协调异质电解槽的公用事业级离网可再生能源电转氢系统频率安全感知生产调度

Jie Zhu[a, b], Yiwei Qiu[a, *], Yangjun Zeng[a], Shahab Dehghan[b], Sheng Wang[b], Shi Chen[a], Buxiang Zhou[a]

[a]四川大学电气工程学院，中国成都，*610065*[b]纽卡斯尔大学工程学院，英国泰恩河畔纽卡斯尔，*NE1 7RU*

arXiv:2603.03685v1 [math.OC] 4 Mar 2026

摘要

可再生能源制氢（ReP2H）能够实现大规模可再生能源利用，并通过氢基可再生氨和甲醇燃料，支持化工、海上运输等难减排行业的脱碳。因此，公用事业级可再生能源制氢项目正在全球范围内不断扩展。然而，离网可再生能源制氢系统具有变流器主导特性，因而惯量较低，使频率安全成为关键问题。尽管近期研究表明，电解槽能够参与频率调节（FR），但其支撑能力取决于运行状态和负载水平，因此氢气产量与频率安全之间存在权衡。为应对这一挑战，本文针对协调异质电解槽的公用事业级离网可再生能源制氢系统，构建了一个频率安全感知生产调度统一协同优化框架。本文建立了系统级频率响应模型，以刻画碱性水电解槽（AWEs）、质子交换膜电解槽（PEMELs）及其他资源提供的多阶段频率调节，其中其他资源包括共址化工厂改造后的氨燃料发电机、电池储能和风力涡轮机（WTs）。本文推导了分阶段暂态频率安全约束，将其改写为易于求解的形式，并纳入生产调度，从而在施加频率安全约束的同时，协调电解槽的启停切换和负荷分配，以便在可再生能源输入功率不确定的情况下最大化氢气产量。基于实际系统的案例研究表明，所提出的方法在维持相当氢气产量的同时，能够使热泵（HPs）分别替代风力涡轮机和AFG提供的55.52%和96.85%的频率调节备用。为期一年的仿真显示，由于对常规备用的依赖减少，年度净利润平均提高了28.96%。

关键词： 频率安全、频率备用、可再生能源制氢（ReP2H）、调度、电解槽

*通讯作者电子邮箱：ywqiu@scu.edu.cn (Yiwei Qiu)

符号说明

缩略语

AFG 氨燃料发电机 AWE 碱性水电解槽 BES 电池储能系统 COI 惯性中心 DRCC 分布鲁棒机会约束 EDL 电双层 EL 电解槽 FC 频率约束 FSPS 频率支撑型生产调度 GFM 构网型 HP 制氢厂 PEMEL 质子交换膜电解槽 PV 光伏 PFR 一次调频 ReP2H 可再生能源制氢 RoCoF 频率变化率 VI 虚拟惯量 WT 风力涡轮机

索引

t 调度时间间隔的索引$b/e/g/w$ BES/EL/AFG/WT的索引 $i/j/ij$ 母线以及母线之间支路的索引 i 和$j\mathcal{F}(i)$ DistFlow模型中母线 i 的父节点集合$\varsigma(i)$ DistFlow模型中母线 i 的子节点集合

变量

Δf 惯量中心频率偏差$\Delta f_{b/e/g}$ BES/HP/AFG母线处的频率偏差h_e^{cool}电解槽的冷却热量I_e 电解槽的电解电流$P_e^{\mathrm{auxi/sb}}$电解槽的辅助设备/待机功率P_c^{comp}氢气压缩机功率P_e^{cool}电解槽冷却器功率P_e^{pump}电解槽泵功率$P_{b/g/w/s}$ BES/AFG/风力涡轮机/光伏电站的功率 $P_{e/d}$ 电解槽/下游化工负荷的功率$P_{b\,t}^{\mathrm{C/D}}$,BES的充放电功率~ ˆ$P_w/P_{w/s}$ 风力涡轮机/光伏电站的可用功率/预测功率 $\Delta P_{g/w/b/e}^{\mathrm{PFR}}$ PFR功率ΔP_{dis} 扰动功率$q_e^{\mathrm{H_2}}$产氢流量 $R_{g/w/b/e}^{\mathrm{PFR}}$ 一次调频备用$R_{g/w/b/e}^{+/-}$ 上/下调备用E_b 荷电状态T_e 电解槽运行温度T_e^{cool}电解槽冷却系统温度x_b^{C}BES的充电状态$x_e^{\mathrm{st/sb/sp}}$电解槽启动/待机/停机状态x_g^{st}AFG的启动状态z^{up}, $^{\mathrm{c/up\ h}}$,电解槽热/冷启动运行$z_g^{\mathrm{up/down}}$AFG启动/停机运行 $^{e}_{z}{}_{e}^{\mathrm{down}}$ 电解槽停机运行$\xi_{w/s}$ 风力涡轮机/光伏电站的预测误差

参数

a_e^{cool}温度到热量的Swatch因子$c_e^{\mathrm{H_2}}$ 绿氢价格$c_g^{\mathrm{NH_3}}$ AFG的发电成本$c_{e/g}^{\mathrm{up/down}}$ 电解槽/AFG的启动/停机成本D_d 频率相关负荷的阻尼率$D_{g/b}$ AFG/电池储能系统提供的阻尼/虚拟阻尼$\Delta f_{\mathrm{db1/db2}}$ 频率死区1/2$\Delta f_{\mathrm{nadir}}^{\mathrm{lim}}$ 频率偏差最低点限值 $\Delta f_{\mathrm{qss}}^{\mathrm{lim}}$ 准稳态频率偏差限值$\Delta f_{\mathrm{RoCoF}}^{\mathrm{lim}}$ 频率变化率限值 H_g AFG的惯性常数$H_{b/e}$ 电池储能系统/电解槽提供的虚拟惯量I_e/I_e 电解槽的电流限值K_w^{deload} 风力涡轮机的降载系数n_{c} 电堆中的电池数量$P_{e/g}/P_{e/g}$电解槽/AFG的功率限值P_{ij}/P_{ij}支路功率限值 ij

$P^{\mathrm{C/D},\ b}{}^{\lim}$ 电池储能系统的充放电功率限值$q_c^{\lim},\ t$ 压缩机流量限值$r_g^{\mathrm{u/d}}$ AFG的上/下爬坡限值R_e^{ohm} 电解槽的欧姆电阻$R^{+/-},\ g}{}^{\lim}$AFG的上/下调节备用限值 $R^{\mathrm{PFR},\ g}{}^{\lim}$AFG的一次调频备用限值$t_{b/e/g/w}$ 电池储能系统/电解槽/AFG/风力涡轮机的一次调频响应时间$t_{\mathrm{DB1/DB2}}$ 达到频率死区1/2所需时间$T_g^{\mathrm{on/off}}$启停持续时间限值

	AFG
$\overline{T}_e/\underline{T}_e$	电解槽运行温度限值
$V^{\mathrm{re/tn}}$	电解槽单元的反向/热中性电压
$LHV_{\mathrm{NH_3}}$	氨的低位发热量
$LHV_{\mathrm{H_2}}$	氢气的低位发热量
$\rho_{w/r}$	机会约束的违约概率
$\eta_e^{\mathrm{pump/cool}}$	泵效率 / 冷却系统
$\eta_g^{\mathrm{comb/steam}}$	燃烧效率/蒸汽轮机效率
η_b^{BES}	电池储能系统的充放电效率

1. 引言

1.1. 背景与动机

在脱碳目标的推动下，将当地风能和太阳能发电与氢气生产相结合的可再生能源制氢系统已成为难以减排的化工和海事行业实现低碳转型的重要途径 [1]。国际可再生能源机构 预计，到2050年，全球电解槽容量将达到500 GW，届时66%的氢气将通过可再生能源驱动的电解生产 [2]。在可再生能源资源丰富但缺乏电网接入的地区（例如沙漠和高原），公用事业级离网可再生能源制氢系统正逐渐兴起，用于生产氢气及其下游绿色燃料（例如氨和甲醇） [3–5]。中国松原和大安 [6, 7], 以及澳大利亚 [8], 、欧洲 [9], 等许多地区的试点项目已投入运行。

然而，变流器主导特性以及缺乏外部电网支撑，使离网可再生电力制氢系统极易受到暂态频率不稳定的影响 [10], ，这不仅可能扰乱变压器和变流器之间的电力传输，还可能通过旋转压缩机和泵危及共址化工厂的化学过程。尽管构网型控制提供了一种颇具前景的解决方案 [3], ，但构网型可再生能源发电和电池储能（BES）在工业领域的部署仍然有限 [11]。此外，单靠构网型电池储能提供频率支撑，可能会加速退化并降低生命周期性能 [3]。作为一种切实可行的替代方案，新型系统设计将共址化工厂的辅助发电机改造为氨燃料发电机（AFG） [12, 13]。它们既能提供旋转惯量和一次调频（PFR），也可作为氢能下游关键化学过程的备用电源。

为在可再生能源波动或电解槽停运等扰动下维持频率安全，可采用频率约束（FC）调度方法，在离网可再生电力制氢系统中调度 AFG [14–16]。这些方法将事故后的频率指标（如频率最低点、频率变化率（RoCoF）和准稳态频率）转化为对惯量和备用容量的约束。例如，Chu 等人 [14] 根据摆动方程推导出惯性中心（COI）频率的最低点和频率变化率，并将其作为安全约束纳入微电网调度。后续研究将风力涡轮机（WT）和电池储能系统纳入这一框架，以提供虚拟惯量（VI）和一次调频 [15], ，并探讨了构网型电池储能以提升性能的作用 [16]。这些研究证实，风力涡轮机和电池储能系统能够缓解频率偏差，并减轻发电机的调节负担。然而，氢能电站（HP）的频率支撑潜力尚未得到探索。

公用事业规模的热泵由多个在不同负载下运行的电解槽组成，因此能够自然地提供向上和向下备用 [17]。使热泵参与频率调节，有助于进一步减少对常规备用的依赖并降低运行成本。然而，热泵参与频率调节会改变系统动态特性，其频率支撑能力取决于运行状态和负载水平，

表1：氢能电站频率支撑现有研究的总结与比较。

文献	频率支撑来自热泵	氢能电站模型	频率支撑类型			频率模型			耦合HP调度	不确定性
			惯量	阻尼	PFR	GFM	分阶段频率调节[2]	分阶段安全约束[3]		
Chu 等人 [14, 15]	×	–	✓	✓	✓	×	×	×	×	✓
Cui 等人 [16]	×	–	✓	✓	✓	✓	×	×	×	✓
Hossain 等人 [21]	✓	单一PEMEL	×	×	✓	×	×	×	×	×
Dozein 等人 [22]	✓	单一AWE	×	×	✓	×	×	×	×	×
Dozein 等人 [23]	✓	单一PEMEL	✓	✓	×	×	×	×	×	×
Huang 等人 [24]	✓	多重AWE	×	×	✓	×	×	×	×	×
Guan 等人 [25]	✓	多重AWE	×	×	✓	×	×	×	×	×
Cheng 等人 [26]	✓	聚合EL[1]	×	×	✓	×	×	×	×	×
Wu 等人 [27]	✓	聚合EL	✓	×	✓	×	✓	×	×	×
Li 等人 [28]	✓	聚合EL	✓	×	✓	×	✓	×	×	✓
Li 等人 [29]	✓	聚合EL	✓	✓	✓	×	✓	×	×	✓
本研究	✓	**多个碱性水电解槽和质子交换膜电解槽**	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

[1]电解槽； [2]显式建模分阶段频率调节，即资源在不同死区和时间延迟下的响应。[3]频率安全约束捕捉分阶段频率调节策略的影响（例如，最低点在不同阶段出现）。

从而在氢气生产与频率安全之间形成权衡。

为在最大限度提高氢气产量的同时满足暂态频率安全约束，本文针对离网可再生电力制氢系统建立了频率动态模型，推导了分阶段暂态频率安全约束，并提出一种频率支撑型生产调度（FSPS）方法，以确保离网可再生电力制氢系统中的热泵提供可靠的频率支撑。相关文献综述见第1.2节，第1.3节概述了本研究的主要贡献。

1.2. 文献综述

实验研究表明，碱性水电解槽（AWEs）和质子交换膜电解槽（PEMELs）能够实现秒级（0.1–4 s）的负荷爬坡 [18–20]。因此，它们在电网频率调节方面的潜力日益受到关注。表1总结了近期的相关研究。

例如，Hossain 等人 [21] 设计了频率控制器，并证明 PEMEL 可快速提供一次调频。Dozein 等人 [22, 23] 提出了控制方案，使 PEMEL 能够同时提供一次调频和虚拟惯量响应。Huang 等人 [24] 开发了一种控制器，使碱性水电解槽能够参与一次调频。Guan 等人 [25] 进一步研究了碱性水电解槽频率控制的参数整定。Cheng 等人 [26] 协调电解槽和风力涡轮机，为公共电网提供频率支撑，并参与频率调节市场。Wu 等人 [27] 和 Li 等人 [28, 29] 将基于电解槽的惯量和一次调频纳入大电力系统的燃料电池调度。

尽管取得了这些进展，现有方法并不直接适用于公用事业级离网可再生能源制氢系统，具体局限如下：

首先，离网可再生能源制氢系统可能集成异构资源，包括碱性水电解槽、质子交换膜电解槽、电池储能系统、风力涡轮机和AFG，它们各自具有不同的动态特性。这些资源在扰动下的协调响应会导致复杂的频率行为。许多现有模型假设电解槽能够瞬时提供一次调频 [29] ，或忽略负荷阻尼效应 [27], ，这限制了它们在对扰动极为敏感的离网可再生能源制氢系统中的准确性和适用性。目前仍缺乏一种经过改进且易于处理的频率动态模型，能够刻画不同资源的分阶段调节。

其次，大多数燃料电池调度研究都将制氢工厂建模为单个聚合电解槽，并假设其在整个调度时域内具有固定的虚拟惯量和一次调频能力 [26–29]。这种简化既忽略了大型多电解槽制氢工厂中不同类型电解槽频率调节能力的差异，也忽略了生产调度（即开关机和负荷分配）对制氢工厂频率支撑性能的影响。

