氨生产与新能源消纳的协同优化。

2 电氢氨转换设备建模

2.1 能量转换设备数学模型

为易于理解设备运行机制与约束逻辑，正文按设备状态分类呈现核心约束关系。可直接用于编程求解的数学模型及变量细节详见附录A式（A1-A2）。

2.1.1 考虑启停特性的电解槽阵列精细化模型

电解槽（electrolyzer, EL）是电氢转化的关键设备，能够有效促进风光消

纳。由于质子交换膜电解槽 (proton exchange membrane, PEM) 具有更快的响应速率和更高的转换效率,为了满足实际生产的灵活调度需求,本文划分了 N_{el} 组独立控制的 PEM 阵列单元,并对每组电解槽的运行状态进一步划分为停机、启动、冷待机和工作状态^[15],引入 4 个二进制变量来分别表示电解槽所处的状态。对第 i 组电解槽在调度周期 T 内任一时刻 t 满足如下约束:

1) 停机状态 ($\gamma_{EL,i}^S(t)=1$) 时,电解槽不消耗电能,不产生氢气,此时电解槽视为可中断负荷且能够立即停机,其约束条件为:

$$\begin{cases} P_{EL,i}(t)=0 \\ H_{EL,i}(t)=0 \\ \gamma_{EL,i}^S(t+1)+\gamma_{EL,i}^L(t+1)=1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\gamma_{EL,i}^S(t)$ 为 t 时刻电解槽 i 停机状态变量; $P_{EL,i}(t)$ 为 t 时刻电解槽 i 消耗的功率; $H_{EL,i}(t)$ 为 t 时刻电解槽 i 产出氢气的质量; $\gamma_{EL,i}^L(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻电解槽 i 启动状态变量。

2) 启动状态 ($\gamma_{EL,i}^L(t)=1$) 时,电解槽不产氢,但是启动前期需要加热水解液来进行热启动,所以需要消耗电能,其约束条件为:

$$\begin{cases} P_{EL,i}(t)=\beta_{EL}^L P_{EL}^{\max} \\ H_{EL,i}(t)=0 \\ \gamma_{EL,i}^L(t+1)+\gamma_{EL,i}^W(t+1)=1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: β_{EL}^L 为启动时的电能损失系数; $P_{EL}^{\max}$ 为电解槽的装机容量; $\gamma_{EL,i}^L(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻电解槽 i 冷待机状态变量,为 1 时电解槽冷待机; $\gamma_{EL,i}^W(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻

电解槽 i 工作状态变量。

3) 冷待机状态 ($\gamma_{EL,i}^I(t)=1$) 时,电解槽关闭但不停机,以低功率待机维持控制和防冻单元的运行^[28]。在该状态电解槽需要 5~10 分钟来完成冷启动,其约束条件为:

$$\begin{cases} P_{EL,i}(t)=\beta_{EL}^I P_{EL}^{\max} \\ H_{EL,i}(t)=0 \\ \gamma_{EL,i}^I(t+1)+\gamma_{EL,i}^W(t+1)=1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: β_{EL}^I 为冷待机状态下电能损失系数。

4) 工作状态 ($\gamma_{EL,i}^W(t)=1$) 时,电解槽能够在设备容量上下限区间变载运行并产生氢气,其约束条件为:

$$\begin{cases} H_{EL,i}(t)=\lambda_{EL} P_{EL,i}(t) \\ P_{EL}^{\min} \leq P_{EL,i}(t) \leq P_{EL}^{\max} \\ \gamma_{EL,i}^I(t+1)+\gamma_{EL,i}^S(t+1)+\gamma_{EL,i}^W(t+1)=1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{EL}^{\min}$ 为电解槽设备正常工作时的功率下限; λ_{EL} 为电解槽制氢时的单位电耗系数。

运行状态之间应当满足互斥约束:

$$\gamma_{EL,i}^S(t)+\gamma_{EL,i}^L(t)+\gamma_{EL,i}^W(t)+\gamma_{EL,i}^I(t)=1 \quad (5)$$

电解槽在短时间内频繁启停会造成设备损伤,因此需要对电解槽的停机状态和冷待机状态的最短持续时间进行约束:

$$\begin{cases} \sum_{\tau=t}^{t+\tau_{EL}^S-1} \gamma_{EL,i}^S(\tau) \geq \tau_{EL}^S \cdot [\gamma_{EL,i}^S(t)-\gamma_{EL,i}^S(t-1)] \\ \sum_{\tau=t}^{t+\tau_{EL}^I-1} \gamma_{EL,i}^I(\tau) \geq \tau_{EL}^I \cdot [\gamma_{EL,i}^I(t)-\gamma_{EL,i}^I(t-1)] \end{cases} \quad (6)$$

式中: τ_{EL}^S 为停机状态的最短连续时间;

$\tau_{\text{EL}}^{\text{L}}$ 为冷待机状态的最短时间。

此外, 每组电解槽启动和停机事件约束条件为:

$$\begin{cases} \gamma_{\text{EL},i}^{\text{L}}(t)=1, & \Theta_{\text{EL},i}(t)=\gamma_{\text{EL},i}^{\text{L}}(t)-\gamma_{\text{EL},i}^{\text{L}}(t-1) \\ \gamma_{\text{EL},i}^{\text{S}}(t)=1, & \Lambda_{\text{EL},i}(t)=\gamma_{\text{EL},i}^{\text{S}}(t)-\gamma_{\text{EL},i}^{\text{S}}(t-1) \\ 0 \leq \Theta_{\text{EL},i}(t)+\Lambda_{\text{EL},i}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\Theta_{\text{EL},i}(t)$ 、 $\Lambda_{\text{EL},i}(t)$ 分别为电解槽 i 在 t 时刻启动、停机事件标志, 为 1 时分别代表电解槽发生了启动、停机事件。

2.1.2 考虑多段爬坡状态的合成氨精细化模型

电转氨技术 (power-to-ammonia, P2A) 在电制氢后, 通过哈伯法在反应器中将氢气和氮气合成氨, 能够实现电能到氨的转化。合成氨设备的爬坡率对其催化剂寿命、设备安全及运行效率具有决定性影响, 需兼顾调度灵活性与化工生产特性。

实际生产中, 负载调节主要通过改变反应器温度和压力来调节, 存在显著动态差异^[29]。低负载阶段受限于催化剂活性边缘的弱动力学响应与系统热惯性, 过快升载可能导致反应器床层温度失稳或局部飞温; 高负载阶段因反应体系已处于高温高活性的强动力学区间, 且具备充足的热力学势差与热容缓冲, 允许适度加速调节以响应风光波动; 降载过程得益于反应放热的同步减少和可控的冷却流程, 能够实现快速爬坡。

因此, 本文将合成氨设备划分为快速升载 (负载率 > 25%)、慢速升载 (负

载率 ≤ 25%) 和降载三种运行模式^[29], 建立了考虑多段爬坡状态的混合整数线性规划模型, 其能量转化及物料守恒约束为:

$$\begin{cases} P_{\text{P2A}}(t)=\lambda_{\text{P2A}} A_{\text{P2A}}(t) \\ A_{\text{P2A}}(t)=5.667 \eta_{\text{P2A}} H_{\text{P2A}}(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{P2A}}(t)$ 为合成氨设备在 t 时刻消耗的电功率; λ_{P2A} 为合成氨设备单位电耗系数; $A_{\text{P2A}}(t)$ 为在 t 时刻合成氨的质量; η_{P2A} 为合成氨设备转化效率; $H_{\text{P2A}}(t)$ 为合成氨过程中消耗氢气的质量。

1) 慢速升载 ($\gamma_{\text{P2A}}^{\text{slow}}(t)=1$) 时, 合成氨上下限和爬坡约束为:

$$\begin{cases} A_{\text{P2A}}^{\text{min}} \leq A_{\text{P2A}}(t) \leq A_{\text{P2A}}^{\text{tr}} \\ 0 \leq A_{\text{P2A}}(t) - A_{\text{P2A}}(t-1) \leq r_{\text{P2A}}^{\text{slow}} A_{\text{P2A}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\gamma_{\text{P2A}}^{\text{slow}}(t)$ 为在 t 时刻慢速爬坡模式的二进制变量; $A_{\text{P2A}}^{\text{min}}$ 为合成氨设备的负载下限; $A_{\text{P2A}}^{\text{tr}}$ 为快速升载模式与慢速升载模式切换时的负载; $A_{\text{P2A}}^{\text{max}}$ 为合成氨设备的装机容量; $r_{\text{P2A}}^{\text{slow}}$ 为慢速升载状态下的爬坡率。

2) 快速升载 ($\gamma_{\text{P2A}}^{\text{fast}}(t)=1$) 时, 合成氨上下限和爬坡约束为:

$$\begin{cases} A_{\text{P2A}}^{\text{tr}} \leq A_{\text{P2A}}(t) \leq A_{\text{P2A}}^{\text{max}} \\ 0 \leq A_{\text{P2A}}(t) - A_{\text{P2A}}(t-1) \leq r_{\text{P2A}}^{\text{fast}} A_{\text{P2A}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\gamma_{\text{P2A}}^{\text{fast}}(t)$ 为在 t 时刻快速升载模式的二进制变量; $r_{\text{P2A}}^{\text{fast}}$ 为快速升载状态下的爬坡率。

3) 降载模式 ($\gamma_{\text{P2A}}^{\text{down}}(t)=1$) 时, 合成氨上下限和爬坡约束为:

$$\begin{cases} A_{P2A}^{\min} \leq A_{P2A}(t) \leq A_{P2A}^{\max} \\ -r_{P2A}^{\text{down}} A_{P2A}^{\max} \leq A_{P2A}(t) - A_{P2A}(t-1) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\gamma_{P2A}^{\text{down}}$ 为在 t 时刻降载模式的二进制变量; r_{P2A}^{down} 为降载模式下的爬坡率。

模式之间满足互斥约束:

$$\gamma_{P2A}^{\text{slow}}(t) + \gamma_{P2A}^{\text{fast}}(t) + \gamma_{P2A}^{\text{down}}(t) \leq 1 \quad (12)$$

其他电、氢、氨能量转化设备的数学模型详见附录A式(A3-A6)。

2.2 能量储存设备模型

能量储存设备是风光氢氨系统中系统调节能力的核心。本文采用电储能、氢储能、氨储能,并建立了储能设备的通用模型如下^[9]:

$$S_X(t) = (1 - \sigma_X)S_X(t-1) + \eta_X^{\text{ch}} X_S^{\text{ch}}(t) - \frac{X_S^{\text{dis}}(t)}{\eta_X^{\text{dis}}} \quad (13)$$

式中: X 为储能设备类型, P、H、A 分别代表电、氢、氨; $S_X(t)$ 为 X 类储能的 t 时刻的荷能状态 (state of energy, SoE); σ_X 为 X 类储能的自损耗率; η_X^{ch} 、 η_X^{dis} 为 X 类储能的充放能效率; $X_S^{\text{ch}}(t)$ 、 $X_S^{\text{dis}}(t)$ 为 X 类储能 t 时刻充放能功率。

储能不仅需要满足容量约束,为确保调度策略的可移植性,调度周期 T 内始末荷能状态应相等:

$$\begin{aligned} S_X(0) &= S_X(T) \\ S_X^{\min} &\leq S_X(t) \leq S_X^{\max} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $S_X^{\min}$ 、 $S_X^{\max}$ 为荷能状态的上下限。

此外,储能需要满足充放状态互斥和爬坡约束:

$$\begin{cases} 0 \leq X_S^{\text{ch}}(t) \leq \gamma_{S,X}(t) X_S^{\max} \\ 0 \leq X_S^{\text{dis}}(t) \leq [1 - \gamma_{S,X}(t)] X_S^{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\gamma_{S,X}(t)$ 为 X 类储能设备 t 时刻的充放状态的二进制变量,为1时储能设备充能; $X_S^{\max}$ 为 X 类储能设备的最大充放能功率。