具体而言，热泵可能同时包含碱性水电解槽和质子交换膜电解槽 [30]。由于电化学动力学较慢且电双层效应更强，碱性水电解槽的功率响应速度低于质子交换膜电解槽 [31, 32]。相比之下，质子交换膜电解槽能够提供更快速、更灵活的调节，但容量较小 [18, 20]。因此，将整个电厂视为单一聚合单元，会对其实际能力产生误估。

此外，大型热泵中的电解槽采用轮换规则 [33, 34] 或基于优化的策略 [35, 36] 进行调度，以最大限度地提高可再生能源利用率和氢气产量。可用的虚拟惯量和一次调频备用会随各电解槽的开关状态和负载水平而变化。由于生产效率取决于负载水平和温度等运行条件 [36], ，确保频率安全需要在氢气产量与备用提供之间取得平衡。据我们所知，迄今鲜有研究在电厂级生产调度中联合建模碱性水电解槽与质子交换膜电解槽所提供的差异化频率支撑。

1.3. 贡献

为弥补上述不足，本文提出了一种适用于公用事业级离网可再生能源制氢系统的频率控制生产调度框架。该方法对离网网络运行和多电解槽氢气生产调度进行联合优化，使部分负载碱性水电解槽和质子交换膜电解槽能够根据分配的备用容量及快速响应能力，提供可靠的频率支撑。这种支撑在维持氢气产量所带来的盈利能力和暂态频率安全的同时，部分替代了来自传统 AFG 和可再生能源机组的备用容量。主要贡献如下：

1. 我们构建了一个详细的热泵频率响应模型，考虑了碱性水电解槽和质子交换膜电解槽不同的频率支撑能力，并为离网

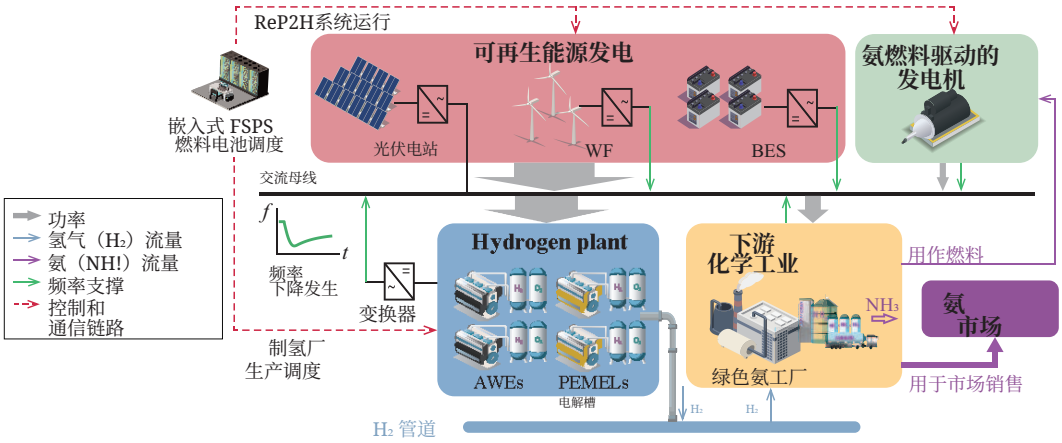

图1：典型离网可再生电力制氢系统示意图。

可再生电力制氢系统建立了多阶段频率动态模型。基于该模型，我们推导出分阶段暂态频率安全约束，并证明这些约束可以以可接受的精度纳入调度。

2. 我们提出一种频率支撑型生产调度（FSPS）方法，综合考虑碱性水电解槽和质子交换膜电解槽提供的虚拟惯量和一次调频，以及它们的非线性效率和热特性。该方法协调氢气生产与备用分配，在确保提供充足频率支撑的同时，最大化氢气生产收益。

3. 我们将频率支撑型生产调度（FSPS）纳入离网可再生电力制氢系统的燃料电池调度框架，并构建联合优化模型。该模型刻画厂级备用提供与系统级运行成本之间的相互作用，在满足暂态频率安全约束的同时最大化净利润。为期一年的仿真表明，所提方法使年度净利润平均提高28.96%，这得益于调频成本的降低，同时氢气产量保持在相当水平。

本文其余部分安排如下：第2节介绍频率响应模型。第3节推导系统频率动态和安全约束。第4节介绍嵌入FSPS的FC调度模型。第5节报告案例研究，第6节总结全文。

2. 建模　　可再生电力制氢系统中异构调节资源的频率响应

典型的离网可再生电力制氢系统如图1所示。在该系统中，热泵是主要电力负荷，并将大部分可再生电力转化为氢气用于氨合成。所产氨的大部分出口至市场，以供应化工和航运业，其余部分则作为AFG的燃料。由于发电侧与电解负荷均通过电力电子变流器接入，系统物理惯量较低，因此在频率安全方面对扰动较为敏感。

尽管可再生能源逆变器、电池储能、电解槽和AFG等资源能够提供频率调节，但其响应存在显著差异。AFG依赖转子惯量和调速器动态，而可再生能源机组、电池和电解槽则通过变流器控制进行响应。本节刻画异构资源的动态频率支撑能力，并制定协调调节策略。

为便于说明，令 $\mathcal{A}$、$\mathcal{P}$、$\mathcal{E}$、$\mathcal{B}$、$\mathcal{W}$、$\mathcal{G}$分别表示碱性水电解槽、质子交换膜电解槽、所有电解槽、电池储能系统、风力涡轮机和 AFG 的集合，其中 $\mathcal{E} = \mathcal{A} \cup \mathcal{P}$。

2.1. 热泵提供的频率支撑

碱性水电解槽和质子交换膜电解槽是主要的工业电解槽。给定电解电流 I，碱性水电解槽和质子交换膜电解槽的氢气产率和电堆功率可表示为 [36, 37]:

$$q_e^{\mathrm{H_2}} = \frac{\eta_{\mathrm{F}}(I,T) n_{\mathrm{c}} I M^{\mathrm{H_2}}}{2F}, \tag{1}$$

$$P_e^{\mathrm{stack}}(I,T) = I V^{\mathrm{stack}}(I,T), \tag{2}$$

其中， $M^{\mathrm{H_2}}$ 为氢气摩尔质量； $\eta_{\mathrm{F}}(\cdot) = (I/A)^2/(f_1 + (I/A)^2) \times f_2$ 为法拉第效率，其中 $f_1 = 2.5T + 50$, $f_2 = 1 - 6.25 \times 10^{-6} T$； $F = 96485.3\,\mathrm{C/mol}$ 为法拉第常数。关于η_{F} 和 V^{stack}的详细表达式，请参阅我们此前的工作 [19, 37]。

如图 2(a) 所示，电解槽通过响应本地测得的频率信号来调节负荷，从而提供频率支撑。由于热动态特性以小时为时间尺度演变，因此在秒级频率分析中予以忽略。图 2(b) 中适用于碱性水电解槽和质子交换膜电解槽的等效电路能够捕捉主要的短期电气动态特性，并已通过实验验证 [20, 38, 39], ；该电路通过 C_e^{dl}、R_e^1 和 R_e^2 表征电双层效应。根据图 2(b)，电流为 I（τ）时，电堆功率关于瞬态时间 τ 的表达式为:

$$P_e^{\mathrm{stack}}\big(I(\tau)\big) = n_{\mathrm{c}} V_e^{\mathrm{stack}}\big(I(\tau)\big) I(\tau), \tag{3}$$

$$V_e^{\mathrm{stack}}(I(\tau)) = V_e^{\mathrm{re}} + V_e^{\mathrm{dl}}(\tau) + R_e^{\mathrm{ohm}} I(\tau), \tag{4}$$

$$C_e^{\mathrm{dl}} \frac{\mathrm{d}V_e^{\mathrm{dl}}(\tau)}{\mathrm{d}\tau} = I(\tau) - V_e^{\mathrm{dl}}(\tau)/(R_e^1 + R_e^2). \tag{5}$$

工业规模的电解槽通常在其整流器中采用电流跟随控制 [20]。在 $t = 0$ 时，电流参考信号发生阶跃变化；若 $I(0) = I$ 且 $I(\infty) = I + \Delta I$，并假设整流器电流能够理想跟踪，则电解堆的功率响应可由式 (3)–(5) 推导为:

$$\Delta P_e^{\mathrm{stack}}(\tau) = n_{\mathrm{c}} \Delta I [V_e^{\mathrm{re}} + \Delta I (R_e^1 + R_e^2) + \Delta I R_e^{\mathrm{ohm}}] + n_{\mathrm{c}} \Delta I [V_e^{\mathrm{dl}}(0) - \Delta I (R_e^1 + R_e^2)] e^{(-\tau/\theta)}, \tag{6}$$

其中， $\theta = (R_e^1 + R_e^2) C_e^{\mathrm{dl}}$为与电双层效应相关的时间常数。由于使用液态电解质且电流密度较低，AWE通常具有较大的C_e^{dl}，因此响应速度比PEMEL慢 [20]。

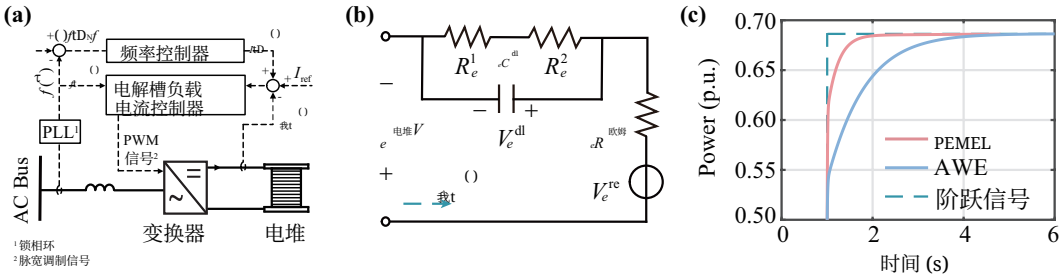

图2：电解槽的频率控制和动态负载响应。(a) 频率控制图。(b) 电解堆的等效电路。(c) AWE 和 PEMEL 的阶跃响应。

图2(c)展示了根据 [3, 20]中的参数仿真的额定功率5 MW的AWE和PEMEL的负荷阶跃响应。AWE负荷功率达到参考值的50%和95%所需的上升时间分别约为1 s和2.8 s，而质子交换膜电解槽仅需0.04 s和0.55 s。在频率调节过程中，必须在频率偏差达到死区时间 t_{DB} 之前提供惯性响应功率，以限制频率变化率。在大型电力系统中， $t_{\mathrm{DB}} \approx 0.5$ s [40], ；而在离网可再生电力制氢系统等低惯量微电网中， $t_{\mathrm{DB}} < 0.5$ s。因此，只有质子交换膜电解槽能够提供有效的虚拟惯量支持，并可通过匹配最大频率变化率约束来建模等效惯量，如下所示：

$$H_e = \frac{P_e^{\mathrm{stack}}(t_{\mathrm{db}}) - P_e^{\mathrm{stack}}(0)}{\Delta f_{\mathrm{RoCoF}}^{\mathrm{lim}}} / f_0 = \frac{\Delta P_e^{\mathrm{VI}}}{\Delta f_{\mathrm{RoCoF}}^{\mathrm{lim}} f_0}, \tag{7}$$

其中， ΔP_e^{VI}表示在最大电流爬升条件下 PEMEL 的惯性响应功率。相比之下，由于动态较慢，AWE 主要提供一次调频。HP 中电解槽的总体频率响应如下：

$$\Delta P_{\mathrm{HP}}^{\mathrm{stack}}(\tau) = \sum_{e \in \mathcal{P}} \Delta P_e^{\mathrm{VI}}(\tau) + \sum_{e \in \mathcal{A}} \Delta P_e^{\mathrm{PFR}}(\tau). \tag{8}$$

HP 中辅助设备（如氢气压缩机）的负荷功率也表现出频率相关性，因此，HP 的总体频率响应可表示为：

$$\Delta P_{\mathrm{HP}}(\tau) = \Delta P_{\mathrm{HP}}^{\mathrm{stack}}(\tau) + \sum_{e \in \mathcal{E}} \Delta P_e^{\mathrm{auxi}}(\tau) + \sum_{c \in \mathcal{C}} \Delta P_c^{\mathrm{comp}}(\tau), \tag{9}$$

其中， $\mathcal{C}$ 表示氢气压缩机的集合，并且

$$\{\Delta P_e^{\mathrm{auxi}}(\tau), \Delta P_c^{\mathrm{comp}}(\tau)\} = D_d \Delta f_e(\tau) \{P_e^{\mathrm{auxi}}, P_c^{\mathrm{comp}}\}. \tag{10}$$

请注意，每台电解槽可提供的频率备用取决于其计划运行点。由于电堆效率 $\eta^{\mathrm{stack}} = (q_e^{\mathrm{H_2}} LHV_{\mathrm{H_2}}) / P_e^{\mathrm{stack}}(I, T)$ 随电流负荷 I和温度T变化，如图 3 所示，因此电解槽的调度会尽量使其运行在高效率区域 [17]。这些调度结果（包括每台电解槽的开关状态和负荷水平）直接决定氢气产量以及可提供的虚拟惯量和一次调频备用。因此，生产调度会直接影响频率支撑能力，因而需要在氢气产量与备用提供之间取得平衡。

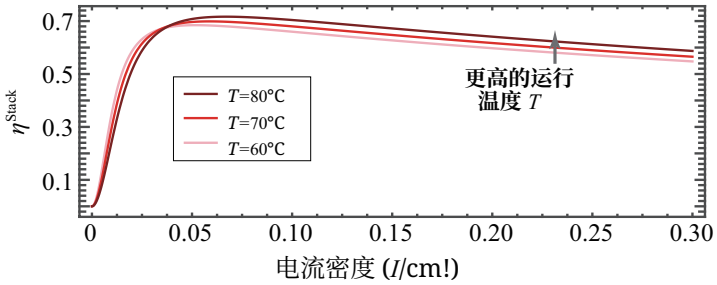

图3：不同电流密度和温度下的AWE电堆效率。

2.2. AFG、电池储能系统和下游化工厂提供的频率支撑

2.2.1. 氨燃料发电机（*AFG*）

在频率扰动下，AFG可通过转子和调速器动态提供惯量、阻尼和一次调频 [14]。其频率响应模型如下：

$$\Delta P_g(\tau) = -2H_g \frac{\mathrm{d}\Delta f_g(\tau)}{\mathrm{d}\tau} - D_g \Delta f_g(\tau) + \Delta P_g^{\mathrm{PFR}}(\tau). \tag{11}$$