2.3 氢、氨需求响应模型

氢、氨需求响应通过转移负荷削峰填谷,能够提高风光氢氨系统的稳定供应能力。

可转移负荷在调度周期 T 内,需求响应调节的总负荷量需与原始负荷总量保持一致^[19]:

$$\sum_{t=1}^T X_{\text{DR}}(t) = \sum_{t=1}^T \hat{X}_L(t) \quad (16)$$

式中: X 包括氢、氨负荷; $X_{\text{DR}}(t)$ 为 X 类负荷在 t 时刻的实际调度量; $\hat{X}_L(t)$ 为原始需求量。

氢、氨负荷的可转移质量需要满足可转移比例约束:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{DR},X}(t)(1 - \beta_{\text{DR},X})\hat{X}_L(t) &\leq X_{\text{DR}}(t) \leq \\ \gamma_{\text{DR},X}(t)(1 + \beta_{\text{DR},X})\hat{X}_L(t) \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\gamma_{\text{DR},X}(t)$ 为 X 类负荷转移状态,为1时表示发生转移; $\beta_{\text{DR},X}$ 为 X 类负荷的最大可转移比例。

调度周期内需求响应调节的总转移负荷为:

$$\begin{cases} X_{\text{DR}}(t) - \hat{X}_L(t) = \Delta X_{\text{DR}}^+(t) - \Delta X_{\text{DR}}^-(t) \\ D_{\text{DR},X} = \sum_{t=1}^T [\Delta X_{\text{DR}}^+(t) + \Delta X_{\text{DR}}^-(t)] \\ \Delta X_{\text{DR}}^+(t) \geq 0, \Delta X_{\text{DR}}^-(t) \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\Delta X_{\text{DR}}^+(t)$ 、 $\Delta X_{\text{DR}}^-(t)$ 为 X 类可转移负荷的正负偏差; $D_{\text{DR},X}$ 为需求响应负荷的总转移量。

此外, 为避免负荷转移到多个单时段, 设备发生频繁启停, 可转移负荷需要最短连续时间约束:

$$\sum_{\tau=t}^{t+\tau_{\text{DR},X}-1} \gamma_{\text{DR},X}^{\tau} \geq \tau_{\text{DR},X} [\gamma_{\text{DR},X}(t) - \gamma_{\text{DR},X}(t-1)] \quad (19)$$

式中: $\tau_{\text{DR},X}$ 为 X 类负荷的最短连续转移时间。

3 数据驱动两阶段分布鲁棒优化模型

本文建立了基于数据驱动的两阶段分布鲁棒优化模型 (distributionally robust optimization, DRO), 使用凸多面体不确定集描述极端场景, 并引入范数约束表征场景概率分布, 形成 min-max-min 两阶段三层优化模型, 旨在最小化考虑风光不确定性下的总运行成本。

3.1 风光出力不确定性模型

基于数据驱动的思想, 使用历史运行数据构建风光出力预测误差的不确定性集, 其中误差数据来源于不同类别、个数的机组和不同时刻。因此, 定义误差为随机变量矩阵, 并划分为 N_d 个场景:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega} = [\boldsymbol{\omega}_1, \dots, \boldsymbol{\omega}_k, \dots, \boldsymbol{\omega}_{N_d}] \\ \boldsymbol{\omega}_k = [\boldsymbol{\omega}_{1,1}^{\text{WT}}(1), \dots, \boldsymbol{\omega}_{i,k}^{\text{WT}}(t), \dots, \boldsymbol{\omega}_{N_{\text{wt}},k}^{\text{WT}}(T), \\ \quad \boldsymbol{\omega}_{1,k}^{\text{PV}}(1), \dots, \boldsymbol{\omega}_{i,k}^{\text{PV}}(t), \dots, \boldsymbol{\omega}_{N_{\text{pv}},k}^{\text{PV}}(T)] \\ \forall k \in [1, \dots, N_d], i \in [1, \dots, N_{\text{re}}], t \in [1, \dots, T] \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}$ 表示风光出力预测误差的多维随机矩阵; $N_{\text{re}} = N_{\text{wt}} + N_{\text{pv}}$ 表示风光机组的总数量, N_{wt} 表示风电机组数量, N_{pv} 表示光伏机组数量; N_d 表示不确定集中所包含场景的个数。

使用 MVEE 算法建立包含所有场景的高维最小体积椭球。风光出力预测误差是由风光机组总数与调度周期构成的 $N_{\text{re}}T$ 维时空耦合变量, 每个维度的极端波动均表现为正向最大偏差与负向最大偏差两种状态^[27]。因此, 需通过椭球顶点形成极端场景集, 确保完整覆盖所有可能的极端波动模式。凸多面体集合中的任意风光出力预测误差均可表示为该顶点极端场景的线性组合。

$$U = \left\{ \boldsymbol{\omega} \in \mathbf{R}^{N_{\text{re}}T} \left| \begin{aligned} \boldsymbol{\omega} &= \sum_{s=1}^{N_s} p_s \boldsymbol{\omega}_s^* \\ \sum_{s=1}^{N_s} p_s &= 1, p_s \geq 0 \end{aligned} \right. \right\} \quad (21)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}$ 表示误差随机向量; $N_s = 2N_{\text{re}}T$ 为凸多面体顶点的个数, 对应极端场景个数; p_s 为第 s 个风光处理预测误差场景的概率; $\boldsymbol{\omega}_s^*$ 为顶点坐标。

日内运行阶段, 将风光实际最大出力值表示为日前预测值 $\hat{P}_i(t)$ 与预测误差极端场景 $\boldsymbol{\omega}_{i,s}^*(t)$ 的叠加, 构建风光出力极端场景集。

$$W = \left\{ P_s \in \mathbf{R}^{N_s \times T} \left| \begin{array}{l} P_{i,s}(t) = \hat{P}_i(t) + \omega_{i,s}^*(t) \\ \forall 1 \leq s \leq N_s \end{array} \right. \right\} \quad (22)$$

式中: P_s 为日内阶段第 s 个场景的风光实际最大出力矩阵, 含机组个数 i 与时刻 t 两个维度。

为刻画所有极端场景的概率分布特征, 建立基于 1-范数和 ∞ -范数约束的置信集 Γ :

$$\Gamma = \left\{ p_s \left| \begin{array}{l} \sum_{s=1}^{N_s} p_s = 1, p_s \geq 0 \\ \sum_{s=1}^{N_s} |p_s - p_s^0| \leq \theta_1 \\ \max_{1 \leq s \leq N_s} |p_s - p_s^0| \leq \theta_\infty \end{array} \right. \right\} \quad (23)$$

式中: θ_1 和 θ_∞ 分别表示 1-范数和 ∞ -范数的公差值。

该置信集能够基于历史样本数据提取极端场景的概率分布特征, 避免单一极端场景在日内运行阶段被过度表

征, 从而在保证场景可信度的同时有效降低模型保守性。不确定集与置信集的具体构建过程详见附录 C 式 (C1-C10)。

3.2 目标函数及约束条件

日前调度阶段为混合整数线性规划问题, 决策变量包括弃风弃光量、购气量、能量耦合设备与多元储能的出力计划及运行状态、可调节负荷。目标函数综合考虑购气成本、需求响应补偿成本、电解槽启停成本以及机组运维成本。中间层 max-min 问题寻找使二阶段成本最大的最恶劣场景概率分布。日内调整阶段为线性规划问题, 在给定最恶劣风光出力场景下, 优化弃风弃光调整量、购气调整量及各机组的出力调整量, 以最小化调整成本及弃风弃光总成本。模型的表达式为:

$$\min \left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{m \in M} c_{m,om} P_{DA,m}(t) + c_{GT} G_{GT}(t) + \right. \\ \left. \sum_{i=1}^{N_d} [c_{S,i} \Theta_{EL,i}(t) + c_{L,i} \Lambda_{EL,i}(t)] \right\} + \\ [c_{DR,H} D_{DR,H} + c_{DR,A} D_{DR,A}] + \\ \max_{p_s \in \Gamma} \left\{ \sum_{s=1}^{N_s} p_s \min \sum_{t=1}^T \{ c_{GT} [G_{GT}^+(t) - G_{GT}^-(t)] + \right. \\ \left. \sum_{m \in M} [q_m^+ P_m^+(t) + q_m^- P_m^-(t)] + \right. \\ \left. c_{cut} \left[\sum_{t=1}^{N_{cut}} P_{cut,WT}(t) + \sum_{t=1}^{N_{cut}} P_{cut,PV}(t) \right] \right\} \end{array} \right\} \quad (24)$$

式中: M 为系统中参与调度的机组集, $M = \{WT, PV, EL, P2A, PSA, GT, AFC, AD, PS, HS, AS\}$; $c_{m,om}$ 为第 m 台机组的单位运行维护成本系数; $P_{DA,m}(t)$ 为日前计划 t 时刻第 m 台机组出力; $c_{DR,H}$ 和 $c_{DR,A}$

为氢负荷和氨负荷的单位转移成本; c_{GT} 为购天然气成本; $c_{S,i}$ 和 $c_{L,i}$ 分别为电解槽的停机成本和启动成本; q_m^+ 和 q_m^- 分别为第 m 台机组向上调整和向下调整出力的单位成本系数; $P_m^+(t)$ 和 $P_m^-(t)$ 分

别为 t 时段第 m 台机组的向上调整功率和向下调整功率； $G_{\text{GT}}^+(t)$ 和 $G_{\text{GT}}^-(t)$ 分别为 t 时段购气向上调整质量和向下调整质量； c_{cut} 为弃风弃光的单位惩罚成本； $P_{\text{cut,WT}}(t)$ 和 $P_{\text{cut,PV}}(t)$ 为 t 时刻的弃风和弃

光功率。

系统的约束条件详见附录A式(A7-A12)。

3.3 模型求解

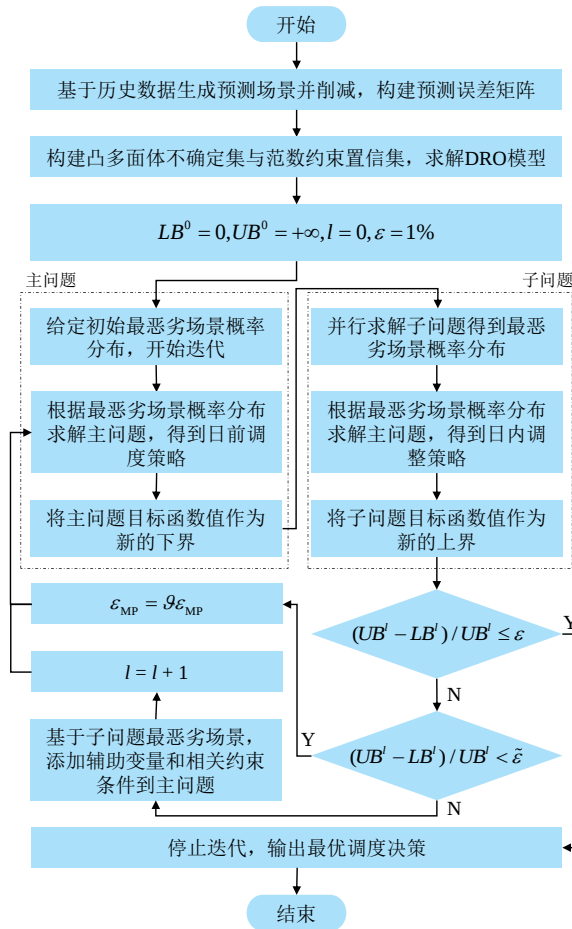


图2 I-C&CG算法求解流程

Fig. 2 I-C&CG algorithm solving process

为简化求解过程, 给出三层级鲁棒优化模型的紧凑公式。第一层级为日前阶段系统运行的最优调度决策, 以确定机组启停等状态和出力计划; 第二层级为考虑风光出力不确定性的最恶劣概率