2.2.2. 风力涡轮机（*WT*）

WT可在减载模式下运行，以形成备用裕度，并释放备用功率，从而响应频率偏差提供一次调频。其响应模型如下：

$$\tilde{P}_w^{\mathrm{avail}} = (1-k_w^{\mathrm{deload}})\tilde{P}_w = (1-k_w^{\mathrm{deload}})(\hat{P}_w + \xi_w), \tag{12}$$

$$\Delta P_w^{\mathrm{PFR}}(\tau) \le \Delta P_w^{\mathrm{deload}} = k_w^{\mathrm{deload}} \tilde{P}_w = k_w^{\mathrm{deload}} \hat{P}_w + \xi_w^{'}. \tag{13}$$

然而，WT的一次调频能力受不确定的预测误差 ξ_w 影响，后文第4.3节将介绍一种不确定性感知工具来处理这一问题。

2.2.3. 电池储能（*BES*）

在离网可再生能源制氢系统中，电池储能系统可通过频率下垂控制和构网型控制提供频率支撑 [3, 10]。前者使电池储能系统能够提供一次调频，后者则使其能够模拟发电机的转子摆动动态，从而主动提供虚拟惯量和虚拟阻尼支撑。因此，电池储能系统的频率响应建模如下：

$$\Delta P_b(\tau) = \Delta P_b^{\mathrm{PFR}}(\tau) + \Delta P_b^{\mathrm{GFM}}(\tau), = \Delta P_b^{\mathrm{PFR}}(\tau) - \left[2H_b \frac{\mathrm{d}\Delta f_b(\tau)}{\mathrm{d}\tau} + D_b \Delta f_b(\tau)\right]. \tag{14}$$

2.2.4. 下游化工厂

下游氨厂的频率响应源于大容量电力驱动装置的频率相关特性，包括合成气压缩机和泵 [4, 41]。该响应可近似表示为：

$$\Delta P_d(\tau) = D_d \Delta f(\tau) P_d. \tag{15}$$

2.3. 多阶段频率调节策略

惯性响应是瞬时的，而一次调频则通过设置不同的死区来实现分阶段参与 [40]。为优先调用快速资源，我们为热泵和电池储能系统设置的死区小于风力涡轮机和AFG。该设计可增强早期频率遏制能力，并降低响应较慢机组的备用需求，从而满足可再生电力制氢系统的经济性要求。在此策略下，系统总的一次调频由以下部分组成:

$$\Delta P_b^{\mathrm{PFR}} = \begin{cases} 0, & \tau \le t_{\mathrm{DB1}}, \\ R_b^{\mathrm{PFR}}(\tau - t_{\mathrm{DB1}})/t_b, & t_{\mathrm{DB1}} < \tau \le t_b + t_{\mathrm{DB1}}, \\ R_b^{\mathrm{PFR}}, & \tau > t_b + t_{\mathrm{DB1}}, \end{cases} \tag{16}$$

$$\Delta P_e^{\mathrm{PFR}} = \begin{cases} 0, & \tau \le t_{\mathrm{DB1}}, \\ R_e^{\mathrm{PFR}}(\tau - t_{\mathrm{DB1}})/t_e, & t_{\mathrm{DB1}} < \tau \le t_e + t_{\mathrm{DB1}}, \\ R_e^{\mathrm{PFR}}, & \tau > t_e + t_{\mathrm{DB1}}, \end{cases} \tag{17}$$

$$\Delta P_w^{\mathrm{PFR}} = \begin{cases} 0, & \tau \le t_{\mathrm{DB2}}, \\ R_w^{\mathrm{PFR}}(\tau - t_{\mathrm{DB2}})/t_w, & t_{\mathrm{DB2}} < \tau \le t_w + t_{\mathrm{DB2}}, \\ R_w^{\mathrm{PFR}}, & \tau > t_w + t_{\mathrm{DB2}}, \end{cases} \tag{18}$$

$$\Delta P_g^{\mathrm{PFR}} = \begin{cases} 0, & \tau \le t_{\mathrm{DB2}}, \\ R_g^{\mathrm{PFR}}(\tau - t_{\mathrm{DB2}})/t_g, & t_{\mathrm{DB2}} < \tau \le t_g + t_{\mathrm{DB2}}, \\ R_g^{\mathrm{PFR}}, & \tau > t_g + t_{\mathrm{DB2}}, \end{cases} \tag{19}$$

其中， $t_e > t_b >$ （$t_{\mathrm{DB2}} - t_{\mathrm{DB1}}$）和 $t_g > t_w$。式（16）–（19）中的一次调频模型基于以下假设：事故后初期的频率偏差与时间近似呈线性关系，这一点已得到既有研究 [14–16, 27]的验证。这些模型中的资源特定一次调频响应时间 $\{t_b, t_e, t_w, t_g\}$ 能够较好地保留异质资源各自的频率响应特性，而专门设计的多阶段频率调节则通过死区阈值 t_{DB1} 和 t_{DB2}加以体现。

3. 频率动态与安全指标建模

3.1. 扰动下的分阶段频率动态

基于第 2 节建立的频率响应模型和分阶段调节策略，本节为离网可再生电力制氢系统建立统一的频率动态模型，并推导暂态频率安全指标的解析表达式。我们进一步证明，在工程上可接受的精度范围内，这些指标可重构为易于处理的约束，并嵌入可再生能源制氢调度问题中。

我们首先刻画系统对事故诱发的功率扰动的频率响应。当发生扰动 ΔP_{dis} 时，离网可再生电力制氢系统中的频率偏差会触发 AFG、风力涡轮机、电池储能系统、热泵和下游化工厂的协同响应。暂态过程中的功率平衡满足：

$$\sum_{g\in\mathcal{G}}\Delta P_g(\tau)+\sum_{w\in\mathcal{W}}\Delta P_w(\tau)+\sum_{b\in\mathcal{B}}\Delta P_b(\tau)+\Delta P_{\mathrm{HP}}(\tau)+\Delta P_d(\tau)=\Delta P_{\mathrm{dis}}, \tag{20}$$

其中，正的 ΔP_{dis} 表示发电功率损失或负荷增加。将 (11)–(15) 和 (16)–(19) 代入 (20)，可得不同一次调频阶段的频率动态：

$$2H\frac{\mathrm{d}\Delta f(\tau)}{\mathrm{d}\tau}+D\Delta f(\tau)= \tag{21}$$

$$\begin{cases} -\Delta P_{\mathrm{dis}},\ \tau<t_{\mathrm{DB1}}, \\ -\Delta P_{\mathrm{dis}}+\sum\limits_{e\in\mathcal{A}}R_e^{\mathrm{PFR}}\dfrac{\tau-t_{\mathrm{DB1}}}{t_e}+\sum\limits_{b\in\mathcal{B}}R_b^{\mathrm{PFR}}\dfrac{\tau-t_{\mathrm{DB1}}}{t_b},\ t_{\mathrm{DB1}}\le\tau<t_{\mathrm{DB2}}, \\ -\Delta P_{\mathrm{dis}}+\sum\limits_{e\in\mathcal{A}}R_e^{\mathrm{PFR}}\dfrac{\tau-t_{\mathrm{DB2}}}{t_e}+\sum\limits_{b\in\mathcal{B}}R_b^{\mathrm{PFR}}\dfrac{\tau-t_{\mathrm{DB2}}}{t_b}+\sum\limits_{g\in\mathcal{G}}R_g^{\mathrm{PFR}}\dfrac{\tau-t_{\mathrm{DB2}}}{t_g}+\sum\limits_{w\in\mathcal{W}}R_w^{\mathrm{PFR}}\dfrac{\tau-t_{\mathrm{DB2}}}{t_w},\ \tau\ge t_{\mathrm{DB2}}. \end{cases}$$

其中，系统惯量定义为

$$H=\sum_{b\in\mathcal{B}}H_b+\sum_{e\in\mathcal{P}}x_e^{\mathrm{st}}H_e+\frac{\sum_{g\in\mathcal{G}}x_g^{\mathrm{st}}H_g\overline{P}_g}{f_{\mathrm{N}}}, \tag{22}$$

其中，f_{N} 为额定频率；$\Delta f(\tau)$ 为惯性中心频率，表示为

$$\Delta f(\tau)=\frac{1}{H}\Big[\sum_{b\in\mathcal{B}}H_b\Delta f_b(\tau)+\sum_{e\in\mathcal{P}}x_e^{\mathrm{st}}H_e\Delta f_e(\tau)+\frac{\sum_{g\in\mathcal{G}}x_g^{\mathrm{st}}H_g\overline{P}_g}{f_{\mathrm{N}}}\Delta f_g(\tau)\Big]; \tag{23}$$

由于离网可再生电力制氢系统中发电侧与负荷侧之间的距离通常较短，[3, 7, 37]，各母线的频率偏差紧密分布在惯性中心频率 [42, 43] 附近。因此，在推导频率安全约束时，采用惯性中心频率来表示系统整体的频率动态；D 为系统级阻尼系数，表示为 $D=D_dP_d+D_b$。

图 4 对比了由式（21）得到的事故后频率动态和一次调频功率响应，以及基于 [3, 20] 开发的电磁暂态（EMT）仿真基准结果。可以看出，所提模型在最大频率变化率、准稳态频率偏差和频率最低点方面与基准结果高度吻合。图 4(b) 和 (c) 所示的碱性水电解槽和 AFG 的一次调频功率响应表明，一次调频近似模型（16）–（19）能够有效捕捉频率控制回路中的饱和效应和死区引起的时间延迟。这些结果表明，所提模型（21）能够令人满意地估计事故后频率动态。同时，对频率最低点和一次调频功率响应略微保守的近似提高了实际运行的鲁棒性。

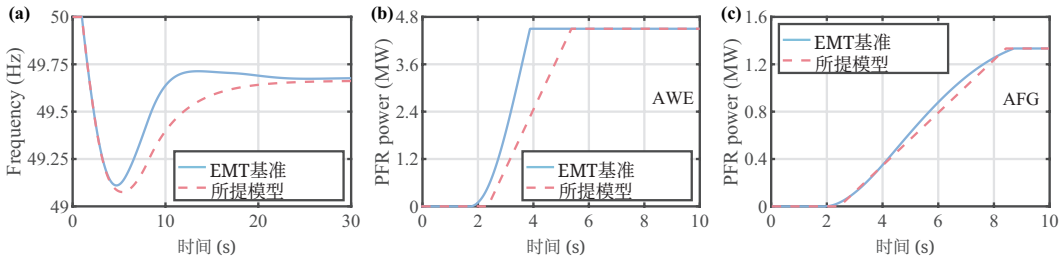

图 4：所提模型 (21) 与 EMT基准下事故后频率动态及一次调频功率的比较。(a) 事故后频率。(b) 碱性水电解槽的 PFR 功率。(c) AFG 的 PFR 功率。

3.2. 暂态频率安全指标与约束

根据 (21)，可以推导出暂态频率安全指标（最大频率变化率、准稳态频率和频率最低点）。

注 1. 如图 *5(a)* 所示，频率最低点可能唯一出现在区间 $[t_{\mathrm{DB1}}, t_{\mathrm{DB2}})$ 或 $[t_{\mathrm{DB2}}, \infty)$内。这些区间内的频率动态遵循 (21) 中的分段表达式，因此需要用两个不同的表达式分别刻画这两种情况下的最低点。

在此，我们分别推导两个时间区间内频率最低点的表达式，然后提出一种策略，确保每个优化步骤中只需施加唯一的最低点约束。

1) 频率变化率：最大频率变化率出现在扰动发生后立即，此时测量窗口内的频率偏差为 $\Delta f(\tau) \approx 0$。根据式（21）的第一段，频率变化率约束可表示为：

$$H \geq \frac{\Delta P_{\mathrm{dis}}}{2\Delta f_{\mathrm{RoCoF}}^{\mathrm{lim}}}. \tag{24}$$

2) 准稳态频率：当 $\tau \to \infty$ 时，频率达到由式（21）的第三段决定的准稳态。应用边界条件 $\mathrm{d}\Delta f/\mathrm{d}\tau = 0$，可得

$$\sum_{e\in\mathcal{A}} R_e^{\mathrm{PFR}} + \sum_{b\in\mathcal{B}} R_b^{\mathrm{PFR}} + \sum_{w\in\mathcal{W}} R_w^{\mathrm{PFR}} + \sum_{g\in\mathcal{G}} R_g^{\mathrm{PFR}} \geq \Delta P_{\mathrm{dis}} - D\Delta f_{\mathrm{qss}}^{\mathrm{lim}}. \tag{25}$$

3) 频率最低点：最低点可能出现在两个时间区间之一，即 $[t_{\mathrm{DB1}}, t_{\mathrm{DB2}})$ 和 $[t_{\mathrm{DB2}}, \infty)$。由此得到两组最低点约束。

首先推导 $[t_{\mathrm{DB1}}, t_{\mathrm{DB2}})$ 内的频率最低点约束。假设初始条件为$\Delta f(0) = 0$，则式（21）的显式解给出随时间变化的频率轨迹：

$$\Delta f(\tau) = \pm f_{\mathrm{db1}} + \frac{\Delta P_{\mathrm{dis}}\left(1 - e^{-\frac{D(\tau - t_{\mathrm{DB1}})}{2H}}\right) + R_1(\tau - t_{\mathrm{DB1}})}{D} - \frac{2HR_1\left(1 - e^{-\frac{D(\tau - t_{\mathrm{DB1}})}{2H}}\right)}{D^2}, \quad t_{\mathrm{DB1}} \leq \tau \leq t_{\mathrm{DB2}}, \tag{26}$$

其中 $R_1 = \sum_{e\in\mathcal{A}}(R_e^{\mathrm{PFR}}/t_e) + \sum_{b\in\mathcal{B}}(R_b^{\mathrm{PFR}}/t_b)$。