分布; 第三层级为给定日前调度策略和风光出力场景下的日内阶段调整策略, 优化机组出力调整量以实现调整成本与弃风弃光成本最小化。紧凑形式为:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{x}, \mathbf{z}} (\mathbf{c}^T \mathbf{x} + \mathbf{d}^T \mathbf{z} + \max_{P_s \in \mathcal{F}} \sum_{s=1}^{N_s} p_s \min_{\mathbf{y} \in \Omega(\mathbf{x}, \mathbf{z}, P_s)} \mathbf{h}^T \mathbf{y}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{z} \leq \mathbf{b}, \mathbf{G}\mathbf{z} = \mathbf{1}, \mathbf{K}\mathbf{z} \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{E}\mathbf{P}_s = \mathbf{0}, \mathbf{D}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{P}_s \leq \mathbf{f} \\ \mathbf{A}(\mathbf{x} + \mathbf{y}) + \mathbf{B}\mathbf{z} \leq \mathbf{b} \\ \mathbf{C}\mathbf{y} = \mathbf{0} \\ \mathbf{D}(\mathbf{x} + \mathbf{y}) + \mathbf{F}\mathbf{P}_s \leq \mathbf{f} \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为一阶段连续变量, 表示机组出力, $\mathbf{z}$ 为一阶段 0-1 变量, 表示机组离散状态; $\mathbf{y}$ 为二阶段变量, 表示机组出力相对于日前决策变量 $\mathbf{x}$ 的调整量; $\Omega(\mathbf{x}, \mathbf{z}, P_s)$ 为给定 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{z}$ 时 $\mathbf{y}$ 的可行域; $\mathbf{c}$ 、 $\mathbf{d}$ 、 $\mathbf{h}$ 、 $\mathbf{b}$ 、 $\mathbf{f}$ 为系数向量; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{F}$ 为系数矩阵。

相较于传统 C&CG 算法, I-C&CG 算法使用非精确列减少迭代次数, 避免精确求解所有子问题, 具有良好的收敛性和显著的效率优势。对于上述鲁棒优化问题, 使用 I-C&CG 算法将其解耦成主问题和子问题进行迭代求解, 算法流程如图 2 所示, 具体步骤见附录 C 式 (C11-C17)。

4 算例分析

4.1 算例设置

以图 1 所示的能源系统为研究对象, 验证所提两阶段分布鲁棒优化模型的有效性。算例中, 风机与光伏机组总装机容量分别为 400MW 和 800MW; 电解槽阵列独立单元个数 N_e 为 4, 每组额定功率为 125MW。储能设备初始荷能状态均为 0.1。各设备技术经济性参

数及电、氢、氨负荷预测值详见附录 B。其中, 电解槽、合成氨等设备核心技术参数均为行业通用文献经验值, 可适用于同规模离网型风光氢氨系统。系统能源价格参数包括天然气采购价 5.0 元/kg, 弃风弃光惩罚成本 0.4 元/kWh; 氢、氨负荷单位转移成本分别为 10 元/kg 和 1.0 元/kg, 最短连续转移时间为 4h, 表示氢、氨柔性负荷调节所产生的综合内部成本。鲁棒优化模型求解采用 I-C&CG 算法, 设置收敛阈值 ε 为 1%、不精确收敛公差 $\tilde{\varepsilon}$ 为 1.5%、主问题相对间隙公差 ε_{MP} 为 2%、主相对收敛精度公差缩放因子 θ 为 0.9, 通过 Julia 1.10 平台调用 Gurobi 12.0 求解。

基于中国西北某电站风光机组实际运行数据, 选取电站连续 1 年的风光出力日前预测值与实测值匹配序列, 采样频率为 1h, 经异常值剔除、线性插值补全及归一化处理用于构建不确定集。设定 MVEE 算法收敛精度 $\epsilon=10^{-6}$, 置信水平 $\alpha=0.95$, 通过分位数校准确定椭球半径参数 $\rho^2 = \chi_{N_e T, 1-\alpha}^2$, 确保构建的高维椭球以 95% 置信概率包络真实风光出力预测误差场景^[27]。采用蒙特卡洛模拟生成 2000 个高维风光出力预测误差场景, 经 K-means 聚类算法削减至 $N_d=300$ 个典型场景, 用于进一步采用构建椭球不确定集。结合附图 D1 (a) 所示日前预测数据, 将典型场景下的误差数据进行叠加, 得到如附图 D1 (b) 所示日内风光最大出力极端场景。抽取 14:00 风光出力数据, 将高维椭球集投

影至二维平面,如附图D1(c)所示。椭球边界完整包络了 N_d 个削减场景,满足分布鲁棒优化的可行性要求。由椭球分布可以看出,风电与光伏出力呈现显著负相关性,具体表现为日间风电出力增大时光伏出力减弱,而光伏出力增强时段风电出力相应降低,符合风光出力的自然特性。该不确定集能够有效表征实际风光预测的不确定性特征。

4.2 系统调度结果分析

为分析风光氢氨耦合系统中关键设备与需求响应对系统灵活性和经济性等的影响,在日前阶段设置五种运行方案进行对比分析,具体方案见表1。

方案1采用本文提出的完整两阶段分布鲁棒优化模型;方案2在方案1基础上移除氨裂解及氨燃料电池设备;方案3进一步取消氢、氨负荷的需求响应机制;方案4取消燃气轮机掺氢燃烧过程;方案5在方案1基础上采用传统线性模型,忽略电解槽启停状态与合成氨装置的柔性变载特性。

表1 对比方案设置

Table 1 Comparison plan settings

	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
氨转氢/电	√	×	×	×	√
氢转电	√	√	√	×	√
需求响应	√	√	×	×	√
氢、氨合成 混合整数模型	√	√	√	√	×

4.2.1 电氢氨双向转换过程分析

在风光出力极端场景集的最恶劣概率分布条件下,求解得到方案1的最优日内调度方案。从图3可以看出,在1:00-5:00时段,光伏系统处于零出力状态,尽管风机达到最大出力,仍无法满足电、氢、氨系统的综合负荷需求。此时储能系统处于最低荷能状态,调节能力不足,系统需启动燃气轮机通过外购天然气发电以保障电力供应。在6:00-9:00时段,风光联合出力基本满足用电需求,为降低运行成本,系统关闭燃气轮机并启用电池储能系统平抑风光发电的波动性。在10:00-17:00时段进入风光联合出力高峰期,电池储能容量不足以完全消纳过剩电能,系统通过电解槽和合成氨设备生产绿色氢、氨,并利用储罐实现能量的梯级存储,为出力低谷期储备了调节容量。18:00-21:00时段面临风光出力下降与用电负荷高峰的双重压力,系统协同调度氨燃料电池发电和掺氢燃气轮机以满足需求,缓解了对外购天然气的需求,同时确保绿色氢、氨产品的低碳排放特性。22:00-24:00时段,风电出力再次提升,可完全覆盖电负荷与制氢需求。

如附图D2-D3所示,电解槽阵列作为主要供氢装置,通过四单元机组启停组合实现负荷的灵活调节。在18:00-21:00用电高峰时段,鉴于电解槽的电耗特性,电解槽阵列降载运行,系统通过氢储能放氢和氨裂解制氢两种途径保障氢能供给。此外,燃气轮机在此阶段

采用掺氢燃烧模式,既降低了天然气采购成本,又提升了氢能系统的整体利用效率。

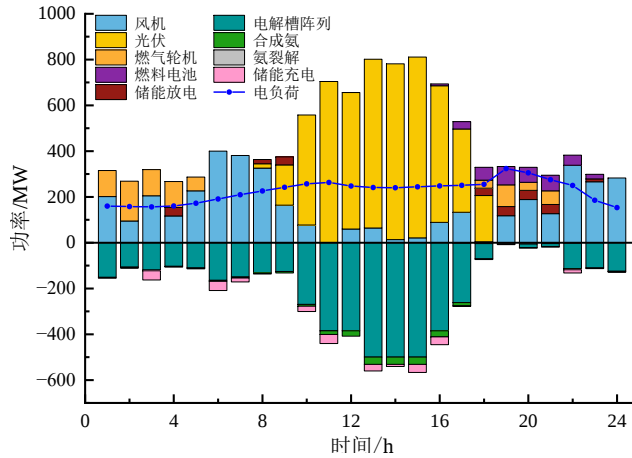


图3 方案1电能优化结果

Fig. 3 Result of electric energy optimization of scheme 1

合成氨设备保持24小时连续运行,其爬坡过程呈现显著的分段特征。在10:00-17:00风光出力高峰时段,设备爬坡率呈现阶梯式提升,初始阶段爬坡速率较缓,达到一定负载率后切换为快速爬坡,能够有效避免频繁负荷波动对生产稳定性的影响。在夜间馈电时段,系统利用储罐放能满足负荷需求,并同步启动燃料电池和裂解装置实现电氢氨反向转换,缓解系统供能压力。

4.2.2 需求响应及储能单元调度分析

结合附图D2-D3,针对氢、氨可转移负荷的优化调度匹配了风光波动特性。基于风光出力的反调峰特性,将夜间1:00-5:00用电高峰时段约4.9%的负荷转移至光伏大发时段,既降低了电解槽阵列在高峰时段的运行压力,又提高

了风光资源的消纳率,使合成氨设备低负载运行和高负载运行时段相对集中。

附图D4展示了电、氢、氨储能单元的荷能状态,三者基本呈现出“一充一放”的特征,在上午9:00左右同步启动充能过程,至下午16:00达到储能上限,并于夜间21:00完成放能。电储能主要承担快速响应功率失衡的作用,在1:00-9:00风电出力波动阶段优先响应短时功率波动,充放能转换次数显著高于氢、氨储能。氢、氨储能侧重于能量的跨时段转移,三者形成长短期互补运行模式。氢、氨储能支撑了系统日间的过量生产,并在夜间反向转换的运行机制,既确保了电解槽负载的稳定性,又避免了设备频繁启停。在风电剧烈波动时,可使PEM电解槽保持冷待机状态,大幅提升系统运行灵活性。综上所述

述,多元储能与需求响应机制在柔性化工生产中具有关键支撑作用。

4.2.3 电解槽阵列启停分析

图4展示了方案1中电解槽阵列的运行工况优化结果。从电功率变化可以看出,PEM主要工作在额定功率或最小技术出力状态,调度策略优先保持设备稳定运行并减少启停损耗。在1:00-8:00低负荷时段,系统采用□组电解槽作为主要调节单元,通过待机-工作状态切换响应风光波动,而□-□组电解槽大部分时间维持在最小工作状态;8:00后随着光伏出力增加,□-□组电解槽相继切换至额定功率运行,配合□组电解槽共同提升制氢负荷,确保氢储能、氨储能在16:00前完全充满。16:00-19:00光伏出力下降阶段,系统通过□组待机、□-□组相继停机的策略避免储能越限,此时氢负荷较小,主要依靠氢储能系统供氢。夜间21:00-24:00,□组电解槽重新启动以满足终端需求。如附图D5所示,相较于方案5的线性模型,本文模型通过考虑PEM的启停特性,使电解槽启停次数显著减少,有效降低了响应风光波动导致的设备损耗。

4.2.4 柔性合成氨调度分析

图5对比了方案1和方案5中合成氨设备的运行负载调度结果,验证了所提多阶段爬坡模型的有效性。对于方案一,在9:00-16:00光伏出力高峰时段,设备切换至高爬坡率模式,实现与新能

源出力波动的动态匹配,促进清洁能源消纳。随着午后风光出力衰减,装置平稳转入降载运行模式,避免储能越限的同时顺利过渡至低负载状态。基于需求响应机制将夜间风光出力不足时段的氨负荷转移,分段爬坡约束可确保设备此时在低负载率下稳定运行,有效抑制负荷波动引发的设备频繁调节问题。基于负载率的分段调控机制不仅增强了合成氨装置的运行稳定性,同时大幅降低了设备损耗与安全风险,尤其适用于离网型风光氢氨系统的长期可靠运行。

与传统线性模型相比,本文提出的多状态爬坡机制更符合实际化工生产中通过温度和压力控制反应速率的工艺特性。对于方案五,设备负载率夜间负荷跟随状态下持续波动,设备稳定性不足,刚性调节机制导致装置无法快速响应光伏出力的爬坡需求,造成弃光浪费。