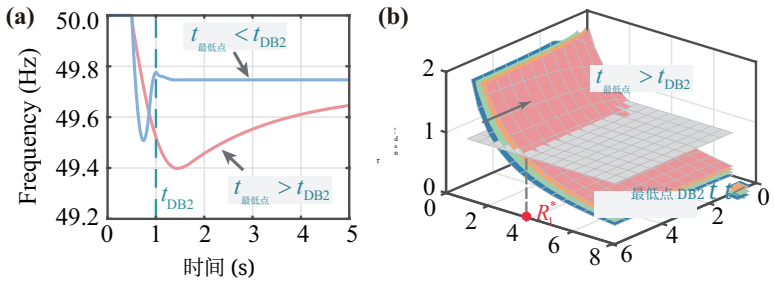

图5：频率 cy最低点动态。(a) 频率最低点的出现情形。(b) 频率最低点的时间随变化的备用和惯 性水平。

当 $\mathrm{d}\Delta f(\tau)/\mathrm{d}\tau = 0$ 时，最低点出现，因此我们有：

$$\tau_{\text{naidr}} = t_{\text{DB1}} - \frac{2H}{D}\ln\Big(\frac{2HR_1}{2HR_1 + D\Delta P_{\text{dis}}}\Big). \tag{27}$$

将(27)代入(26)，可得频率最低点为：

$$\Delta f_{\text{nadir}} = \Delta f_{\text{db1}} + \frac{\Delta P_{\text{dis}}}{D} + \frac{2HR_1}{D^2}\ln\left(\frac{2HR_1}{D\Delta P_{\text{dis}} + 2HR_1}\right). \tag{28}$$

令 $\Delta f_{\text{nadir}} \le \Delta f_{\text{nadir}}^{\text{lim}}$ 为频率最低点约束，则有：

$$2HR_1\ln\left(\frac{2HR_1}{D\Delta P_{\text{dis}} + 2HR_1}\right) \le D^2(\Delta f_{\text{nadir}}^{\text{lim}} - \Delta f_{\text{db1}}) - D\Delta P_{\text{dis}}. \tag{29}$$

满足不等式(29)的充分条件可表示为 [14, 16]:

$$x_1^* - \Big(\sum\nolimits_{b\in\mathcal{B}} H_b R_1 + \sum\nolimits_{e\in\mathcal{P}} x_e^{\text{st}} H_e R_1 + \sum\nolimits_{g\in\mathcal{G}} x_g^{\text{st}} H_g R_1\Big) \le 0, \tag{30}$$

其中 x_1^* 通过求解获得

$$2x_1^*\ln\left(\frac{2x_1^*}{D\Delta P_{\text{dis}} + 2x_1^*}\right) = D^2(\Delta f_{\text{nadir}}^{\text{lim}} - \Delta f_{\text{db1}}) - D\Delta P_{\text{dis}}. \tag{31}$$

采用类似的方法，可推导出对应于发生区间 $[t_{\text{DB2}}, \infty)$ 的频率最低点约束：

$$x_2^* - \Big(\sum_{b\in\mathcal{B}} H_b R_2 + \sum_{e\in\mathcal{P}} x_e^{\text{st}} H_e R_2 + \sum_{g\in\mathcal{G}} x_g^{\text{st}} H_g R_2\Big) \le 0, \tag{32}$$

其中 $R_2 = \sum_{e\in\mathcal{A}}(R_e^{\text{PFR}}/t_e) + \sum_{b\in\mathcal{B}}(R_b^{\text{PFR}}/t_b) + \sum_{g\in\mathcal{G}}(R_g^{\text{PFR}}/t_g) + \sum_{w\in\mathcal{W}}(R_w^{\text{PFR}}/t_w)$；且$x_2^*$ 的数值通过求解获得

$$2x_2^*\ln\left(\frac{2x_2^*}{D\Delta P_{\text{dis}} + 2x_2^*}\right) = D^2(\Delta f_{\text{nadir}}^{\text{lim}} - \Delta f_{\text{db2}}) - D\Delta P_{\text{dis}}. \tag{33}$$

由于最低点唯一地出现在 $\tau \in [t_{\text{DB1}}, t_{\text{DB2}})$ 和 $\tau \in [t_{\text{DB2}}, \infty)$ 所界定的某个区间内，因此只需约束式 (30) 或式 (32) 之一。命题 1 建立了 $\tau_{\text{nadir}}(H,\ R_1)$ 关于 R_1 的单调性性质，并进一步确定阈值 R_1^{lo} 和 R_1^{hi} 以判定有效区域。

命题 1。 令 $\tau_{\mathrm{nadir}}(H, R_1)$ 表示在已知 ΔP_{dis} 下的 (27)。对于任意 $\Delta P_{\mathrm{dis}} > 0$ 和 $H > 0$，存在唯一的 $R_1^*(H) > 0$，使得 $\tau_{\mathrm{nadir}}\big(H, R_1^*(H)\big) = t_{\mathrm{DB2}}$，如图 *5(b)* 所示。定义 $R_1^{\mathrm{lo}} := R_1^*(H)$ $R_1^{\mathrm{hi}} := R_1^*(H)$，其中 $\underline{H}$ 和 $\overline{H}$ 为惯量界。于是，对于所有 $H \in [\underline{H}, \overline{H}]$，

$$R_1 \geq R_1^{\mathrm{hi}} \;\Rightarrow\; \tau_{\mathrm{nadir}}(H, R_1) \leq t_{\mathrm{DB2}}, \tag{34}$$

$$R_1 \leq R_1^{\mathrm{lo}} \;\Rightarrow\; \tau_{\mathrm{nadir}}(H, R_1) \geq t_{\mathrm{DB2}}. \tag{35}$$

此外，存在一个较小的时间裕度 $\mu \geq 0$，使得对于任意 $R_1 \in (R_1^{\mathrm{lo}}, R_1^{\mathrm{hi}})$ 以及任意 $H \in [\underline{H}, \overline{H}]$，$\tau_{\mathrm{nadir}}(\underline{H}, \overline{R}_1) \geq t_{\mathrm{DB2}} - \mu$. 因此，频率最低点约束的近似二进制重构可写为：

$$R_1 \geq R_1^{\mathrm{hi}} - M(1-\delta), \tag{36}$$

$$R_1 \leq R_1^{\mathrm{hi}} + M\delta, \tag{37}$$

$$\varphi_1(x) \leq M(1-\delta), \tag{38}$$

$$\varphi_2(x) \leq M\delta, \tag{39}$$

其中，$\delta \in \{0, 1\}$；$\varphi_1(x)$ 和 $\varphi_2(x)$ 分别是(30) 和(32)的左端项。

证明。对于任意 $R_1 > 0$ 和 $H > 0$，对 $\tau_{\mathrm{nadir}}(H, R_1)$ 关于 R_1 和 H 求导，得到 $\partial\tau_{\mathrm{nadir}}/\partial R_1 < 0$ 和 $\partial\tau_{\mathrm{nadir}}/\partial H > 0$。因此，$\tau_{\mathrm{nadir}}$ 随 R_1 严格递减，随 H递增。根据 R^{hi}的定义，$\tau(H, R^{\mathrm{hi}}) = t_{\mathrm{DB2}}$。对于任意满足 $H \in [\underline{H}, \overline{H}]$的 $R_1 \geq R^{\mathrm{hi}}$，有：

$$\tau_{\mathrm{nadir}}(H, R_1) \;\leq\; \tau_{\mathrm{nadir}}(\overline{H}, R_1) \;\leq\; \tau_{\mathrm{nadir}}(\overline{H}, R_1^{\mathrm{hi}}) = t_{\mathrm{DB2}},$$

对于任意满足 $H \in [\underline{H}, \overline{H}]$的 $R_1 \leq R_1^{\mathrm{lo}}$，我们有：

$$\tau_{\mathrm{nadir}}(H, R_1) \;\geq\; \tau_{\mathrm{nadir}}(\underline{H}, R_1) \;\geq\; \tau_{\mathrm{nadir}}(\underline{H}, R_1^{\mathrm{lo}}) = t_{\mathrm{DB2}}.$$

对于 $R_1 \in (R_1^{\mathrm{lo}}, R_1^{\mathrm{hi}})$，关于 H 的单调性意味着

$$\tau_{\mathrm{nadir}}(H, R_1) \;\geq\; \tau_{\mathrm{nadir}}(\underline{H}, R_1) \;\geq\; \tau_{\mathrm{nadir}}(\underline{H}, R_1^{\mathrm{hi}}) = t_{\mathrm{DB2}} - \mu,$$

由此定义 $\mu := t_{\mathrm{DB2}} - \tau_{\mathrm{nadir}}(H, \underline{R}_1^{\mathrm{hi}}) \geq 0$。为得到 μ的闭式形式，首先对 R_1^{hi}求解 $\tau_{\mathrm{nadir}}(H, R_1^{\mathrm{hi}}) = t_{\mathrm{DB2}}$：

$$R_1^{\mathrm{hi}} = D\,\Delta P_{\mathrm{dis}} / \big(2\overline{H}(e^{\beta/\overline{H}} - 1)\big), \tag{40}$$

$$\beta = D\,(\Delta t/2), \tag{41}$$

其中 $\Delta t = t_{\mathrm{DB2}} - t_{\mathrm{DB1}}$。将 (41) 代入 $\tau_{\mathrm{nadir}}(H, R_1^{\mathrm{hi}})$：

$$\mu = \frac{2}{D}\Big[\beta - \underline{H}\,\ln\big(1 + \frac{\overline{H}(e^{\beta/\overline{H}} - 1)}{\underline{H}}\big)\Big]. \tag{42}$$

□

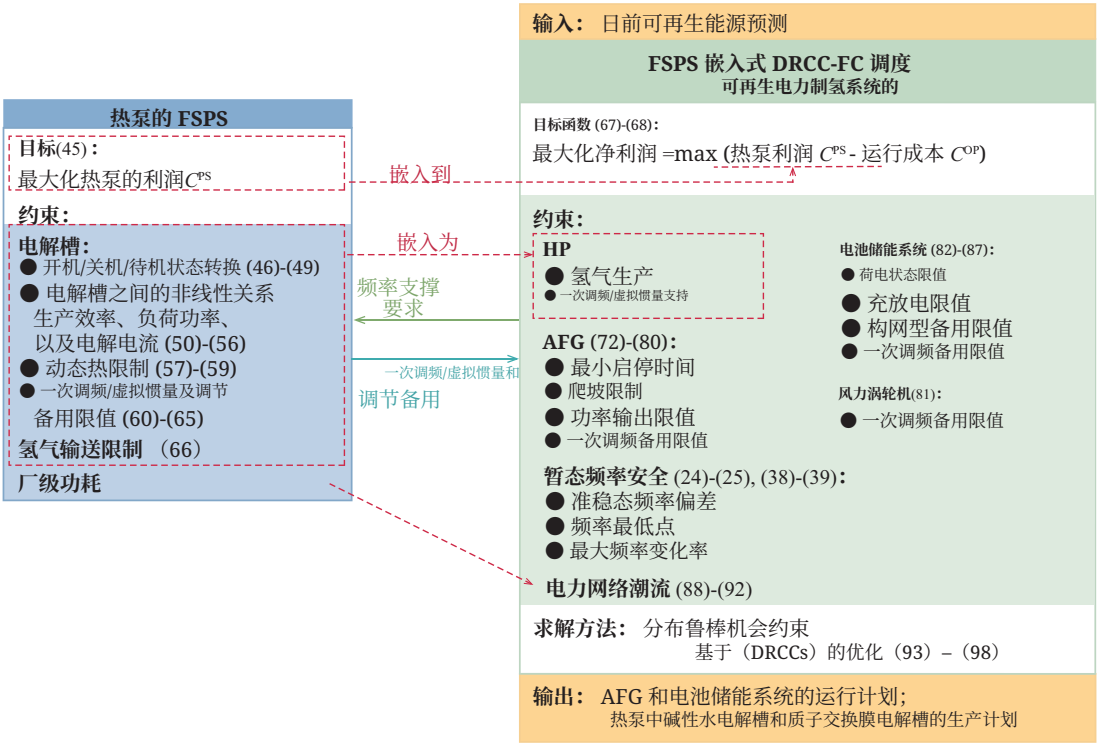

图 6：离网可再生电力制氢系统的 FSPS 嵌入式 DRCC-FC 调度模型框架 .

为进一步评估 μ 的大小，我们对 $e^a - 1 = a + a^2/2 + O(a^3)$ 和 $\ln(1+x) = x - x^2/2 + O(x^3)$ 进行二阶展开，得到

$$\mu = \frac{\beta^2}{D}\frac{\overline{H} - \underline{H}}{\overline{H}\,\underline{H}} + O\Big(\frac{\beta^3}{D\overline{H}^2}\Big). \tag{43}$$

归一化后， $\Delta t = 2\beta/D$ 得到

$$\mu/\Delta t \approx \frac{D\Delta t}{4}\frac{\overline{H} - \underline{H}}{\overline{H}\underline{H}}, \tag{44}$$

对于适中的 Δt 和 H，这通常会导致仅百分之几的相对误差，因此在实践中可忽略不计。

4. 离网可再生电力制氢系统的 FSPS 嵌入式 DRCC-FC 调度

本节构建了热泵的频率支撑型生产调度（FSPS）模型，旨在确保可靠的频率支撑，同时不牺牲氢气生产的盈利能力。随后，根据第 3 节推导的安全约束，将 FSPS 纳入离网可再生电力制氢系统的燃料电池调度框架。为应对可再生能源不确定性，本文采用分布鲁棒机会约束（DRCCs）。调度模型的总体框架如图 6 所示。由此形成的 FSPS 嵌入式 DRCC-FC 方法兼顾了离网可再生电力制氢系统的经济性和暂态频率安全。

4.1. HP 的 FSPS 建模

1) 目标函数：FSPS 旨在最大化热泵的利润 C^{PS}，其定义为氢气生产收入减去电解槽的运行成本：

$$C^{\mathrm{PS}}=\sum_{t\in\mathcal{T}}\sum_{e\in\mathcal{E}}\left(c_e^{\mathrm{H_2}}q_{e,t}\Delta t-c_e^{\mathrm{up}}z_{e,t}^{\mathrm{up,c}}-c_e^{\mathrm{down}}z_{e,t}^{\mathrm{down}}-c_e^{\mathrm{sb}}x_{e,t}^{\mathrm{sb}}\right),\tag{45}$$