4.2.5 不同方案综合对比分析

求解5种方案的优化结果如表2所示。通过对五种运行方案的对比分析,本文提出的完整优化模型展现出显著的综合优势。

方案1在总成本和风光利用率等方面均优于其他方案,验证了电-氢-氨多能耦合与需求响应机制的协同价值。具体而言,方案2因取消氨能转换环节导致风光消纳能力下降10.34%,虽然运维成本降低37.89万元,但购能成本上升60.59%并产生48.11万元弃风弃光成本,总成本增加16.01%。方案3进一步

取消需求响应后,系统调节灵活性受限,风光利用率降至85.76%,购能成本较方案2再增加11.30%。结合方案1-3可知,系统在失去耦合调节能力后高度依赖掺氢燃烧调节。方案4在禁止燃气轮机掺氢后,系统氢电转换能力更加受限,导致购能成本相较于方案1提升86.83%,验证了氢电耦合转换的必要性。对比分析表明,方案5采用传统线性模型时,忽略了电解槽启停与合成氨分段爬坡特性,总成本增加20.55%至312.84万元,同时系统应对风光不确定性的调节能力下降。从成本构成看,方案1通过日前制定的机组状态切换调度计划,将日内调整成本控制在46.27万元,仅为方案5的49.74%,购气波动率仅为31.62%,具有显著的稳定性优势,更符合离网型氢、氨生产场景的工程实际需求。

4.3 模型算法有效性分析

4.3.1 MVEE 不确定集拟合偏差影响分析

MVEE 算法的规则椭球形态与等概率分布假设,难以精准贴合风光误差的实际非椭球概率分布,或因稀疏样本区域的等概率考量引入保守性偏差。为量化该规则化拟合偏差对计算结果的实际影响,设置3组仅改变概率分布拟合方式的对比实验:方法1为本文原方法,采用MVEE与等概率分布假设的规则化构建方式;方法2保留椭球几何规则化特性,采用核密度估计拟合实际

概率分布,量化等概率假设的单独偏差;方法3放弃规则化约束,采用样本凸包与核密度估计的无规则化构建方式,量化综合拟合偏差。表3给出了三种方法的计算结果。

由表3可知,MVEE的规则化拟合偏差对模型核心指标的影响处于工程可接受范围。方法1较方法2、3的总运行成本仅上升2.24%、4.23%,日内调整成本上升3.95%、7.98%,仅带来轻微的保守性成本增加,无显著的经济损耗。三组方法的风光利用率均高于97.5%,最大偏差仅0.41%,表明MVEE规则化处理未导致高概率误差场景的调节不足,可保障离网系统稳定运行。求解效率上,方法1较2、3分别缩短43.94%、70.99%,大幅提升模型求解效率。综上,本文所用MVEE不确定集的规则化拟合偏差对模型核心指标影响甚微,在求解效率与模型精度间实现了良好平衡。

4.3.2 I-C&CG 算法性能分析

为验证所提I-C&CG算法在求解两阶段鲁棒优化问题中的优越性,将其与传统C&CG算法、嵌套C&CG算法进行对比测试,三种算法的求解性能统计如表4所示,迭代收敛过程如图6所示。

三种算法的上下界在前2轮迭代内快速压缩间隙,最终满足1%的收敛阈值,验证了算法的稳定性与收敛性。其中,I-C&CG算法总成本相较于传统C&CG算法的相对误差仅为0.69%,满

足工程精度要求；嵌套 C&CG 算法因内层迭代的保守性，总成本略高。在求解效率上，I-C&CG 算法求解时间仅 199.8 秒，较传统 C&CG、嵌套 C&CG 算法分别缩短 50.1%、65.3%，效率优

势显著。综合来看，I-C&CG 算法在可接受的精度损失下，大幅提升了分布鲁棒优化模型的求解效率，且收敛性能良好，更适用于实际调度优化场景。

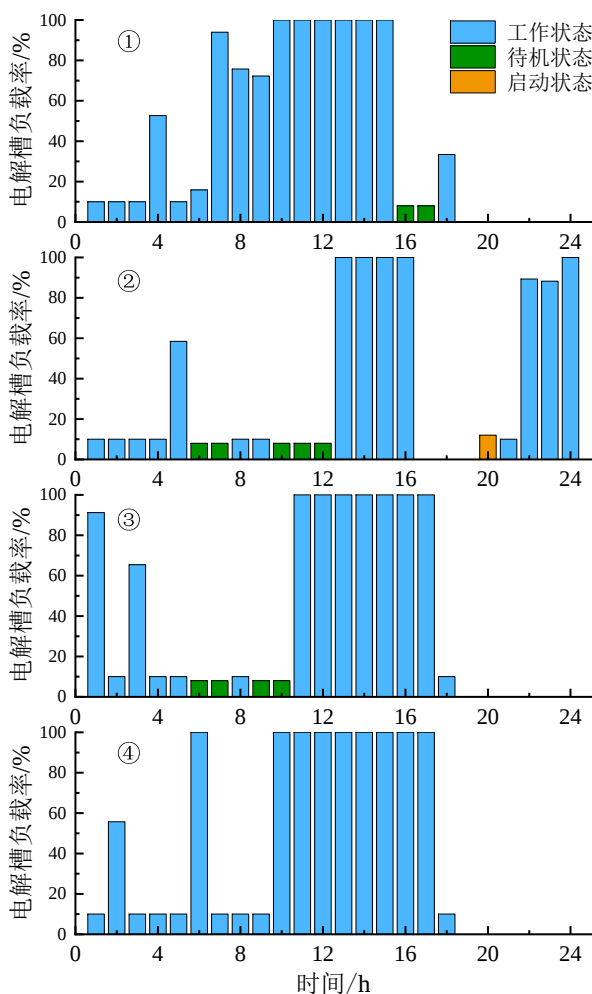


图4 方案1电解槽阵列运行负载

Fig. 4 Electrolyzer operating load of scheme 1

4.3.3 DRO模型场景数敏感性分析

本文通过对比分析，验证所提数据驱动DRO模型的有效性。设定置信水

平 $\alpha_1=0.5$, $\alpha_\infty=0.9$, 考察削减场景数 N_d 对模型保守性的影响，并与盒式不确定集鲁棒优化模型对比，结果如表5

所示。

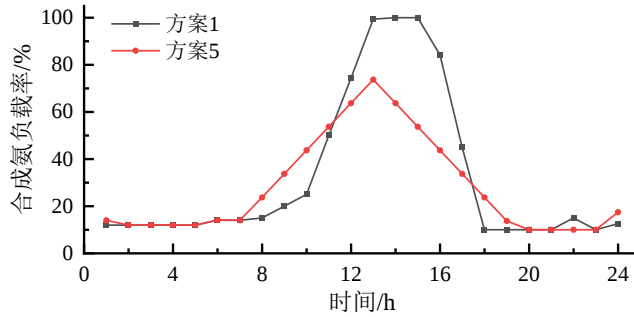


图5 方案1、5合成氨设备运行负载对比

Fig. 5 P2A operation load comparison of scheme 1&5

表2 五种方案调度结果

Table 2 Scheduling results of the 5 schemes

	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
运维成本/万元	159.04	121.15	120.98	119.99	143.06
购能成本/万元	40.85	65.60	73.01	76.32	44.41
启停成本/万元	1.47	1.47	1.47	2.42	—
需求响应成本/万元	3.26	6.09	—	—	5.90
弃风弃光成本/万元	8.61	48.11	54.38	55.87	26.44
日内调整成本/万元	46.27	58.62	63.47	73.43	93.03
总成本/万元	259.50	301.04	313.31	328.03	312.84
风光利用率	97.74%	87.40%	85.76%	85.37%	93.08%
购气波动率	31.62%	37.25%	30.94%	28.10%	41.01%

与盒式不确定集鲁棒模型相比,所提模型在保证风光利用率的同时,将总运行成本降低25.43%,计算效率提升3倍,避免了传统鲁棒优化方法的过度保守问题。随着场景数从100增至1000,场景分辨率逐渐变大,更加接近不确定量的真实值,保守性增强,其中风光利用率下降8.99%,总运行成本升高25.25%,购气波动率升高11.83%。同

时,冗余场景会显著增大模型求解的复杂度。通过椭球集合与范数约束的结合,本文所使用的DRO模型能够同时捕捉风光出力的极端场景及其概率分布特征,在一定程度上改善了盒式不确定集保守程度过高的问题。

5 结论

本文通过对氢、氨合成过程进行多

状态精细化建模,同时考虑到风光出力的不确定性,研究了风光氢氨耦合系统的两阶段分布鲁棒优化模型及调度策略,得到以下结论:

表3 不同概率分布拟合方法计算结果对比

Table 3 Comparison of calculation results of different probability distribution fitting methods

	方法1	方法2	方法3
总成本/万元	259.50	253.82	248.96
日内调整成本/万元	46.27	44.51	42.85
风光利用率	97.74%	97.92%	98.15%
购气波动率	31.62%	30.85%	29.76%
求解时间/秒	199.8	356.4	689.2

(1) 基于合成氨多段爬坡与电解槽多状态切换的精细化建模方法,显著提升了电-氢-氨系统的运行柔性,更符合

生产实际。相较于传统线性模型,所提模型调整成本仅为49.74%,有效缓解了风光波动性与化工生产稳定性之间的矛盾。

表4 不同算法求解性能对比

Table 4 Comparison of solution performance of different algorithms

算法	总成本/万元	迭代次数	求解时间/秒
传统C&CG	257.7	3	401.2
嵌套C&CG	272.2	6	577.2
I-C&CG	259.5	3	199.8

(2) 通过电-氢-氨双向转换与多元储能的协同优化,系统新能源消纳率达到97.74%,同时显著提升了电氢氨耦合的灵活性,在保障离网系统负荷供应基础上实现低碳经济运行。

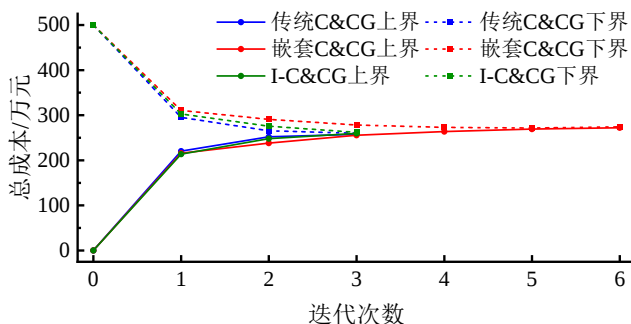


图6 不同算法求解迭代收敛曲线

Fig. 6 Iterative convergence curves of different algorithms

(3) 数据驱动的两阶段分布鲁棒模型可同步捕捉风光出力的极端场景与概率分布特征,其保守性随削减场景数增加而升高,较传统盒式鲁棒模型在求解效率与保守性间取得更好平衡。

(4) MVEE 不确定集虽存在轻微的概率分布拟合偏差,但对模型核心指标影响甚微,且能大幅提升求解效率;I-C&CG 算法在满足工程精度要求的前提下,较传统 C&CG 算法求解效率提

升50.1%,为分布鲁棒优化模型的高效求解提供了可行方案。

表5 不同模型对比结果

Table 5 Comparison results of different models

	鲁棒优化	分布鲁棒优化 (N_d 不同取值)			
		100	300	500	1000
总运行成本/万元	347.98	252.49	259.50	270.97	316.25
风光利用率	86.74%	98.23%	97.74%	94.15%	89.24%
购气波动率	47.86%	28.39%	31.62%	35.36%	40.22%
求解时间/秒	878.8	111.5	199.8	345.5	708.6

本文仅考虑了小时级调度,未充分计及风光分钟级波动对电解槽与合成氨等设备化工生产稳定性的影响。未来将进一步建立多时间尺度滚动鲁棒优化方法,通过分钟级快速调节电解槽、小时级优化合成氨生产,日前级统筹储能与负荷需求,保障化工过程动态稳定。其次,未来将进一步细化柔性化工设备的损耗成本,重点量化合成氨反应器的疲劳寿命成本,以及维持其热备用状态的能耗成本,从而避免调度策略过度依赖设备物理极限,实现全生命周期经济性与安全性的平衡。

$$\begin{aligned}
 & \min_{\mathbf{x}, \mathbf{z}, \eta} \quad \mathbf{c}^T \mathbf{x} + \mathbf{d}^T \mathbf{z} + \eta \\
 & \text{s.t.} \quad \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{z} \leq \mathbf{b}, \mathbf{G}\mathbf{z} = \mathbf{1}, \mathbf{K}\mathbf{z} \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{E}\mathbf{P}_{s,l} = \mathbf{0}, \mathbf{D}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{P}_{s,l} \leq \mathbf{f} \\ \eta \geq \sum_{i=1}^{N_s} \mathbf{p}_{s,i} \mathbf{h}^T \mathbf{y}_{s,i} \\ \mathbf{A}(\mathbf{x} + \mathbf{y}_{s,l}) + \mathbf{B}\mathbf{z} \leq \mathbf{b}, \mathbf{C}\mathbf{y}_{s,l} = \mathbf{0} \\ \mathbf{D}(\mathbf{x} + \mathbf{y}_{s,l}) + \mathbf{F}\mathbf{P}_{s,l} \leq \mathbf{f} \\ \forall 1 \leq l \leq k \end{cases} \quad (\text{B11})
 \end{aligned}$$

式中: l 为迭代次数; η 为子问题的松弛量; $\mathbf{y}_{s,l}$ 为极端场景 $\mathbf{P}_{s,l}$ 对应子问题的日内阶段解,在主问题中为已知量。

4) 构建子问题 (subproblem, SP), 包含各极端场景 s 的线性规划问题。

$$\begin{aligned}
 & \max_{\mathbf{p}_s \in \mathcal{S}} \sum_{s=1}^{N_s} \mathbf{p}_s \min_{\mathbf{y}_s \in \mathcal{Q}(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*, \mathbf{P}_s)} \mathbf{h}^T \mathbf{y}_s \\
 & \text{s.t.} \quad \begin{cases} \mathbf{A}(\mathbf{x}^* + \mathbf{y}_s) + \mathbf{B}\mathbf{z}^* \leq \mathbf{b} \\ \mathbf{C}\mathbf{y}_s = \mathbf{0} \\ \mathbf{D}(\mathbf{x}^* + \mathbf{y}_s) + \mathbf{F}\mathbf{P}_s \leq \mathbf{f} \end{cases} \quad (\text{B12})
 \end{aligned}$$

子问题形式是一个 max-min 双层优化问题,其中在给定条件 $(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{P}_s)$ 下,内层最小化问题是一个线性优化问题。利用线性优化理论中的强对偶定理,将子问题内层 min 对偶转化为 max 形式,并与外层 max 问题合并。

对于每个给定的场景 s , 求解内层问题的对偶形式,得到 π_s^* 。

$$\begin{aligned}
 & \mathcal{Q}(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*, \mathbf{P}_s) = \\
 & \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{y}_s \leq \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}^* - \mathbf{B}\mathbf{z}^* & \rightarrow \lambda \\ \mathbf{C}\mathbf{y}_s = \mathbf{0} & \rightarrow \mu \\ \mathbf{D}\mathbf{y}_s \leq \mathbf{f} - \mathbf{D}\mathbf{x}^* - \mathbf{F}\mathbf{P}_s & \rightarrow \nu \end{cases} \quad (\text{B13})
 \end{aligned}$$

通过拉格朗日对偶理论,内层问题的对偶形式为:

$$\begin{aligned} \max_{P_s, \lambda, \mu, v} \quad & (b - Ax^* - Bz^*)^T \lambda + (f - Dx^* - FP_s)^T v \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} -A^T \lambda - C^T \mu - D^T v = h \\ \lambda \geq 0, v \geq 0, P_s \in W \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{B14})$$

式中, x^* 为已知量, λ 、 μ 、 v 为对偶变量向量。记对偶最优值为 π_s^* , 与外层问题合并, 各场景 s 的内层问题的最优解相互独立, 能够并行求解。

5) 构建子问题外层问题, 求解极端场景最恶劣概率分布。

$$\max_{P_s \in \Gamma} \sum_{s=1}^{N_s} p_s \cdot \pi_s^* \quad (\text{B15})$$

由于 Γ 中的绝对值约束难以处理, 因此需引入辅助变量进行线性化处理。令 $t_s \geq |p_s - \hat{p}_s|$, 转化如下线性问题:

$$\begin{aligned} \max_{p_s, t_s} \quad & \sum_{s=1}^{N_s} p_s \cdot \pi_s^* \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{s=1}^{N_s} p_s = 1, p_s \geq 0 \\ p_s - \hat{p}_s \leq t_s, \hat{p}_s - p_s \leq t_s \\ \sum_{s=1}^{N_s} t_s \leq \theta_1, 0 \leq t_s \leq \theta_\infty \\ \eta \geq \sum_{s=1}^{N_s} p_s^{l+1} \cdot h^T y_s^{l+1} \\ A(x + y_s^{l+1}) + Bz \leq b \\ Cy_s^{l+1} = 0 \\ D(x + y_s^{l+1}) + FP_s \leq f \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{B16})$$

$$\begin{aligned} & \begin{cases} \eta \geq \sum_{s=1}^{N_s} p_s^{l+1} \cdot h^T y_s^{l+1} \\ A(x + y_s^{l+1}) + Bz \leq b \\ Cy_s^{l+1} = 0 \\ D(x + y_s^{l+1}) + FP_s \leq f \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{B17})$$

参考文献

- [1] 李亚楼,王丹丹,赵飞,等.电力多元转换(Power-to-X):技术路径、应用与挑战[J]. 电网技术,2024,48(05):1809-1820.
LI Yalou, WANG Dandan, ZHAO Fei, et al. Path, Application and Challenge of Power-to-X[J]. Power System Technology, 2024, 48(05): 1809-1820.
- [2] 《关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见》政策解读[J]. 财会学习,2024,(32):1-2.
Policy interpretation of the guiding opinions on vigorously implementing renewable energy substitution action[J]. Accounting Learning, 2024(32): 1-2.
- [3] 吉旭,周步祥,贺革,等.大规模可再生能源电解水制氢合成氨关键技术与应用研究进展[J]. 工程科学与技术,2022,(05):1-11.
JI Xu, ZHOU Buxiang, HE Ge, et al. Research Review of the Key Technology and Application of Large-scale Water Electrolysis Powered by Renewable Energy to Hydrogen and Ammonia Production[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, (05): 1-11.
- [4] 高建刚,姜亚鹏,包宝青,等.绿氢转化制绿色甲醇与绿氨[J]. 化工进展,2025,44(04):1987-1997.
GAO Jiangang, JIANG Yapeng, BAO Baoqing, et al. Green methanol and green ammonia synthesis by green hydrogen[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44(04): 1987-1997.
- [5] 薛姿杰,吴艳,崔子元,等.基于经济性分析的长周期绿氨合成模型:考虑网电碳排放因子连续变化的影响[J]. 化工进展,2025,(09):4917-4927.
XUE Zijie, WU Yan, CUI Ziyuan, et al. Long cycle green ammonia synthesis model based on economic analysis: considering the impact of continuous changes in grid carbon emission factors[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, (09): 4917-4927.
- [6] 袁文腾,陈亮,王春波,等.基于氨储能技术的电转氨耦合风-光-火综合能源系统

- 双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2023,43(18):6992-7003.
- YUAN Wenteng, CHEN Liang, WANG Chunbo, et al. Bi-level Optimal Scheduling of Power-to-ammonia Coupling Wind-photovoltaic-thermal Integrated Energy System Based on Ammonia Energy Storage Technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 6992-7003.
- [7] 毛志宇,李培强,郭思源.基于自适应时间尺度小波包和模糊控制的复合储能控制策略[J]. 电力系统自动化,2023,47(09): 158-165.
- MAO Zhiyu, LI Peiqiang, GUO Siyuan. Control Strategy of Composite Energy Storage Based on Wavelet Packet with Adaptive Time Scale and Fuzzy Control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(09): 158-165.
- [8] 王辰,汤奕,郑晨一.基于动态优化周期的风光氢储耦合系统改进能量管理策略[J]. 电力系统自动化,2025,49(02):142-153.
- WANG Chen, TANG Yi, ZHENG Chenyi. Improved Energy Management Strategy for Wind-Photovoltaic-Hydrogen-Storage Coupling System Based on Dynamic Optimization Cycles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(02): 142-153.
- [9] 余志鹏,林今,雷金勇,等.考虑火电掺氢氨燃烧发电的受端电力系统多阶段减碳规划[J]. 电力系统自动化,2025,49(05): 57-68.
- YU Zhipeng, LIN Jin, LEI Jinyong, et al. Multi-stage Decarbonization Planning for Receiving-end Power Systems Considering Thermal Power Generation with Hydrogen-Ammonia Cofiring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(05): 57-68.
- [10] 胡俊杰,吴俊,刘雪涛.基于极限场景法的燃气掺氢综合能源系统两阶段低碳经济调度[J/OL]. 电力系统自动化[2025-06-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250301.0949.004.html>.
- HU Junjie, WU Jun, LIU Xuetao. Two-stage Low-carbon Economic Dispatch of Gas-Hydrogen Blended Integrated Energy System Based on Extreme Scenario Method[J/OL]. Automation of Electric Power Systems[2025-06-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250301.0949.004.html>.
- [11] 潘超,杨铖,唐华,等.考虑氨能与广义储能的多能耦合系统低碳协调运行[J]. 电力建设,2024,45(07):122-133.
- PAN Chao, YANG Cheng, TANG Hua, et al. Low-Carbon Coordinated Operation of Multi-Energy Coupled System Considering Ammonia Energy and Generalized Energy Storage Participation[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(07): 122-133.
- [12] Thai-Quyen Q, Van-Tien G, Dong L K, et al. High-efficiency ammonia-fed solid oxide fuel cell systems for distributed power generation[J]. Applied Energy, 2022, 324.
- [13] 张润之,周家辉,徐钢,等.峰谷电价场景下并网型风光制氢合成氨系统的容量-调度优化分析[J]. 动力工程学报,2025,45(03):443-451.
- ZHANG Runzhi, ZHOU Jiahui, XU Gang, et al. Capacity-Scheduling Optimization of Grid-connected Wind-Solar Hydrogen Production and Ammonia Synthesis System Under Peak-to-Valley Electricity Price Scenarios[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45

- (03): 443-451.
- [14] 李龙艳,刘淑娟,宁超.考虑电热老化效应的数据驱动电热氢氨耦合微网分布鲁棒规划[J].电网技术,2025,49(01):22-31.
LI Longyan, LIU Shuxian, NING Chao. Data-driven Distributionally Robust Planning of Electricity-heat-hydrogen-ammonia Microgrid Considering the Electrothermal-aging Effect of SOEC[J]. Power System Technology, 2025, 49(01): 22-31.
- [15] Christopher V, Mahmoud M, Edwin Z. Modeling alkaline water electrolysis for power-to-x applications: A scheduling approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(14).
- [16] Smith C, Murciano T L. The importance of dynamic operation and renewable energy source on the economic feasibility of green ammonia[J]. Joule, 2024, 8(1): 157-174.
- [17] Yu Z, Lin J, Liu F, et al. Optimal Sizing and Pricing of Grid-Connected Renewable Power to Ammonia Systems Considering the Limited Flexibility of Ammonia Synthesis[J]. Transactions on Power Systems, 2024, 39(02) 3631-3648.
- [18] Zhou J, Zhang Z, Zhang R, et al. Optimal capacity and multi-stable flexible operation strategy of green ammonia systems: Adapting to fluctuations in renewable energy[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 314, 118720-118720.
- [19] 李伊竹林,韩肖清,李廷钧,等.基于动态电-碳需求响应的综合能源系统日前多元低碳交易方法[J].电力系统自动化, 2024, 48(12): 24-35.
LI Yizhulin, HAN Xiaoqing, LI Tingjun, et al. Multifaceted Day-ahead Low-carbon Trading Method for Integrated Energy Systems Based on Dynamic Electricity-Carbon Demand Response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 24-35.
- [20] 廖思阳,肖雨朵,徐箭,等.需求响应下计及高耗能工业负荷生产流程的经济调度模型[J].电力系统自动化, 2025, 49(03): 22-30.
LIAO Siyang, XIAO Yuduo, XU Jian, et al. Economic Dispatch Model Considering Production Process of Energy-Intensive Industrial Load Under Demand Response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(03): 22-30.
- [21] 钱韦廷,赵长飞,万灿,等.基于概率预测的混合储能平抑风电波动随机优化调控方法[J].电力系统自动化, 2021, 45(18): 18-27.
QIAN Weiting, ZHAO Changfei, WAN Can, et al. Probabilistic Forecasting Based Stochastic Optimal Dispatch and Control Method of Hybrid Energy Storage for Smoothing Wind Power Fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 18-27.
- [22] 杨莘博,谭忠富,林宏宇,等.计及合作联盟的园区综合能源系统随机优化及收益分配模型[J].电力系统自动化, 2020, 44(19): 36-46.
YANG Shenbo, TAN Zhongfu, LIN Hongyu, et al. Stochastic Optimization and Income Allocation Model for Park Integrated Energy System Considering Cooperation Alliance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 36-46.
- [23] 曹永吉,张恒旭,李常刚.计及扰动不确定性的储能系统容量鲁棒优化配置[J].电力系统自动化, 2024, 48(19): 139-147.