其中，C^{PS} 为表示 HP 利润的 FSPS 目标函数，由电解槽的运行成本和氢气生产收益构成；

2) 电解槽的运行约束：根据我们先前的工作 [3, 37], ，电解槽的启动/待机/停机状态转换由式（47）–（49）描述；电解槽制氢效率、负荷功率和电解电流之间的非线性关系，则通过分段线性化和多项式拟合，采用式（51）–（56）进行近似。辅助功率建模为 $P_{e,t}^{\mathrm{cool}}=\eta_e^{\mathrm{cool}}h_{e,t}^{\mathrm{cool}}$ 以及 $P_{e,t}^{\text{泵}}=K^{\mathrm{pump}}q_{e,t}^{\mathrm{H_2}}$；$\delta_t^{\mathrm{sb}}$和 δ_t^{sd}为二进制辅助变量。

$$x_{e,t}^{\mathrm{st}}+x_{e,t}^{\mathrm{sb}}+x_{e,t}^{\mathrm{sd}}=1,\tag{46}$$

$$z_{e,t}^{\mathrm{down}}=x_{e,t-1}^{\mathrm{st}}x_{e,t}^{\mathrm{sd}},\tag{47}$$

$$z_{e,t}^{\mathrm{up,h}}=x_{e,t-1}^{\mathrm{sb}}x_{e,t}^{\mathrm{st}},\tag{48}$$

$$z_{e,t}^{\mathrm{up,c}}=x_{e,t-1}^{\mathrm{sd}}x_{e,t}^{\mathrm{st}},\tag{49}$$

$$q_{e,t}^{\mathrm{H_2}}\le\mathbf{A}I_t+\mathbf{B}x_{e,t}^{\mathrm{st}},\tag{50}$$

$$x_{e,t}^{\mathrm{st}}\underline{I}\le I_t\le x_{e,t}^{\mathrm{st}}\overline{I},\tag{51}$$

$$P_{e,t}=P_{e,t}^{\mathrm{stack}}(I,T)+P_{e,t}^{\mathrm{auxi}},\tag{52}$$

$$P_{e,t}^{\mathrm{auxi}}=x_{e,t}^{\mathrm{st}}P_{e,t}^{\mathrm{cool}}+P_{e,t}^{\mathrm{pump}},\tag{53}$$

$$P_{e,t}^{\mathrm{stack}}(I,T)=a_e^1I_{e,t}+a_e^2T_{e,t}+x_{e,t}^{\mathrm{st}}a_e^3+\delta_t^{\mathrm{sb}}+\delta_t^{\mathrm{sd}},\tag{54}$$

$$-x_{e,t}^{\mathrm{sb}}M\le\delta_t^{\mathrm{sb}}\le x_{e,t}^{\mathrm{sb}}M,\tag{55}$$

$$-x_{e,t}^{\mathrm{sd}}M\le\delta_t^{\mathrm{sd}}\le x_{e,t}^{\mathrm{sd}}M.\tag{56}$$

电解堆的温度动态会影响电转氢能量转换效率，由式（57）–（58）建模；电堆的允许运行温度则受式（59）约束。

$$C_e^{\mathrm{heat}}(T_{e,t+1}-T_{e,t})=(P_{e,t}^{\mathrm{stack}}-n_cI_{e,t}V^{\mathrm{tn}}-h_{e,t}^{\mathrm{cool}})\Delta t,\tag{57}$$

$$0\le h_{e,t}^{\mathrm{cool}}\le a_e^{\mathrm{cool}}(T_{e,t}-T^{\mathrm{cool}}),\tag{58}$$

$$\underline{T}_e\le T_{e,t}\le\overline{T}_e.\tag{59}$$

为保证　　确保热泵提供充足的频率支撑，PEMEL 和碱性水电解槽必须分别满足

以下一次调频和虚拟惯量备用约束：

$$P_{e,t} - R^{-}_{e,t} - R^{\mathrm{PFR}}_{e,t} \geq x^{\mathrm{sb}}_{e,t} P^{\mathrm{sb}}_{e,t} + x^{\mathrm{st}}_{e,t} \underline{P}_e, \quad \forall e \in \mathcal{A}, \tag{60}$$

$$P_{e,t} + R^{+}_{e,t} + R^{\mathrm{PFR}}_{e,t} \leq x^{\mathrm{sb}}_{e,t} P^{\mathrm{sb}}_{e,t} + x^{\mathrm{st}}_{e,t} \overline{P}_e, \quad \forall e \in \mathcal{A}, \tag{61}$$

$$0 \leq R^{\mathrm{PFR}}_{e,t} \leq x^{\mathrm{st}}_{e,t} R^{\mathrm{PFR,lim}}_{e}, \quad \forall e \in \mathcal{A}, \tag{62}$$

$$0 \leq R^{-}_{e,t} \leq x^{\mathrm{st}}_{e,t} R^{-,\mathrm{lim}}_{e},\ 0 \leq R^{+}_{e,t} \leq x^{\mathrm{st}}_{e,t} R^{+,\mathrm{lim}}_{e}, \quad \forall e \in \mathcal{A}, \tag{63}$$

$$P_{e,t} - R^{\mathrm{VI}}_{e,t} \geq x^{\mathrm{sb}}_{e,t} P^{\mathrm{sb}}_{e,t} + x^{\mathrm{st}}_{e,t} \underline{P}_e, \quad \forall e \in \mathcal{P}, \tag{64}$$

$$P_{e,t} + R^{\mathrm{VI}}_{e,t} \leq x^{\mathrm{sb}}_{e,t} P^{\mathrm{sb}}_{e,t} + x^{\mathrm{st}}_{e,t} \overline{P}_e, \quad \forall e \in \mathcal{P}, \tag{65}$$

其中，VI 备用估计为 $R^{VI}_{e,\,t} = x^{\mathrm{st}}_{e,\,t} H_e \Delta f^{\mathrm{lim}}_{RoCoF}$。

3）氢气输送约束：HP 输送至下游的氢气量受压缩机允许吞吐量的限制。因此，氢气产率需满足：

$$\sum_{e \in \mathcal{E}} q^{\mathrm{H_2}}_{e,t} \leq \sum_{c \in \mathcal{C}} q^{\mathrm{lim}}_{c,t}. \tag{66}$$

请注意，还可以施加更详细的管道和管存约束，例如 [4]中的约束。由于篇幅限制，且不失一般性，本文不予考虑。

4）功耗约束：HP 的功率消耗受系统级功率平衡约束，详情见第 4.2 节。

4.2. 可再生电力制氢系统的*FSPS*嵌入式*DRCC-FC*调度

1）目标函数：为将 FSPS 嵌入基于DRCC的FC调度框架，系统级调度的目标函数设定为最大化离网可再生电力制氢系统的净利润，即：

$$\max\ C^{\mathrm{net}} = C^{\mathrm{PS}} - C^{\mathrm{OP}}, \tag{67}$$

with

$$C^{\mathrm{OP}} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{g \in \mathcal{G}} \left(c^{\mathrm{NH_3}}_{g} q^{\mathrm{NH_3}}_{g,t} \Delta t + c^{\mathrm{up}}_{g} z^{\mathrm{up}}_{g,t} \right), \tag{68}$$

其中 C^{OP} 为系统运行成本，包括AFG的燃料成本和启动成本。

2）*AFG* 的运行约束：AFG 的功率输出与燃料消耗之间的关系由式（69）给出，其中 η^{comb}_{g}和 $\eta^{\mathrm{steam}}_{g}$ 表示效率系数。AFG 的运行约束包括最小启停时间（72）–（73）、功率输出限值（74）–（75）、一次调频和调节备用限值（76）–（78），以及爬坡限值（79）–（80）。

$$P_{g,t} = \eta^{\mathrm{comb}}_{g} \eta^{\mathrm{steam}}_{g} LHV_{\mathrm{NH_3}} q^{\mathrm{NH_3}}_{g,t}, \tag{69}$$

$$z^{\mathrm{up}}_{g,t} - z^{\mathrm{down}}_{g,t} = x^{\mathrm{st}}_{g,t} - x^{\mathrm{st}}_{g,t-1}, \tag{70}$$

$$z_{g,t}^{\mathrm{up}} + z_{g,t}^{\mathrm{down}} \le 1, \tag{71}$$

$$T_g^{\mathrm{off}}(1 - x_{g,t}^{\mathrm{st}}) \le \sum_{t}^{t-1+T_g^{\mathrm{off}}} z_{g,t}^{\mathrm{down}}, \quad \forall t \le T + 1 - T_g^{\mathrm{off}}, \tag{72}$$

$$T_g^{\mathrm{on}} x_{g,t}^{\mathrm{st}} \le \sum_{t}^{t-1+T_g^{\mathrm{on}}} z_{g,t}^{\mathrm{up}}, \quad \forall t \le T + 1 - T_g^{\mathrm{on}}, \tag{73}$$

$$P_{g,t} - R_{g,t}^{-} - R_{g,t}^{\mathrm{PFR}} \ge x_{g,t}^{\mathrm{st}} \underline{P}_g, \tag{74}$$

$$P_{g,t} + R_{g,t}^{+} + R_{g,t}^{\mathrm{PFR}} \le x_{g,t}^{\mathrm{st}} \overline{P}_g, \tag{75}$$

$$0 \le R_{g,t}^{\mathrm{PFR}} \le x_{g,t}^{\mathrm{st}} R_g^{\mathrm{PFR,lim}}, \tag{76}$$

$$0 \le R_{g,t}^{-} \le x_{g,t}^{\mathrm{st}} R_g^{-,\mathrm{lim}}, \tag{77}$$

$$0 \le R_{g,t}^{+} \le x_{g,t}^{\mathrm{st}} R_g^{+,\mathrm{lim}}, \tag{78}$$

$$P_{g,t} + R_{g,t}^{+} + R_{g,t}^{\mathrm{PFR}} - P_{g,t-1} - R_{g,t-1}^{-} - R_{g,t-1}^{\mathrm{PFR}} \le r_g^u, \tag{79}$$

$$P_{g,t-1} - R_{g,t-1}^{-} - R_{g,t-1}^{\mathrm{PFR}} - P_{g,t} + R_{g,t}^{+} + R_{g,t}^{\mathrm{PFR}} \le r_g^d. \tag{80}$$

3）风力涡轮机的约束：风力涡轮机提供的一次调频必须保持在降载运行时预留的裕度范围内。为考虑风力涡轮机输出预测不确定性，该要求被建模为分布鲁棒机会约束：

$$\inf_{\mathbb{P}\in\mathbb{P}_w} \mathbb{P}\{R_{w,t}^{\mathrm{PFR}} \le k_w^{\mathrm{deload}} \hat{P}_w + \xi_w^{'}\} \ge 1 - \rho_w. \tag{81}$$

4) 电池储能系统约束：电池储能系统的运行必须满足功率和荷电状态约束（82）–（87），其中 $R_{b,t}^{\mathrm{FR}} = R_{b,t}^{\mathrm{PFR}} + R_{b,t}^{\mathrm{GFM}}$，以及构网型备用估计为 $R_b^{\mathrm{GFM}} \approx \sum_{b\in\mathcal{B}} H_b \cdot \Delta f_{\mathrm{RoCoF}\circ}^{\mathrm{lim}}$

$$0 \le P_{b,t}^{\mathrm{C}} + R_b^{+} + R_b^{\mathrm{PFR}} + R_b^{\mathrm{GFM}} \le x_{b,t}^{\mathrm{C}} \overline{P}_{b,t}, \tag{82}$$

$$0 \le P_{b,t}^{\mathrm{D}} + R_b^{-} + R_b^{\mathrm{PFR}} + R_b^{\mathrm{GFM}} \le (1 - x_{b,t}^{\mathrm{C}}) \overline{P}_{b,t}, \tag{83}$$

$$E_{b,t} = (1 - \mu_b) E_{b,t-1} + (\eta_b^{\mathrm{C}} P_{b,t}^{\mathrm{C}} - P_{b,t}^{\mathrm{D}} / \eta_b^{\mathrm{D}}) \Delta t, \tag{84}$$

$$\frac{R_{b,t}^{\mathrm{FR}} + R_{b,t}^{-}}{\eta_b^{\mathrm{D}}} + \underline{E}_b \le E_{b,t} \le \frac{R_{b,t}^{\mathrm{FR}} + R_{b,t}^{+}}{\eta_b^{\mathrm{C}}} + \overline{E}_b, \tag{85}$$

$$R_b^{+} \ge 0, \; R_b^{\mathrm{PFR}} \ge 0, \tag{86}$$

$$E_{b,0} = E_{b,\mathcal{T}}. \tag{87}$$

5）电力网络潮流约束：可再生能源制氢系统通常采用辐射状拓扑[3, 4, 7, 37]。因此，调度问题中的潮流约束可通过线性化 DistFlow 模型 [44]近似表示：

$$P_{i,t}^{\mathrm{net}} + \sum\nolimits_{k\in\mathcal{F}(i)} P_{ki,t} = \sum\nolimits_{j\in\varsigma(i)} P_{ij,t}, \tag{88}$$

$$V_{i,t}^2 - V_{j,t}^2 = 2 R_{ij} P_{ij,t}, \tag{89}$$

$$\underline{P}_{ij} \le P_{ij,t} \le \overline{P}_{ij}, \tag{90}$$

$$\underline{V}_i^2 \le V_{i,t}^2 \le \overline{V}_i^2. \tag{91}$$

其中，式（88）用于确保节点有功功率平衡，式（89）表示电压幅值平方与支路有功功率潮流之间的关系。约束（90）—（91）分别规定了支路潮流限值和母线电压界限。母线 i 的净注入功率建模如下:

$$\begin{aligned} P_{i,t}^{\mathrm{net}} = & \sum\nolimits_{g\in\mathcal{G}(i)} P_{g,t} + \sum\nolimits_{w\in\mathcal{W}(i)} \left(1-k_{w,t}^{\mathrm{deload}}\right)\hat{P}_{w,t} + \hat{P}_{s,i,t} \\ & + \sum\nolimits_{b\in\mathcal{B}(i)} P_{b,t}^{\mathrm{D}} - \sum\nolimits_{b\in\mathcal{B}(i)} P_{b,t}^{\mathrm{C}} - P_{\mathrm{HP},i,t} - P_{d,i,t}, \end{aligned} \tag{92}$$

其中，热泵的功率消耗为 $P_{\mathrm{HP},\ i,\ t} = \sum_{e\in\mathcal{E}(i)} P_{e,\ t} + \sum_{c\in\mathcal{C}(i)} P_{c\,t}^{\mathrm{comp}}$,

.