- CAO Yongji, ZHANG Hengxu, LI Chang-gang. Robust Optimization Configuration for Energy Storage System Capacity Considering Uncertainty of Disturbance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(19): 139-147.
- [24] 周亦洲,吴俊钊,孙国强,等.面向多级电-碳耦合市场的虚拟电厂两阶段鲁棒交易策略[J].电力系统自动化,2024,48(18): 38-46.
- ZHOU Yizhou, WU Junzhao, SUN Guoqiang, et al. Two-stage Robust Trading Strategy for Virtual Power Plant in Multi-level Electricity-Carbon Coupling Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 38-46.
- [25] 俞鸿飞,王韵楚,吕瑞扬,等.考虑灵活爬坡产品的虚拟电厂两阶段分布鲁棒优化运营策略[J].电力系统自动化,2024,48(14): 16-27.
- YU Hongfei, WANG Yunchu, LYU Ruiyang, et al. Two-stage Distributionally Robust Optimization Operation Strategy of Virtual Power Plants Considering Flexible Ramping Products[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14): 16-27.
- [26] 郭方洪,冯秀荣,杨溟,等.基于数据模型双驱动的新能源微电网分布鲁棒优化调度[J].电力系统自动化,2024,48(20):36-47.
- GUO Fanghong, FENG Xiurong, YANG Hao, et al. Dual-data-model-driven Distributionally Robust Optimal Scheduling of Renewable Energy Microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(20): 36-47.
- [27] 张宇华,张闯,王育飞,等.电氨转换及风光时空相关性的多能耦合系统两阶段鲁棒优化模型[J].电网技术,2025,(10):4299-4310.
- ZHANG Yuhua, ZHANG Chuang, WANG Yufei, et al. Two Stage Robust Optimization Model for Multi Energy Coupling System of Ammonia Conversion and Wind Solar Spatiotemporal Correlation[J]. Power System Technology, 2025, (10): 4299-4310.
- [28] 胡俊杰,童宇轩,刘雪涛,等.计及精细化氢能利用的综合能源系统多时间尺度鲁棒优化策略[J].电工技术学报, 2024,(05): 1419-1435.
- HU Junjie, TONG Yuxuan, LIU Xuetao, et al. Multi-Time-Scale Robust Optimization Strategy for Integrated Energy System Considering the Refinement of Hydrogen Energy Use[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, (05): 1419-1435.
- [29] Sánchez A, Martín M. Optimal renewable production of ammonia from water and air[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 178,325-342.

附录A

1) 合成氨设备混合整数线性规划 (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) 模型

$$\begin{cases}
\gamma_{P_{2A}}^{\text{slow}}(t) + \gamma_{P_{2A}}^{\text{fast}}(t) + \gamma_{P_{2A}}^{\text{down}}(t) \leq 1 \\
P_{P_{2A}}(t) = \lambda_{P_{2A}} A_{P_{2A}}(t), \quad A_{P_{2A}}(t) = 5.667 \eta_{P_{2A}} H_{P_{2A}}(t) \\
-\gamma_{P_{2A}}^{\text{down}}(t) A_{P_{2A}}^{\text{max}} \leq A_{P_{2A}}(t) - A_{P_{2A}}(t-1) \leq [1 - \gamma_{P_{2A}}^{\text{down}}(t)] A_{P_{2A}}^{\text{max}} \\
\gamma_{P_{2A}}^{\text{slow}}(t) A_{P_{2A}}^{\text{min}} + \gamma_{P_{2A}}^{\text{fast}}(t) A_{P_{2A}}^{\text{tr}} \leq A_{P_{2A}}(t) \leq A_{P_{2A}}^{\text{min}} + (A_{P_{2A}}^{\text{tr}} - A_{P_{2A}}^{\text{min}}) \gamma_{P_{2A}}^{\text{slow}}(t) + (1 - A_{P_{2A}}^{\text{min}}) \gamma_{P_{2A}}^{\text{fast}}(t) \\
-r_{P_{2A}}^{\text{down}} A_{P_{2A}}^{\text{max}} \leq A_{P_{2A}}(t) - A_{P_{2A}}(t-1) \leq [r_{P_{2A}}^{\text{slow}} \gamma_{P_{2A}}^{\text{slow}}(t) + r_{P_{2A}}^{\text{fast}} \gamma_{P_{2A}}^{\text{fast}}(t)] A_{P_{2A}}^{\text{max}}
\end{cases} \quad (1)$$

2) 单组电解槽 MILP 模型

$$\begin{cases}
\gamma_{EL}^S(t) + \gamma_{EL}^L(t) + \gamma_{EL}^W(t) + \gamma_{EL}^I(t) = 1 \\
\gamma_{EL}^S(t) \leq \gamma_{EL}^L(t+1) + \gamma_{EL}^S(t+1), \quad \gamma_{EL}^L(t) \leq \gamma_{EL}^I(t+1) + \gamma_{EL}^W(t+1) \\
\gamma_{EL}^W(t) \leq \gamma_{EL}^S(t+1) + \gamma_{EL}^I(t+1) + \gamma_{EL}^W(t+1), \quad \gamma_{EL}^I(t) \leq \gamma_{EL}^W(t+1) + \gamma_{EL}^I(t+1) \\
H_{EL}(t) = \lambda_{EL} P_{EL}(t) \\
0 \leq P_{EL}(t) \leq (1 - \gamma_{EL}^S(t)) P_{EL}^{\text{max}}, \quad 0 \leq H_{EL}(t) \leq (1 - \gamma_{EL}^S(t)) \lambda_{EL} P_{EL}^{\text{max}} \\
H_{EL}(t) \leq \lambda_{EL} [P_{EL}(t) - \beta_{EL}^L P_{EL}^{\text{max}} \gamma_{EL}^L(t)] + \lambda_{EL} P_{EL}^{\text{max}} [1 - \gamma_{EL}^L(t)] \\
H_{EL}(t) \geq \lambda_{EL} [P_{EL}(t) - \beta_{EL}^L P_{EL}^{\text{max}} \gamma_{EL}^L(t)] - \lambda_{EL} P_{EL}^{\text{max}} [1 - \gamma_{EL}^L(t)] \\
P_{EL}(t) \leq \beta_{EL}^I P_{EL}^{\text{max}} \gamma_{EL}^I(t) + P_{EL}^{\text{max}} (1 - \gamma_{EL}^I(t)), \quad P_{EL}(t) \geq \beta_{EL}^I P_{EL}^{\text{max}} \gamma_{EL}^I(t) - P_{EL}^{\text{max}} (1 - \gamma_{EL}^I(t)) \\
H_{EL}(t) \leq \lambda_{EL} P_{EL}^{\text{max}} (1 - \gamma_{EL}^I(t)) \\
\sum_{\tau=t}^{t+\tau_{EL}^S-1} \gamma_{EL}^S(\tau) \geq \tau_{EL}^S [\gamma_{EL}^S(t) - \gamma_{EL}^S(t-1)], \quad \sum_{\tau=t}^{t+\tau_{EL}^I-1} \gamma_{EL}^I(\tau) \geq \tau_{EL}^I [\gamma_{EL}^I(t) - \gamma_{EL}^I(t-1)]
\end{cases} \quad (2)$$

为简化模型求解,认为合成氮、掺氢燃气轮机、氨燃料电池、氨裂解设备的出力下限均可达到0.0,建模为线性规划模型,不考虑启停状态。

3) 变压吸附制氮

合成氨生产所需的氮气主要通过变压吸附法 (pressure swing adsorption, PSA) 从空气中分离获得。该技术利用吸附剂在不同压力下对氧气和氮气的选择性吸附差异实现气体分离。设备模型为^[27]:

$$\begin{cases}
P_{PSA}(t) = \frac{m_{N_2}(t) R T_{PSA}}{M_{air} \eta_{PSA}} \ln \frac{p_{out}}{p_{in}} \\
P_{PSA}^{\min} \leq P_{PSA}(t) \leq P_{PSA}^{\max}
\end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{PSA}(t)$ 为 t 时刻 PSA 设备的实际消耗电功率; $m_{N_2}(t)$ 为 t 时刻产氮的质量; M_{air} 为空气的摩尔质量; R 为理想气体常数; T_{PSA} 为制氮过程中对应的温度; p_{in} 、 p_{out} 分别为 PSA 入口、出口压力; η_{PSA} 为 PSA 的设备转化效率; $P_{PSA}^{\min}$ 、 $P_{PSA}^{\max}$ 分别为 PSA 的功率下限和装机容量。

4) 掺氢燃气轮机

掺氢燃气轮机 (gas turbine, GT) 是电-氢-氨协同系统中的关键能量转换设备,通过掺混氢气替代部分天然气燃料,显著降低碳排放强度。设备模型为^[10]:

$$\begin{cases} P_{GT}(t) = \eta_{GT} [H_{GT}(t)H_{LHV} + G_{GT}(t)G_{LHV}] \\ 0 \leq \frac{H_{GT}(t)H_{LHV}}{H_{GT}(t)H_{LHV} + G_{GT}(t)G_{LHV}} \leq \rho_{GT}^{\max} \\ P_{GT}^{\min} \leq P_{GT}(t) \leq P_{GT}^{\max} \\ -r_{GT}P_{GT}^{\max} \leq P_{GT}(t) - P_{GT}(t-1) \leq r_{GT}P_{GT}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{GT}(t)$ 为 t 时刻掺氢燃气轮机发电功率; η_{GT} 为掺氢燃气轮机的转化效率; $H_{GT}(t)$ 、 $G_{GT}(t)$ 分别为 t 时刻掺氢燃气轮机的氢气、天然气的消耗质量; H_{LHV} 、 G_{LHV} 分别为氢气、天然气的低位热值; $\rho_{GT}^{\max}$ 为最大掺氢比例; $P_{GT}^{\min}$ 、 $P_{GT}^{\max}$ 为掺氢燃气轮机的功率下限和装机容量; r_{GT} 为掺氢燃气轮机的爬坡率。

5) 氨燃料电池

氨燃料电池 (Ammonia Fuel Cell, AFC) 是一种通过化学反应将氨气中的化学能直接转化为电能的装置, 是实现“氨-电”转换的核心设备。设备模型为^[9]:

$$\begin{cases} P_{AFC}(t) = \eta_{AFC} A_{AFC}(t) \\ P_{AFC}^{\min} \leq P_{AFC}(t) \leq P_{AFC}^{\max} \\ -r_{AFC}P_{AFC}^{\max} \leq P_{AFC}(t) - P_{AFC}(t-1) \leq r_{AFC}P_{AFC}^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{AFC}(t)$ 为 t 时刻氨燃料电池的发电功率; η_{AFC} 为氨燃料电池的转化效率; $A_{AFC}(t)$ 为 t 时刻氨燃料电池的氨气消耗质量; $P_{AFC}^{\min}$ 、 $P_{AFC}^{\max}$ 分别为氨燃料电池的功率下限和装机容量; r_{AFC} 为氨燃料电池的爬坡率。

6) 氨裂解系统

氨裂解系统是实现“氨-氢”能量转换的关键设备, 通过高温催化反应将液氨裂解为氢氮混合气, 为燃料电池和工业用氢提供原料。设备模型为^[9]:

$$\begin{cases} P_{AD}(t) = \lambda_{AD} A_{AD}(t) \\ H_{AD}(t) = 0.176\eta_{AD} A_{AD}(t) \\ H_{AD}^{\min} \leq H_{AD}(t) \leq H_{AD}^{\max} \\ -r_{AD}H_{AD}^{\max} \leq H_{AD}(t) - H_{AD}(t-1) \leq r_{AD}H_{AD}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{AD}(t)$ 为 t 时刻氨裂解系统消耗的电功率; λ_{AD} 为氨裂解系统的单位电耗系数; $A_{AD}(t)$ 、 $H_{AD}(t)$ 为 t 时刻氨裂解系统消耗氨和产生氢气的质量; η_{AD} 为氨裂解系统的转化效率; $H_{AD}^{\min}$ 、 $H_{AD}^{\max}$ 分别为氨裂解系统的负荷功率下限和装机容量; r_{AD} 为氨裂解系统的爬坡率。

7) 系统约束条件

购气上限约束:

$$0 \leq G_{GT}(t) \leq G_{GT}^{\max} \quad (7)$$

式中: $G_{GT}(t)$ 为 t 时刻系统购气质量; $G_{GT}^{\max}$ 为单位时间系统购气质量上限。

弃风弃光约束:

$$0 \leq P_{\text{cut, WT}}(t) \leq P_{\text{WT}}^{\max}, 0 \leq P_{\text{cut, PV}}(t) \leq P_{\text{PV}}^{\max} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{cut, WT}}(t)$ 、 $P_{\text{cut, PV}}(t)$ 分别为 t 时刻风电、光伏机组的弃风、弃光功率; $P_{\text{WT}}^{\max}$ 、 $P_{\text{PV}}^{\max}$ 分别为风机、光伏机组的总装机容量。

电功率平衡约束:

$$P_{s, \text{WT}}(t) - P_{\text{cut, WT}}(t) + P_{s, \text{PV}}(t) - P_{\text{cut, PV}}(t) + P_{\text{G}}(t) + P_{\text{AFC}}(t) + P_{\text{S}}^{\text{dis}}(t) = \sum_{i=1}^{N_d} P_{\text{EL}, i}(t) + P_{\text{S}}^{\text{ch}}(t) + P_{\text{P2A}}(t) + P_{\text{PSA}}(t) + P_{\text{AD}}(t) + \hat{P}_{\text{L}}(t) \quad (9)$$

式中: $\hat{P}_{\text{L}}(t)$ 为 t 时刻的常规电负荷; $P_{s, \text{WT}}(t)$ 、 $P_{s, \text{PV}}(t)$ 为属于式 (22) 不确定集的第 s 个极端场景的风光最大出力值。

氢质量平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_d} H_{\text{EL}, i}(t) + H_{\text{AD}}(t) + H_{\text{S}}^{\text{dis}}(t) = H_{\text{S}}^{\text{ch}}(t) + H_{\text{P2A}}(t) + H_{\text{G}}(t) + H_{\text{DR}}(t) \quad (10)$$

氨质量平衡约束:

$$A_{\text{S}}^{\text{dis}}(t) + A_{\text{P2A}}(t) = A_{\text{AD}}(t) + A_{\text{S}}^{\text{ch}}(t) + A_{\text{AFC}}(t) + A_{\text{DR}}(t) \quad (11)$$

机组调整约束为考虑日前计划的各单元运行约束和功率平衡约束:

$$\begin{cases} P_{\text{ID}, m}(t) = P_{\text{DA}, m}(t) + P_m^+(t) + P_m^-(t) \\ P_m^+(t) \geq 0, P_m^-(t) \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{ID}, m}(t)$ 表示日内实际调度机组 m 的出力。

附录 B

表 B1 设备技术性参数

Table B1 Technical parameters of the equipment

设备参数名称	取值与单位	设备参数名称	取值与单位
合成氨额定产量	40000kg	燃气轮机转化效率	0.6
合成氨慢速/快速升载/降载爬坡率	0.05/0.25/0.50 ^[29]	燃气轮机掺氢比上限	0.3
合成氨升载切换负载率	25% ^[29]	氨燃料电池转化效率	0.87
合成氨负载范围	10%~100% ^[13]	氨裂解转化效率	0.97
合成氨单位电耗系数	0.98 ^[13]	电储能容量/充放范围	200MWh/10%~100%
电解槽单位电耗系数	0.65 ^[28]	氢储能容量 (电能当量) /充放范围	400MWh/10%~100%
电解槽待机/启动电能损失系数	0.08/0.12 ^[28]	氨储能容量 (电能当量) /充放范围	800MWh/10%~100%
电解槽最短连续停机/待机时间	3h/2h ^[28]	电储能充放功率上限	40MW
燃气轮机额定功率/爬坡率	200MW/0.5	氢储能充放功率上限	3000kg
氨燃料电池额定功率/爬坡率	800MW/0.3	氨储能充放功率上限	50kg
氨裂解额定产量/爬坡率	1500kg/0.3	氢、氨负荷最大可转移比例	0.15

表 B2 设备经济性参数

Table B2 Financial parameters of the equipment

设备参数名称	取值与单位	设备参数名称	取值与单位
风机运维成本系数	0.05 元/kWh	燃料电池运维成本系数	0.17 元/kWh
光伏运维成本系数	0.04 元/kWh	电储能运维成本系数	0.07 元/kWh
电解槽运维成本系数	0.12 元/kWh	氢储能运维成本系数	3.5 元/kg
合成氨运维成本系数	0.95 元/kg	氨储能运维成本系数	0.5 元/kg
燃气轮机运维成本系数	0.10 元/kWh	电解槽启动成本	4750 元/次
氨裂解运维成本系数	4.0 元/kg	电解槽停机成本	2490 元/次

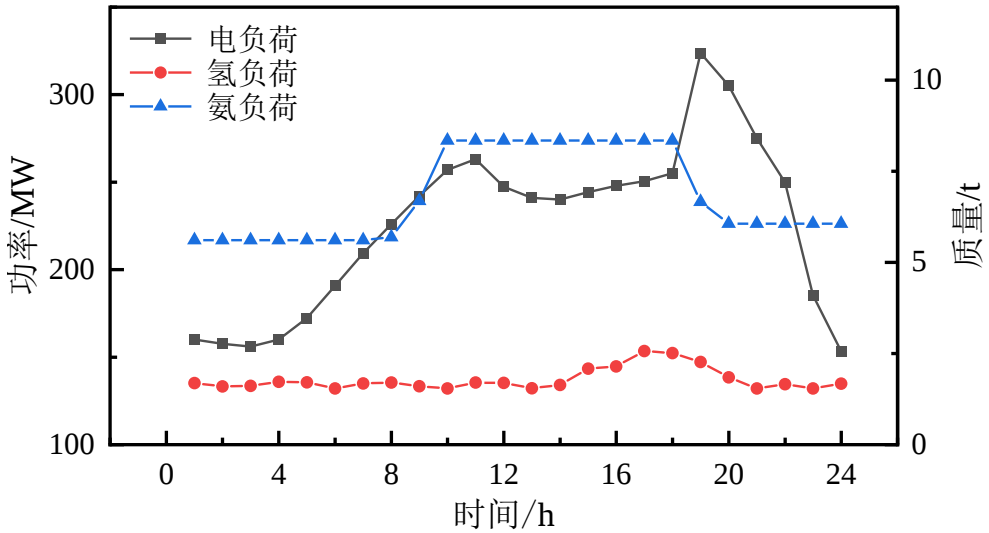


图 B1 电、氢、氨负荷预测曲线

Fig. B1 Load forecast curve of electric-hydrogen-ammonia

附录 C 1) 凸多面体不确定集建模

构建高维椭球集合 U_0 , 需求解椭球的集合参数 (Q^*, c^*) , 使得椭球集合为包含所有削减场景误差数据 $\{\omega_k\}_{k=1}^{N_d}$ 的最小体积椭球, 表达式如下:

$$U_0 = \{\omega | (\omega - c)^T Q (\omega - c) \leq \rho^2\} \quad (B1)$$

式中: ρ 为 $N_{re}T$ 维单位球体积的缩放因子; $Q \in S_{++}^{N_{re}T}$ 为正定矩阵, 描述椭球各轴向的偏差方向; $c \in \mathbf{R}^{N_{re}T}$ 为椭球中心点, 表征预测误差的系统性偏移。

构建 MVEE 原始优化模型的等价形式:

$$\min_{Q, c} \ln \det Q^{-1} \text{ s.t. } (\omega_k - c)^T Q (\omega_k - c) \leq \rho^2 \quad (B2)$$

式中: 目标函数表示最小化椭球体积, 由于其正比于 $\det Q^{-0.5}$, 且为保证其凸函数

性质,故构建了便于求解的等价形式。

引入拉格朗日乘子 λ_k ,构造对偶函数:

$$\mathcal{L}(\mathbf{Q}, \mathbf{c}, \lambda) = \ln \det \mathbf{Q}^{-1} + \sum_{k=1}^{N_d} \lambda_k ((\mathbf{w}_k - \mathbf{c})^T \mathbf{Q} (\mathbf{w}_k - \mathbf{c}) - \rho^2) \quad (\text{B3})$$

通过对偶化,原问题转化为:

$$\max_{\lambda_k \geq 0} \left\{ \ln \det \left(\sum_{k=1}^{N_d} \lambda_k (\mathbf{w}_k - \mathbf{c})(\mathbf{w}_k - \mathbf{c})^T \right) - \sum_{k=1}^{N_d} \lambda_k \ln \lambda_k \right\} \quad \text{s.t.} \quad \lambda_k \geq 0, \sum_{k=1}^{N_d} \lambda_k = 1 \quad (\text{B4})$$

对于上述最优化问题,采用如下算法进行迭代求解:

步骤1:初始化。设原始权重 $\lambda_k^{(0)} = 1/N_d$, $\mathbf{c}^{(0)} = \sum_{k=1}^{N_d} \mathbf{w}_k / N_d$, 初始迭代次数 $j=1$;

步骤2:在第 j 次迭代中,计算加权矩阵 $\mathbf{\Sigma}^{(j)} = \sum_{k=1}^{N_d} \lambda_k^{(j)} (\mathbf{w}_k - \mathbf{c}^{(j)})(\mathbf{w}_k - \mathbf{c}^{(j)})^T$;更新形状 $\mathbf{Q}^{(j)} = (\mathbf{\Sigma}^{(j)})^{-1}$;

步骤3:更新中心 $\mathbf{c}$ 。通过一阶最优性条件,得显式表达解: $\mathbf{c}^{(j+1)} = \sum_{k=1}^{N_d} \lambda_k^{(j)} \mathbf{w}_k / \sum_{k=1}^{N_d} \lambda_k^{(j)}$;

步骤4:更新权重。计算马氏距离并重新分配权重: $\lambda_k^{(j+1)} = (\mathbf{w}_k - \mathbf{c}^{(j)})^T \mathbf{Q}^{(j)} (\mathbf{w}_k - \mathbf{c}^{(j)}) / N_{\text{re}} T \rho^2$;

步骤5:判断迭代收敛条件。当权重变化量 $\|\lambda^{(j+1)} - \lambda^{(j)}\|_2 < \epsilon$ 时停止迭代,返回最优椭球参数并代入式(C1)即为构建的高维椭球;否则设 $j = j + 1$,返回步骤2。