为应对可再生能源出力的不确定性，我们采用电解槽、电池储能系统和AFG，在仿射策略下配置向上备用和向下备用，以减小可再生能源预测误差，具体方法与我们之前的工作 [3]类似。该调节过程被表述为一个分布鲁棒机会约束:

$$\begin{aligned} \inf_{\mathbb{P}\in\mathbb{P}_r} \mathbb{P}\Big\{ & (\boldsymbol{\alpha}_{e,t}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{\alpha}_{g,t}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{\alpha}_{b,t}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{\xi}_r - (R_{g,t}^{+} + R_{e,t}^{+} + R_{b,t}^{+}) \le 0, \\ & (\boldsymbol{\alpha}_{e,t}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{\alpha}_{g,t}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{\alpha}_{b,t}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{\xi}_r - (R_{g,t}^{-} + R_{e,t}^{-} + R_{b,t}^{-}) \le 0 \Big\} \ge 1-\rho_r, \end{aligned} \tag{93}$$

其中 $\boldsymbol{\xi}_r = \{\xi_w^{'}, \xi_s\}$; $\boldsymbol{\alpha}_{g,\ t} = \{\alpha_{g,t}^{w}, \alpha_{g,t}^{s}\}$、 $\boldsymbol{\alpha}_{e,\ t} = \{\alpha_{e,t}^{w}, \alpha_{e,t}^{s}\}$和$\boldsymbol{\alpha}_{b,\ t} = \{\alpha_{b,t}^{w}, \alpha_{b,t}^{s}\}$ 为满足 $-\mathbf{1} \le \{\boldsymbol{\alpha}_{g,t}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\alpha}_{e,t}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\alpha}_{b,t}^{\mathrm{T}}\}^{\mathrm{T}} \le \mathbf{1}$的调节系数。为确保不确定性下的功率平衡，仿射系数必须满足$\boldsymbol{\alpha}_{g,\ t} + \boldsymbol{\alpha}_{e,\ t} + \boldsymbol{\alpha}_{b,\ t} = \mathbf{1}$。此外，电解槽、AFG和电池储能系统的调节备用也被纳入潮流约束，以确保仿射调节期间的可行性。

6）频率安全约束：通过将约束（24）、（25）、（38）和（39）纳入调度程序，确保可再生电力制氢系统的频率安全。对于（38）和（39）中的双线性项 $x^{\mathrm{st}} R^{\mathrm{PFR}}$ in$\varphi_1(x)$ 和 $\varphi_2(x)$，可采用大M法将其转换为混合整数线性形式 [45]。

7）热泵运行约束：将（47）–（66）中的热泵运行约束嵌入 FSPS，使热泵能够在保持氢气生产盈利能力的同时提供充足的频率支撑。

4.3. 求解方法

鉴于可再生能源预测误差的随机性，以及对其底层概率分布了解有限，我们采用分布不确定性模型来处理分布鲁棒机会约束（81）和（93）。首先，我们假设风力涡轮机和光伏出力预测误差的分布 $\mathbb{P}_w$ 和 $\mathbb{P}_r$ 位于以其经验分布为中心的模糊集中。随后，我们基于历史数据以数据驱动的方式构建这些模糊集，并使用Wasserstein距离量化底层分布与

经验分布之间的距离。因此， $\mathbb{P}_w$ 和 $\mathbb{P}_r$ 定义如下：

$$\mathbb{P}_w := \{\mathbb{P}_w \in \mathbb{M}_w : W_p(\mathbb{P}_w, \hat{\mathbb{P}}_w) \le \theta_w\}, \tag{94}$$

$$\mathbb{P}_r := \{\mathbb{P}_r \in \mathbb{M}_r : W_p(\mathbb{P}_r, \hat{\mathbb{P}}_r) \le \theta_r\}, \tag{95}$$

其中， $\mathbb{P}_w$ 和 $\mathbb{P}_r$ 分别是风力涡轮机和光伏出力预测误差的经验分布。给定历史样本 $\{\hat{\xi}'_{w,\,i}\}_{i=1}^{N_w}$ 和 $\{\hat{\boldsymbol{\xi}}_{r,\,i}\}_{i=1}^{N_r}$，经验分布为 $\hat{\mathbb{P}}_w = \frac{1}{N_w}\sum_{i=1}^{N_w} \tilde{\xi}'_{w,\,i}$ 和 $\hat{\mathbb{P}}_r = \frac{1}{N_r}\sum_{i=1}^{N_r} \tilde{\boldsymbol{\xi}}_{r,\,i}$，其中 $\tilde{\xi}'_{w,\,i}$ 和 $\tilde{\boldsymbol{\xi}}_{r,\,i}$ 分别是样本 $\hat{\xi}'_{w,\,i}$ 和 $\hat{\boldsymbol{\xi}}_{r,\,i}$ 的狄拉克测度。Wasserstein度量 $W_p(\mathbb{P},\,\hat{\mathbb{P}})$ 用于量化经验分布与真实分布之间的差异，而半径 θ 决定了分布鲁棒建模的保守程度。Wasserstein度量的详细计算过程见 [46]。

在满足 $\rho_w \le \frac{1}{N_w}$ 和 $\rho_r \le \frac{1}{N_r}$ 时，根据 [46, 47]，式（81）和（93）中的分布鲁棒机会约束可在式（94）和（95）所定义的模糊集下等价地重构为：

$$\beta + \frac{v\theta + \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} k_i}{\rho} \le 0, \tag{96}$$

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})\,\hat{\boldsymbol{\zeta}}_i - B(x) - \beta \le k_i, \tag{97}$$

$$\|\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})\|_\infty \le v,\ v \ge 0,\ k_i \ge 0. \tag{98}$$

此处， β、 k和 v 为辅助变量。对于约束(81)，我们有 $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}) = -k_{\mathrm{deload}}$、$\hat{\boldsymbol{\zeta}}_i = \hat{\xi}'_{w,\,i}$、 $B(x) = k_{\mathrm{deload}}\hat{P}_{w,\,t} - R^{\mathrm{PFR}}_{w\,t}$、、 $\rho = \rho_w$和 $N = N_w$。对于约束(93)，我们有 $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{\alpha}_{g,\,t} + \boldsymbol{\alpha}_{b,\,t} + \boldsymbol{\alpha}_{e,\,t}$、$\hat{\boldsymbol{\zeta}}_i = \boldsymbol{\xi}_{r,\,i}$、 $B(x) = R^s_{g,\,t} + R^s_{b,\,t} + R^s_{e,\,t}$、 $s \in \{+,-\}$、 $\rho = \rho_r$和 $N = N_r$。因此，嵌入FSPS的DRCC-FC调度模型被转化为可由商业求解器求解的混合整数线性规划（混合整数线性规划）问题。

5. 案例研究

采用两个测试系统验证所提方法。第一个基于中国内蒙古的可再生能源制氢示范项目 [6]，，如图7所示。它包括八台6.25 MW风力涡轮机、一座10 MW光伏电站、一台40 MW热泵、一套8 MW/8 MWh电池储能系统以及三台12 MW AFG。第二个是构建于改进的IEEE 69节点网络（图8）上的大规模可再生电力制氢系统，用于验证可扩展性与通用适用性。它包含十二台6.25 MW风力涡轮机、一座25 MW光伏电站、两台40 MW热泵、一套20 MW/20 MWh电池储能系统以及五台6 MW AFG。每台热泵由六台5 MW碱性水电解槽和八台1.25 MW质子交换膜电解槽组成，参数取自 [20, 37]。

将总负荷阶跃增加15%视为在测试系统中触发频率偏差的事故。频率限值设定为 $f_N = 50$，Hz、$\Delta f^{\lim}_{\mathrm{nadir}} = 1.0$，Hz、$\Delta f_{\mathrm{limRoCoF}} = 0.5$，Hz/s，以及 $\Delta f^{\lim}_{\mathrm{qss}} = 0.5$，Hz [48, 49]。一次调频交付时间为 t_b，t_e，t_w，$t_g = 2$，3，4，6，s。的违约概率

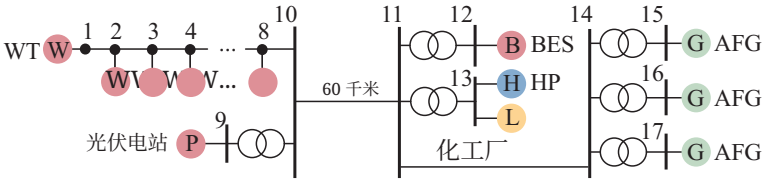

图7：基础测试可再生电力制氢系统示意图。

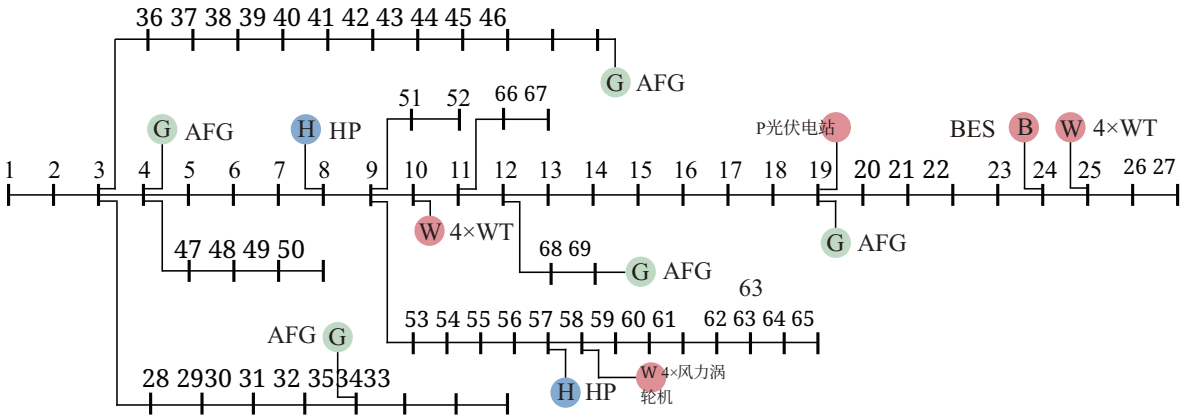

图8：基于改进 IEEE 69节点系统的大规模测试可再生电力制氢系统示意图。

机会约束设定为0.05。可再生能源的预测不确定性由 $N_w = N_r = 500$个来自 [3]的真实历史样本表示。详细参数列于表2和表3。

采用两种对比方法（CMs）作为基准，以展示所提方法（PM）的优势：

CM1：不含频率安全约束的通用氢基系统调度方法 [17] 。

CM2： [14, 15], 中由 AFG、风力涡轮机和电池储能系统调节频率的 FC 调度模型。热泵不参与频率调节。

所提方法：嵌入 FSPS 的 FC 调度方法，由 AFG、风力涡轮机、电池储能系统和热泵提供频率支撑。

为进行公平比较，CM1 和 CM2 对热泵采用与所提方法相同的生产调度公式。所有调度模型均在 *Wolfram Mathematica 14.0* 中实现，并使用 *Gurobi12.0*求解。调度步长为 1 小时，计算在配备 *Intel Corei9-13900K @ 3.0GHz*CPU 和 *32 GB RAM* 的工作站上进行。

5.1. 含 *14* 台电解槽和 *3* 台 *AFG* 的基础测试系统

5.1.1. 频率安全约束的必要性

图 9 展示了在调度日内假设发生 15% 负荷扰动时，每小时的频率最低点和最大频率变化率指标。若不考虑暂态频率约束，CM1 无法确保频率

表2：案例研究中使用的 AFG、 电池储能系统、风力涡轮机及单位成本参数。

参数	数值	参数	数值
$\eta_g^{\mathrm{comb}}/\eta_g^{\mathrm{steam}}$	0.88 / 0.40	$\eta_b^{\mathrm{C}}/\eta_b^{\mathrm{D}}$	0.9 / 0.95
$T_g^{\text{开/关}}$	3 / 3 h	H_b	1 MW·s^2
$\underline{P}_g/\overline{P}_g$	4.5 / 12； 2 / 6 MW	$\underline{V}_i/\overline{V}_i$	0.95 / 1.05 标幺值
$R_g^{\mathrm{FFR,lim}}$	$0.25\,\overline{P}_g$	$c_g^{\mathrm{NH_3}}$	5 元/千克
$R^{+,\mathrm{lim}}_g/R^{-,\mathrm{lim}}_g$	$0.05\,\overline{P}_g$	c_g^{up}	1250 人民币
H_g	3 s	$c_e^{\mathrm{H_2}}$	32.9 元/兆瓦时
k_w^{deload}	0.1	$c_e^{\text{上/下}}$	800 / 0 人民币
$E_b^{\min}/E_b^{\max}$	0.1 / 0.9 $\overline{P_b}$		

Table 3：碱性水电解槽和质子交换膜电解槽在该c中使用的参数 ase研究。

参数	数值（AWE）	参数	数值（PEMEL）
C_e^{heat}	7.8×10^7 J/℃	C_e^{heat}	2.0×10^7 J/℃
a_e^{cool}	17 kW/℃	a_e^{cool}	17 kW/℃
n_c/A	313 / 4 m^2	n_c/A	273 / 1 m^2
$\underline{T}/\overline{T}$	25 / 80 ℃	$\underline{T}/\overline{T}$	25 / 80 ℃
$T^{\text{冷却}}/\eta_e^{\mathrm{cool}}$	5 ℃ / 4	$T^{\text{冷却}}/\eta_e^{\mathrm{cool}}$	5 ℃ / 4
$\underline{I}/\overline{I}$	2.30 / 7.99 kA	$\underline{I}/\overline{I}$	0.55 / 2.29 kA
V_{tn}	1.23 V	V_{tn}	1.23 V

稳定性，频率最低点会降至 45 Hz 以下，甚至低至 40.44 Hz。相比之下，CM2 和所提方法明确施加了关于惯量和一次调频备用的最低点、频率变化率及准稳态偏差约束，使频率最低点和频率变化率保持在 49 Hz 和 0.5 Hz/s 的限值以内。这些结果表明，将频率安全约束纳入调度十分必要。

5.1.2. 热泵频率支撑的影响

1）对系统运行的影响：在质子交换膜电解槽提供虚拟惯量支持的情况下，热泵的参与会改变常规发电机组的启停组合。在常规发电机组原本仅为维持惯量而需要保持在线的时段（例如图10中的时段2–5和12–21），质子交换膜电解槽可提供所需的惯量，使所提方法下的常规发电机组1和3能够停机，如图10(a)所示。相比之下，在热泵无法提供惯量支撑的CM2下，如图10(b)所示，常规发电机组在这些时段被迫保持在线。

2）对氢气生产的影响：提供一次调频和虚拟惯量要求电解槽保持负荷裕度，因此，如图10(c)和10(e)所示，在所提方法下，质子交换膜电解槽和碱性水电解槽均以部分负荷运行。相比之下，在CM2下，为提供惯量支撑而保持在线的常规发电机组会迫使电解槽吸收剩余电力，并在不必要的情况下接近满负荷运行，与所提方法相比，导致氢气产量过高35.32%（但这种氢气由常规发电机组不经济地供电）。

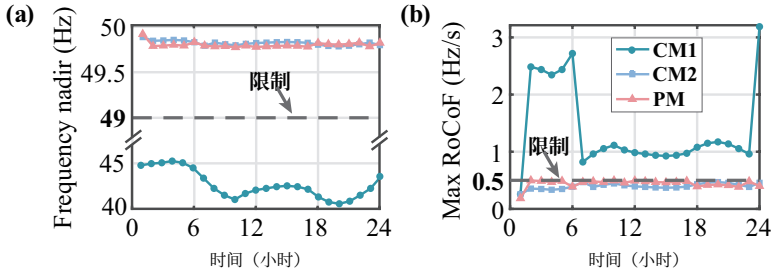

图9：基础测试系统在 CM1、CM2 和所提方法下的逐小时事故后频率指标。(a) 频率最低点。(b) 最大频率变化率。

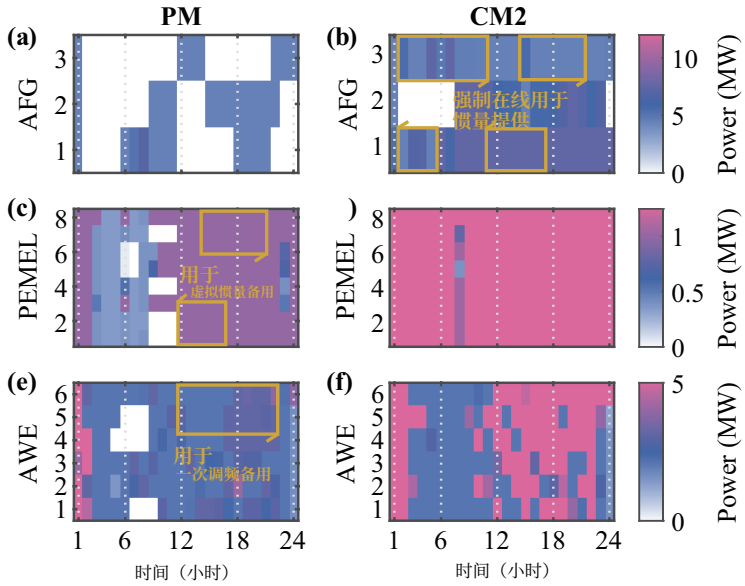

图10：基础测试系统在所提方法和 CM 下的 AFG、碱性水电解槽和质子交换膜电解槽调度结果

2.

3）对一次调频分配和经济性能的影响：图11(a)–(c)显示，在所提方法下，碱性水电解槽提供了常规发电机组一次调频备用的96.85%，承担了大部分频率支撑任务，这也是允许常规发电机组1和3保持离线的另一原因。此外，风力涡轮机一次调频备用需求的55.52%由碱性水电解槽满足。由于风力涡轮机通过降载提供一次调频，氢能参与可以降低其降载率（例如从10%降至5%），从而提高风能利用率，并有可能增加氢气生产量和系统级收益。

图11(d)比较了系统运行成本 C^{UC}、净利润 C^{net} 和氢能利润 C^{PS}。在所提方法下，利用热泵提供的支撑可降低 AFG 的运行时间和成本，使总运行成本降至 405,400 人民币，而 CM2 下为 1,160,000 人民币。尽管 CM2 的氢能利润较高，但过高的发电成本导致净亏损 424, 400 人民币。相比之下，所提方法实现了 100,800 人民币的净利润，较 CM2 提高了 123.74%。

上述分析表明，所提方法在经济性方面更具优势。关于

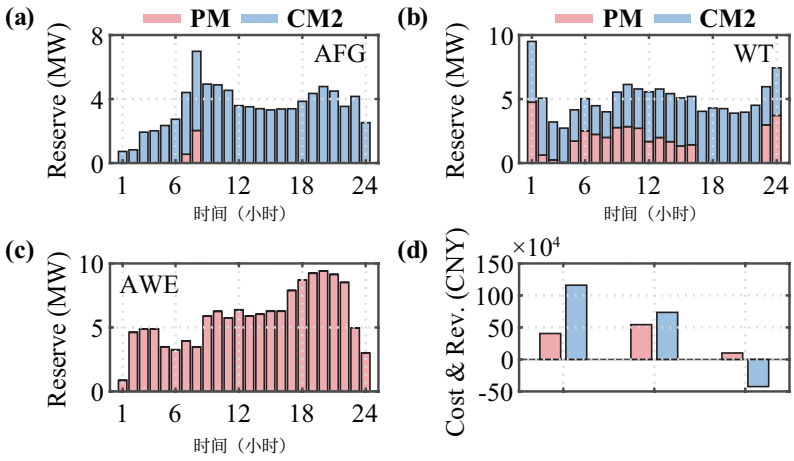

图11：基础测试系统的一次调频备用与经济性能。(a) AFG的一次调频备用总量。(b) 风力涡轮机的一次调频备用总量。(c) 碱性水电解槽的一次调频备用总量。(d) 运行成本 C^{OP}、HP收入 C^{PS} 和净利润 C^{net}。

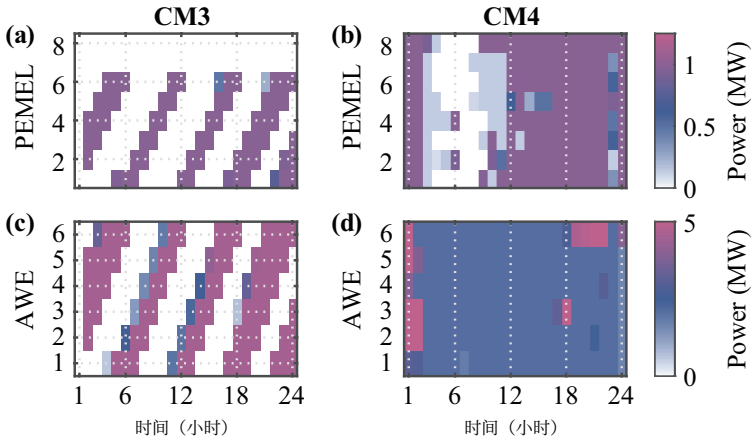

图12：基础系统在 CM3 和 CM4 下的碱性水电解槽与质子交换膜电解槽调度结果。

热泵频率支撑对其经济性能和系统运行成本的影响，将在第 5.2.2 节中进一步详细讨论。

5.1.3. 将 *FSPS* 嵌入燃料电池调度的优势：

热泵参与系统频率调节包括三个步骤：

步骤*1*：根据可再生电力制氢系统的燃料电池调度，确定热泵所需的惯量和一次调频；

步骤*2*：进行热泵氢气生产调度；

步骤*3*：将步骤*1* 中的备用分配给各电解槽。

然而，现有研究将系统的燃料电池调度与氢气生产调度分开处理，未探讨多个电解槽之间频率备用的分配。相比之下，所提方法能够同时优化系统运行、氢能电站调度以及频率备用的分配

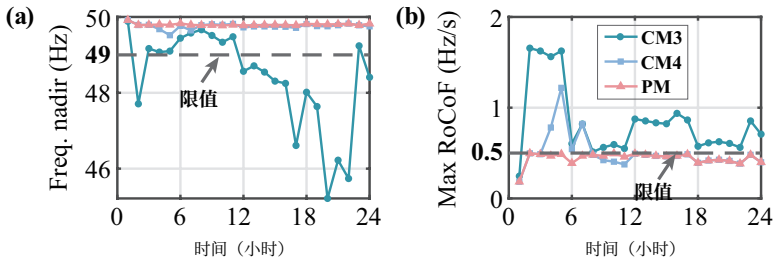

图13：基础测试系统在CM3、CM4和所提方法下逐小时事故后频率指标。（a）频率最低点。（b）最大频率变化率。

在 AFG、电池储能系统、风力涡轮机和电解槽之间。为展示其优势，本文还评估了另外两种基于最新研究的对比方法。

CM3：步骤*1* 在 [27, 29]中采用HP辅助FC调度方法，并将热泵建模为聚合电解槽；步骤*2* 按照旋转规则运行热泵 [33, 34]；步骤*3* 基于等边际原理分配一次调频/虚拟惯量备用 [37]。

CM4：在步骤*1*和步骤*3*中与CM3相同，但步骤*2*的热泵调度采用 [35, 36]中的基于优化的策略。

在CM3和CM4中，步骤*3*的备用分配均遵循等边际原理，以实现效率最大化，确保与所提方法进行公平比较。CM3和CM4中AFG的机组组合调度与所提方法中的一致，如图10(a)所示；图13展示了模拟得到的扰动后频率最低点和最大频率变化率。

在CM3中，热泵按照轮换规则进行调度，以平衡各电解槽的电堆老化情况。然而，这种策略使每个时段投入运行的电解槽更少，降低了热泵实际可提供的惯量支撑和频率支撑。因此，多个时段的扰动后频率最低点和频率变化率均超出安全限值。

在CM4中，投入运行的电解槽数量与所提方法相近，但热泵调度仅由氢气生产需求决定，未考虑频率支撑需求。第4、5和7时段投入运行的PEMEL不足，导致惯量支撑不足，并出现频率变化率超限。所提方法在所有时段均使频率指标保持在安全限值内，氢气产量仅比CM3低2.32%，兼顾了热泵效率与可靠的频率支撑。

这些结果清楚地表明，HP 的虚拟惯量和一次调频支撑能力取决于各电解槽的运行状态。将 HP 建模为单个聚合电解槽，并分别调度离网可再生电力制氢系统和氢气生产，会导致系统所需的频率支撑与 HP 的实际能力不匹配，从而损害系统的频率安全。因此，采用嵌入式频率安全约束的燃料成本调度框架至关重要，能够在确保 HP 持续提供所需频率支撑的同时，最大限度地提高制氢盈利能力。

表4：不同模糊半径 θ下的系统净利润和计算时间。

模糊半径 θ	净利润（人民币）	平均CPU时间（秒）
0.0248	481,613	644.43
0.0171	492,300	735.39
0.0149	499,071	1010.50
0.0131	499,607	1141.34

表5：大规模测试系统在365个日场景下的日产氢量、氨燃料消耗、净产氢量和频率安全指标统计平均值比较。

方法	氢气产量 (吨/天)	氨燃料消耗 (吨/天)	净产氢量 (吨/天)	频率最低点 (Hz)	最大频率变化率 (赫兹/秒)
CM2	25.58	85.56	10.52	49.72	0.397
PM	19.95	**25.53**	**15.45**	49.71	0.433

* 净产氢量通过根据化学计量反应 $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$，将氨燃料消耗折算为氢当量来计算，其中 1 kg NH_3 约对应 0.176 kg H_2。

5.2. 包含 *28* 台电解槽和 *5* 个 *AFG* 的大规模测试系统

本节评估所提方法在图8所示的大规模离网可再生电力制氢系统中的可扩展性，并进一步分析 HP 在全年场景下提供频率支撑所带来的经济效益。

5.2.1. 计算时间与可再生能源功率不确定性的影响

如 [46], 所述，增加预测误差样本数量 $N_{w/r}$ 会减小Wasserstein 半径θ ，从而降低分布鲁棒机会约束频率控制调度的保守性，而式(96)–(98)中的重构随 $N_{w/r}$线性增长。由于这些约束仅涉及连续变量，计算复杂度呈多项式增长，在线性松弛中约为 $\mathcal{O}((n + N_{w/r})^3)$。为评估可扩展性，测试了数据集规模为 $N_{w/r}$ 的不同场景。如表4所示，即使对于 $\theta = 0.0131$，10次运行的平均求解时间为1141.43 s，在实际中是可接受的。此外，较小的 θ 会降低保守性并带来更高的净利润。

5.2.2. 系统运行成本、*HP*收入与净利润

基于365个真实日运行场景， [3], 表5报告了CM2和所提方法下可再生电力制氢系统每日氢气产量、AFG的氨燃料消耗量，以及净产氢量（已考虑生产供AFG使用的氨燃料所消耗的氢气当量）的统计平均值。从系统角度来看，尽管在所提方法中预留频率支撑备用容量会降低氢气产量，但由热泵替代AFG提供一次调频和惯量支撑，使氨燃料消耗量较CM2降低了70.27%。将节省的氨燃料折算为氢当量后，所提方法的净产氢量更高，且系统净利润较CM2平均提高28.96%，如