由于目标函数在迭代中单调递减,且有下界,保证收敛至局部最优。本文取精度 $\epsilon = 10^{-6}$,置信水平 $\alpha = 0.95$,通过分位数校准取 $\rho^2 = \chi_{N_{\text{re}} T, 1-\alpha}^2$,以覆盖 $1-\alpha$ 概率的误差。基于求得的高维椭球不确定集,需要通过正交分解将其转化为标准轴向椭球。对正定矩阵 $\mathbf{Q}$ 进行特征值分解 $\mathbf{Q} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T$,获得正交矩阵 $\mathbf{V}$,其列向量为主轴方向;获得对角矩阵 $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_{N_{\text{re}} T})$,其中各个特征值表征各轴向的缩放系数。

定义线性变换 $\mathbf{z} = \mathbf{V}^T (\mathbf{w} - \mathbf{c})$,将原始椭球映射为标准球:

$$\mathbf{U}_1 = \{\mathbf{z} | \mathbf{z}^T \mathbf{\Lambda} \mathbf{z} \leq \rho^2\} \quad (\text{B5})$$

其顶点坐标可通过轴向截距确定:

$$\mathbf{z}_s^* = \pm \frac{\rho}{\sqrt{\lambda_s}} \mathbf{e}_s \quad (\text{B6})$$

式中: $\mathbf{e}_s$ 为第 s 个标准基向量。

由于原始凸多面体不足以涵盖所有的削减场景,因此需要引入缩放因子 θ 来扩展区域。通过逆变换 $\mathbf{w} = \mathbf{V} \mathbf{z} + \mathbf{c}$,缩放后的多面体的顶点坐标可以表示为:

$$\boldsymbol{\omega}_s^* = \mathbf{c} \pm \frac{\rho \cdot \theta}{\sqrt{\lambda_s}} \mathbf{v}_s \quad (\text{B7})$$

式中: $\mathbf{v}_s$ 为 $\mathbf{V}$ 的第 s 列, 对应主轴方向。

多面体共 N_s 个顶点, 记为 $\{\boldsymbol{\omega}_s^*\}_{s=1}^{N_s}$, 当 $\theta \geq 1$ 时, 适当增大 θ 可使多面体完全包含削减场景数据, 但求解的保守性会增加。本文使用文献[27]方法求解得到 θ 的取值, 最终得到凸多面体 $\mathbf{U}$ 如式 (21) 所示。

2) 风光出力预测误差场景置信集

构建风光出力预测误差场景置信集, 如式 (23) 所示。 p_s 满足如下的置信度:

$$\begin{cases} \Pr \left\{ \sum_{s=1}^{N_s} |p_s - p_s^0| \leq \theta_1 \right\} \geq 1 - 2N_s \cdot e^{-\frac{2N_s \theta_1}{N_s}} \\ \Pr \left\{ \max_{1 \leq s \leq N_s} |p_s - p_s^0| \leq \theta_\infty \right\} \geq 1 - 2N_s \cdot e^{-2N_s \theta_\infty} \end{cases} \quad (\text{B8})$$

式中: p_s^0 是场景 $\mathbf{P}_s$ 的初始概率分布值, 为最相近削减场景的概率值之和; 右侧分别为不确定性概率置信水平 α_1 和 α_∞ , 本文中均取值 0.95。则相应的公差值 θ_1 和 θ_∞ 可以通过以下方式获得:

$$\theta_1 = \frac{N_s}{2N_d} \ln \frac{2N_s}{1 - \alpha_1}, \quad \theta_\infty = \frac{1}{2N_d} \ln \frac{2N_s}{1 - \alpha_\infty} \quad (\text{B9})$$

引入辅助变量 u_s , 将 $\boldsymbol{\Gamma}$ 中的绝对值约束转化为易于求解的线性约束, 得到的置信集可表示为:

$$\boldsymbol{\Gamma} = \left\{ (p, u) \left| \begin{array}{l} \sum_{s=1}^{N_s} p_s = 1, p_s \geq 0 \\ p_s - p_s^0 \leq u_s, p_s^0 - p_s \leq u_s \\ \sum_{s=1}^{N_s} u_s \leq \theta_1, u_s \geq 0 \\ p_s^0 - \theta_\infty \leq p_s \leq p_s^0 + \theta_\infty \end{array} \right. \right\} \quad (\text{B10})$$

附录 D

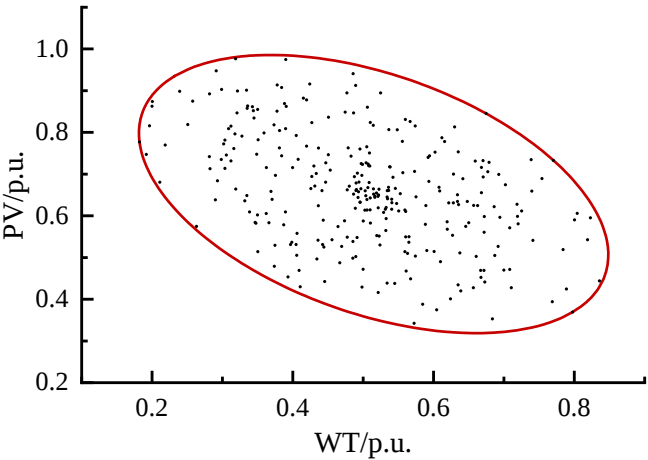
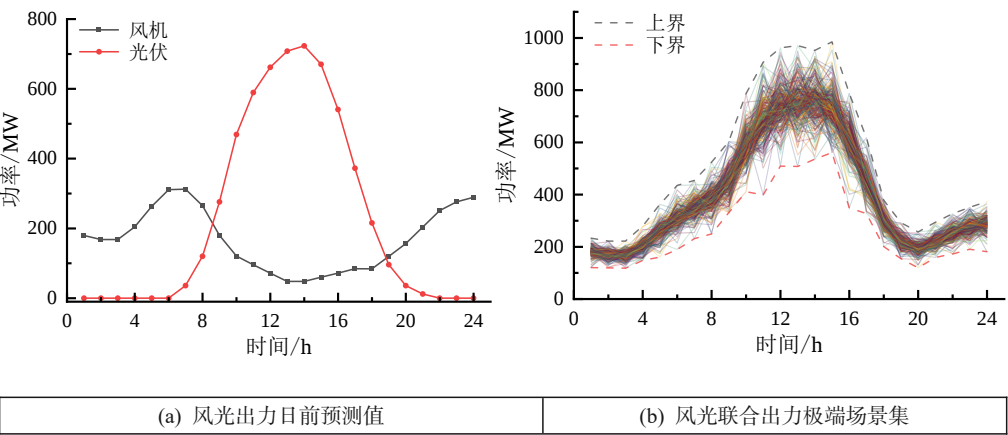


图 D1 风光预测场景及椭球不确定集

Fig. D1 Wind and solar forecasting scenarios and ellipsoidal uncertainty sets

(c) 椭球不确定集

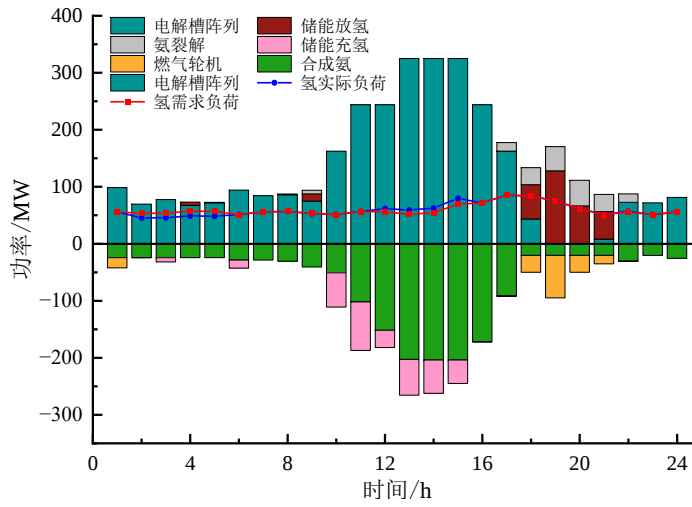


图 D2 方案一氢调度结果 (纵坐标为电能当量)

Fig. D2 Result of hydrogen energy optimization of scheme 1 (Y-axis: electric energy equivalent)

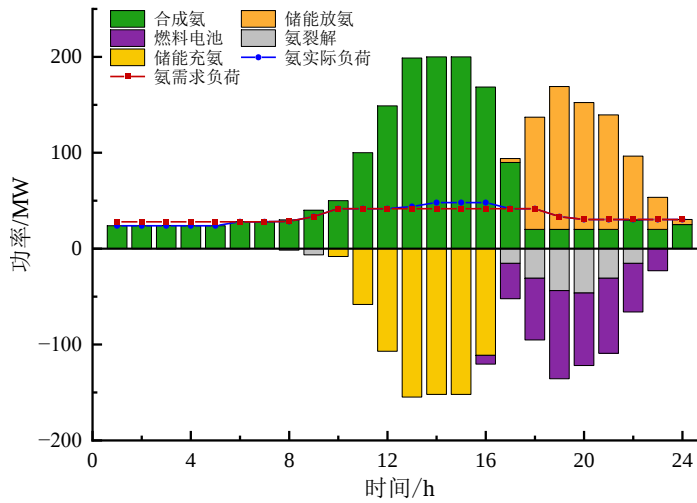
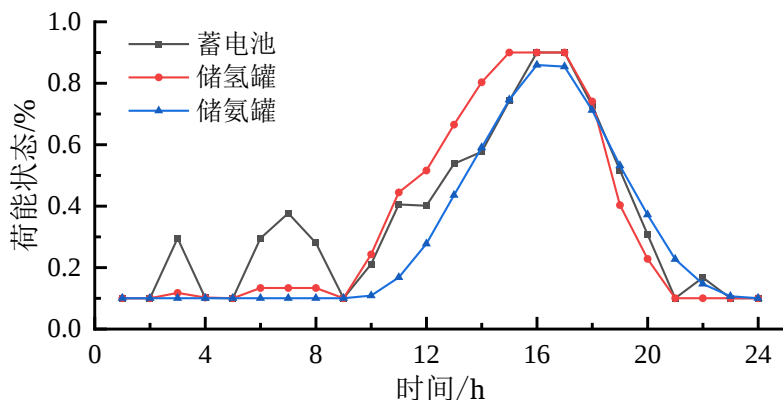


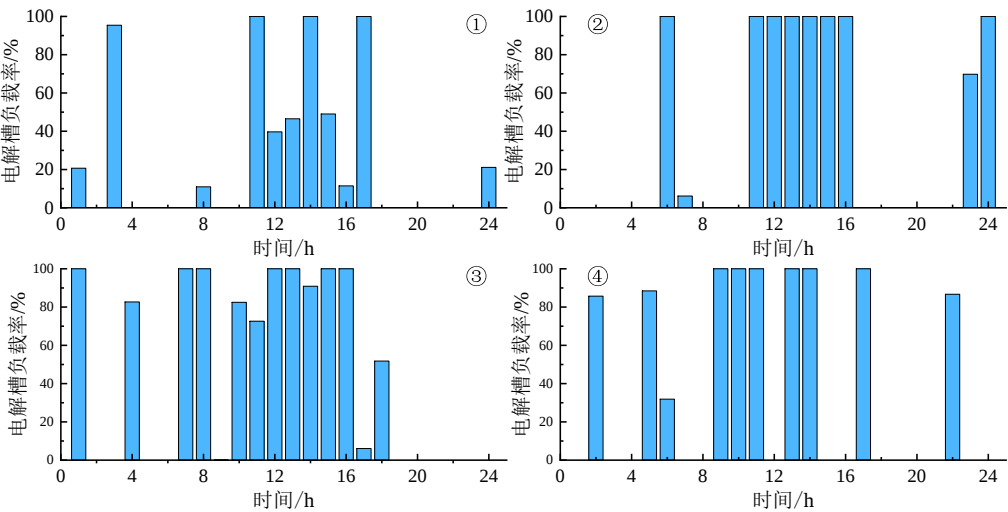
图 D3 方案一氨调度结果 (纵坐标为电能当量)

Fig. D3 Result of ammonia energy optimization of scheme 1 (Y-axis: electric energy equivalent)



图D4 方案一储能调度结果

Fig. D4 Result of energy storage optimization of scheme



图D5 方案五电解槽阵列运行负载

Fig. D5 Electrolyzer operating load of scheme 5