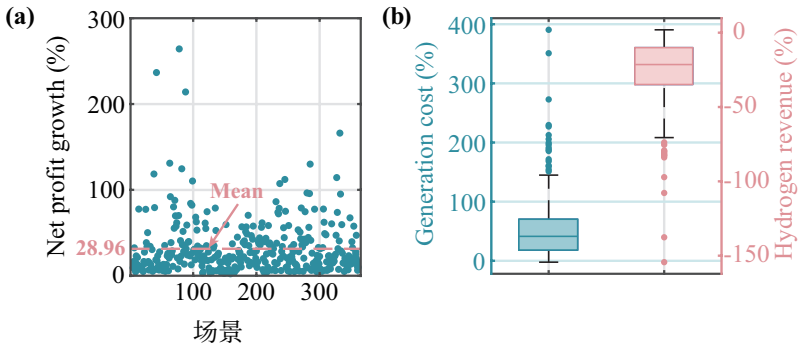

图14：大规模测试系统在365个日场景下的系统净利润相对提升情况。（a）净利润相对提升情况。（b）发电收入和制氢收入对净利润提升的贡献。

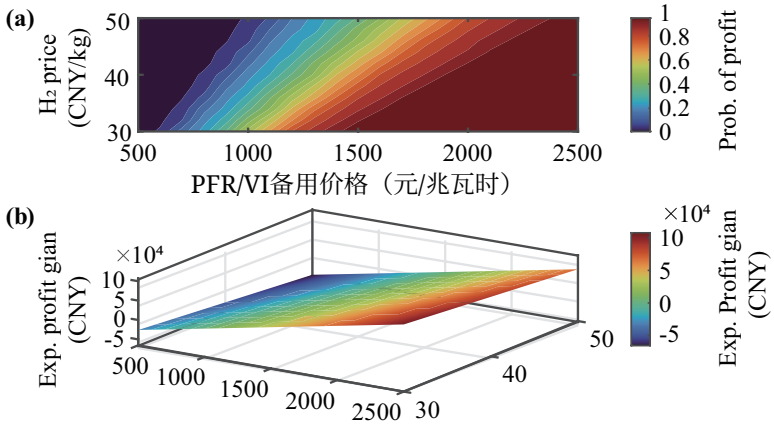

图15：在大规模测试系统下，与CM2相比，所提方法的HP利润改善概率和预期收益。

图14(a)所示。图14(b)进一步表明，利润增幅中有54.57%来自发电成本降低，而氢气产量减少则抵消了26.08%的增幅。

尽管上述分析是从系统层面单个经济实体的视角开展的，但评估热泵作为单个利益相关者的经济可行性也具有实际意义 [4]。在这种情况下，假设提供一次调频和虚拟惯量可获得报酬，相应补偿视为热泵的频率调节收入。令 $C^{\mathrm{H_2}}{}_{\text{所提方法}}$ 下的氢能收入和频率调节收入分别为 $C^{\mathrm{Freq}}{}_{\text{热泵}}$，令 $C^{\mathrm{H_2}}{}_{\mathrm{CM2}}$ 下的氢能收入为。所提方法下热泵的利润为：$C_{\mathrm{PM}}^{\mathrm{HPRev}} = C^{\mathrm{H_2}}{}_{\text{所提方法}} + C^{\mathrm{HPFreq}}$. 当 $C^{\mathrm{Freq}}{}_{\text{热泵}} > C^{\mathrm{H_2}}{}_{\mathrm{CM2}} - C^{\mathrm{H_2}}{}_{\text{所提方法}}$，热泵的净利润也高于 CM2。由于 $C^{\mathrm{H_2}}{}_{\text{所提方法}}$、$C^{\mathrm{Freq}}{}_{\text{热泵}}$ 和 C^{HPFreq} 取决于市场价格，我们评估了不同一次调频/虚拟惯量备用价格和氢气价格下热泵的利润改善概率及预期利润增益（$C^{\mathrm{Freq}}{}_{\text{热泵}} + C^{\mathrm{H_2}}{}_{\text{所提方法}} - C^{\mathrm{H_2}}{}_{\mathrm{CM2}}$）。如图 15 所示，当单位一次调频/虚拟惯量备用价格达到 971 人民币/MWh 时，

预期利润转为正值，使热泵能够通过频率调节进行套利。超过 1，500 人民币/MWh 后，利润为正的概率超过 50%，预期收益介于 1，493。3 至 37，033。1 人民币之间，具体取决于氢气价格。

6. 结论

本文提出了一种适用于离网可再生电力制氢系统的燃料电池调度框架，并为热泵集成了快速分阶段功率调节策略。该方法协调氢气生产与频率调节，使碱性水电解槽和质子交换膜电解槽能够提供分阶段且可靠的虚拟惯量和一次调频，同时保持生产的盈利能力。基于实际可再生能源制氢示范项目和大型系统开展的案例研究得出以下结论:

1）热泵的频率支撑能力与生产效率之间存在明显的权衡关系。虚拟惯量和一次调频容量取决于各电解槽的启停状态和负载水平，这些因素会直接影响氢气产量和效率。

2）将热泵建模为聚合电解槽，并将燃料电池调度与生产调度分开，可能导致频率支撑不足且不可靠。相比之下，所提出的集成框架能够确保提供稳定且充足的支撑，同时维持接近最优的氢气生产水平。

3）建议离网可再生电力制氢系统中的热泵积极参与频率调节。尽管为频率支撑预留备用容量会略微降低氢气产量，但热泵能够有效替代氨燃料发电机（AFG），提供一次调频和惯量支撑。与不采用基于热泵的频率支撑相比，这种替代可使AFG运行时间和燃料消耗降低70.27%，并使系统净利润提高28.96%，充分展现了基于电解槽的频率调节所具有的经济价值。

未来工作将研究频率调节对电解槽退化的影响，并确定氢能参与频率控制的最优水平，以平衡退化成本与系统效益。

致谢

作者衷心感谢中国国家重点研发计划（2021YFB4000503）和国家自然科学基金（52377116和52577129）的资助。

利益声明

无。

数据可用性

本研究相关数据可根据请求提供。

参考文献

[1] J. Li，J. Lin，J. Wang 等，重新设计中国氨和甲醇产业的电气化，以兼顾脱碳与电力系统安全，《自然能源》（2025年）1–12。

[2] E. Bianco，H. Blanco，《绿色氢能：政策制定指南》（2020年）。网址：https://www.h2knowledgecentre.com/content/researchpaper1616

[3] J. Zhu，Y. Qiu，Y. Zeng 等，在多时间尺度能源管理下探索离网可再生能源电转氢系统中构网型储能的最优规模，《应用能源》407（2026年）127295。

[4] Y. Zeng，Y. Qiu，J. Zhu 等，考虑异质灵活性的离网可再生能源制氨系统规划：多利益相关方均衡视角，IEEE电力系统汇刊 40（6）（2025年）4984–4999。

[5] Z. Yu、J. Lin、F. Liu 等，《含氨合成的孤立可再生能源电力系统优化容量配置：模型与求解方法》，IEEE电力系统汇刊 39 (5) (2024) 6372–6385。

[6] 中国能源建设，中国能源建设松原氢能产业园（2023年）。网址：http://www.ceehe.ceec.net.cn/art/2023/9/26/art59190__802.html

[7] Y. Zeng、Y. Qiu、L. Xu 等，《公用事业规模可再生能源电转氢系统中基于晶闸管和绝缘栅双极型晶体管的电解整流器最优投资组合》，IEEE《可持续能源汇刊》（提前访问）（2025年）1–14。

[8] AREA，Yuri可再生氢转氨项目，2025年。网址：https://arena.gov.au/projects/yuri-renewable-hydrogen-to-ammonia-project/[9] 氨能协会，《面向伊比利亚、欧洲和全球市场的可再生氢和氨》（2024年）。网址：https://ammoniaenergy.org/articles/renewable-hydrogen-and-ammonia-for-iberian-european-and-global-markets/

[10] Y. Lu, G. Yang, J. Liu等，《离网制氢系统的稳定性框架：稳态源荷平衡与暂态频率响应的协调控制》，《应用能源》390 (2025) 125807。

[11] M. Gong, H. Liu, Z. Chen等, 《面向逆变器主导电网的先进构网型（GFM）逆变器控制、建模与系统影响研究》, 报告, GE Vernova Operations, LLC, 纽约州尼斯卡尤纳（2024年9月）。[12] L. Li, C. Ning, G. Pan等, 《不确定性下耦合电-氢-氨微电网基于学习的运行风险规避型即时方案》, IEEE《可持续能源汇刊》16 (4) (2025)。[13] B. Kong, Q. Zhang, P. Daoutidis, 《配备绿色氨储能的独立微电网实时运行》, IEEE《控制系统技术汇刊》32 (4) (2024) 1463–1470。[14] Z. Chu, N. Zhang, F. Teng, 《微电网频率约束下的韧性调度：一种分布鲁棒方法》, IEEE《智能电网汇刊》12 (6) (2021) 4914–4925。[15] Z. Chu, G. Cui, F. Teng, 《软件定义微电网的最优频率调节调度》, IEEE《可持续能源汇刊》15 (3) (2024) 1715–1728。[16] G. Cui, Z. Chu, F. Teng, 《软件定义电网中的电网服务控制模式：跟网型与构网型》, IEEE电力系统汇刊40 (1) (2024) 314–326。[17] Y. Qiu, B. Zhou, T. Zang等, 《公用事业级电转氢设施的负荷灵活性扩展：考虑动态热效应和HTO杂质效应的最优生产调度》, 《可再生能源》217 (2023) 119198。[18] 欧洲输电系统运营商网络, 《电转氢（P2H_2）技术提供系统服务的潜力》, 报告（2022）。[19] X. Qiu, H. Zhang, Y. Qiu等, 《结合贝叶斯推断与自适应多项式代理模型的碱性电解系统动态参数估计》, 《应用能源》348 (2023) 121533。[20] X. Cheng, J. Lin, M. Zhang等, 《支持快速动态运行、带DC/DC接口的电解系统功率控制器设计：基于模型的实验研究》, 《应用能源》378 (2025) 124848。[21] M. B. Hossain, M. R. Islam, K. M. Muttaqi等, 《基于质子交换膜电解槽频率控制的电力系统动态性能分析》, IEEE 工业应用汇刊59 (4) (2023) 4998–5008。[22] M. G. Dozein, A. Jalali, P. Mancarella, 《公用事业级氢电解槽的快速频率响应》, IEEE《可持续能源汇刊》12 (3) (2021) 1707–1717。

[23] M. G. Dozein、A. M. De Corato、P. Mancarella，氢电解槽的虚拟惯量响应与频率控制辅助服务，IEEE电力系统汇刊 38 (3) (2022年) 2447–2459。[24] C. Huang、Y. Zong、S. You 等，风电主导的电氢系统中用于频率支撑的电网级碱性电解槽厂解析建模与控制，IEEE《可持续能源汇刊》14 (1) (2022年) 217–232。[25] A. Guan、S. Zhou、W. Gu 等，多堆碱性水电解槽厂的频率响应系数最优分配策略，国际氢能杂志 89 (2024年) 151–160。[26] X. Cheng、J. Lin、F. Liu 等，参与辅助服务市场的风电-电解联合系统协调频率调节与竞价方法，IEEE《可持续能源汇刊》14 (3) (2023年) 1370–1384。[27] Z. Wu、J. Wang、M. Zhou 等，激励电转氢提供频率服务以提升电网韧性，IEEE 工业信息学汇刊 19 (9) (2022年) 9370–9381。[28] C. Li、Z. Ren、W. Li，考虑不确定性的包含加氢站的多类型频率调节辅助服务定价方法，国际氢能杂志 152 (2025年) 150200。[29] C. Li、Z. Ren、W. Li，基于CVaR-瓦瑟斯坦度量的考虑制氢站频率支撑的电力系统调度，IEEE 工业应用汇刊 61 (2) (2025年) 2025–2036。[30] H. Hu、F. Chen、Y. Xu 等，采用质子交换膜和碱性电解槽的太阳能供电混合氢能系统三级经济型容量优化，能源 (2025年) 137647。[31]M. Agredano-Torres、Q. Xu，面向低惯量电网频率调节的混合氢电解槽-超级电容器系统分散式功率管理，IEEE 工业电子学汇刊 72 (8) (2025年) 8072–8081。[32] J. Dang、F. Yang、Y. Li 等，质子交换膜电解槽的瞬态行为与数学模型，电源杂志 542 (2022年) 231757。[33] Y. Li、X. Deng、T. Zhang 等，大型碱性水制氢系统多电解槽混合系统的配置与运行规则探索，《应用能源》331 (2023年) 120413。[34] Y. Zheng、C. Huang、J. Tan 等，具有多电解槽的离网风电/氢能系统：优化运行策略，能源转换与管理 295 (2023年) 117622。[35] J. Li、B. Yang、J. Lin 等，并网多堆电转氢站的双层能量管理策略，《应用能源》367 (2024年) 123413。

[36] Y. Zheng、S. You、H. W. Bindner 等，考虑热电特性与状态转变动态的碱性电解槽系统日前调度优化，《应用能源》307 (2022年) 118091。[37] Y. Zeng、Y. Qiu、J. Zhu 等，可再生能源电转氢系统中多个工业电解槽的调度：协调有功-无功功率管理方法，IEEE《可持续能源汇刊》16 (1) (2025年) 201–215。[38] L. Sha、J. Lin、R. Qi 等，动态运行中碱性电解堆的半经验等效电路模型与能量损耗评估，国际氢能杂志 138 (2025年) 859–873。[39] L. Sha、J. Lin、R. Qi、Y. Song，基于等效电路模型测量多单元电解堆电双层电容的低频实验方法，电源杂志 579 (2023年) 233263。[40] V. Trovato、A. Bialecki、A. Dallagi，具有惯量依赖性和多速率分配的频率响应服务机组组合，IEEE电力系统汇刊 34 (2) (2019) 1537–1548。[41] Z. Yu、J. Lin、F. Liu 等，具有氨合成的孤立可再生能源电力系统最优容量配置：模型与求解方法，IEEE电力系统汇刊 39 (5) (2024年) 6372–6385。[42] L. Badesa、F. Teng、G. Strbac，电力系统调度中的区域频率稳定性条件——第二部分：在机组组合中的应用，IEEE电力系统汇刊 36 (6) (2021年) 5567–5577。[43] E. A. Ducoin、Y. Gu、B. Chaudhuri、Others，构网型和跟网型逆变器对频率稳定性贡献的解析设计，IEEE电力系统汇刊 39 (5) (2024年) 6345–6358。[44] M. Farivar、S. H. Low，支路潮流模型：松弛与凸化——第一部分，IEEE电力系统汇刊 28 (3) (2013) 2554–2564。[45] A. Bemporad、M. Morari，集成逻辑、动态与约束的系统控制，自动化 35 (3) (1999) 407–427。[46] C. Duan、W. Fang、L. Jiang 等，基于Wasserstein度量的分布鲁棒机会约束近似交流最优潮流，IEEE电力系统汇刊 33 (5) (2018) 4924–4936。[47] S. Zymler、D. Kuhn、B. Rustem，具有二阶矩信息的分布鲁棒联合机会约束，Math. Program. 137 (1) (2013) 167–198。[48]国际电工委员会，IEC TS 62898-3-4:2023 – 微电网 – 第3-4部分：技术要求 – 保护与动态控制，[在线]。可访问：https://webstore.iec.ch/en/publication/67711 (2023年)。

[49] M.Farrokhabadi、C. A.Canizares、J.W. Simpson-Porco 等，《微电网稳定性的定义、分析与案例》，IEEE电力系统汇刊 35 (1) (2019) 13–29。