DOI: 10.19666/j.rlfd.202509042

热泵辅助-有机朗肯循环协同氢储能的数据中心绿色能源系统集成设计

任露露[1]，严儒井[1]，吴 谋[2]，何 宇[1]，张 靖[1]
（1. 贵州大学电气工程学院，贵州 贵阳 550025；
2. 华中科技大学电气与电子工程学院，湖北 武汉 430074）

［摘 要］【目的】绿电直供数据中心配置氢储能和余热回收是应对可再生能源波动和提升能源效率的有效路径，但需要验证该路径促进数据中心能源系统运行性能提升和降低运行成本的可行性。【方法】基于此，提出采用热泵辅助-有机朗肯循环对数据中心进行余热回收并用于发电，利用氢储能保障可再生能源波动场景下数据中心的电力供需平衡。随后，建立其能-㶲-经济模型，基于中国贵阳市 2023 年气象数据，评估其在月和年时间尺度上的运行性能；采用敏感性分析探究不同服务器利用率及 6 种低全球变暖潜能值(global warming potential，GWP）工质对整体性能的影响。【结果】结果表明，系统能量和㶲效率分别为 57.12%和 55.36%，数据中心能源使用效率和再利用效率分别为 1.3 和 0.74。经济性分析表明，系统的动态投资回收期为 6 年，净现值为 174.96 万元。服务器利用率 90%时，低 GWP 的 R161/Pentane 工质组合性能优于高 GWP 的 R134a/R245fa 工质。【结论】通过余热回收与氢储能协同可实现技术经济性能提升，为数据中心运营商投资建设绿电直连配套能源系统提供了技术路径。

［关 键 词］数据中心；氢储能；余热回收；热泵辅助-有机朗肯循环；能-㶲-经济性能

［引用本文格式］任露露，严儒井，吴谋，等. 热泵辅助-有机朗肯循环协同氢储能的数据中心绿色能源系统集成设计[J]. 热力发电, 2026, 55(6): 39-51. REN Lulu, YAN Rujing, WU Mou, et al. Integrated design of green energy system for data center with heat pump assisted-organic Rankine cycle collaborative hydrogen storage[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(6): 39-51.

Integrated design of green energy system for data center with heat pump assisted-organic Rankine cycle collaborative hydrogen storage

REN Lulu[1], YAN Rujing[1], WU Mou[2], HE Yu[1], ZHANG Jing[1]
(1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] Configuring hydrogen energy storage and waste heat recovery in data centers directly powered by green electricity constitutes an effective approach to mitigate renewable energy intermittency and improve overall energy efficiency. This study aims to verify the technical and economic feasibility of this strategy in enhancing the operational performance of data center energy systems and reducing operating costs. [Methods] Accordingly, a heat pump-assisted organic Rankine cycle is proposed to recover data center waste heat for power generation. At the same time, hydrogen energy storage is used to maintain power supply-demand balance amid fluctuations in renewable energy. Subsequently, an integrated energy-exergy-economic model is developed, and system performance is evaluated at monthly and annual time scales using 2023 meteorological data from Guiyang, China. Furthermore, a sensitivity analysis is conducted to investigate the impacts of varying server utilization rates and six low global warming potential (GWP) working fluids on overall system performance. [Results] The results

收 稿 日 期：2025-09-23 修 回 日 期：2025-12-26 接 受 日 期：2026-01-09 网络首发日期：2026-05-20
基 金 项 目：国家自然科学基金项目（52406227）
Supported by：National Natural Science Foundation of China (52406227)
第一作者简介：任露露（1998），女，硕士研究生，主要研究方向为多能互补集成与运行优化，gs.renll23@gzu.edu.cn。
通信作者简介：严儒井（1990），男，博士，副教授，主要研究方向为综合能源系统供需协调优化调度，rjyan@gzu.edu.cn。

demonstrate that the system achieves energy and exergy efficiencies of 57.12% and 55.36%, respectively, with a data center energy usage effectiveness of 1.3 and an energy reuse effectiveness of 0.74. Economic analysis indicates a dynamic payback period of 6 years and a net present value of 1.749 6 million yuan. Notably, at a server utilization rate of 90%, the low-GWP R161/Pentane working fluid pair outperforms the high-GWP R134a/R245fa combination. [Conclusion] The synergistic integration of waste heat recovery and hydrogen energy storage effectively improves techno-economic performance, providing a viable technical pathway for data center operators to invest in and deploy supporting energy systems for direct green electricity supply.
Key words: data center; hydrogen energy storage; waste heat recovery; heat pump assisted-organic Rankine cycle; energy-exergy-economic performance

在全球数字基础设施扩张背景下，数据中心的能耗、运行成本和碳排放急剧增加[1]。预计到 2030 年，其电力需求将占全球电力需求的 1/5[2]。在数据中心的电力消耗中，用于算力运行和系统冷却分别占 40%，且多依赖于电网一次能源，致使高能耗和高碳排放，成为制约行业发展的重要因素[3]。此外，其消耗的电力几乎都转化为余热并释放到环境中，余热直接排放既降低能源效率，也对环境产生负面影响[4]。因此，在全球“碳中和”的愿景下，对数据中心余热进行有效利用并采用绿电直供对于数据中心提升能源效率、降低碳排放至关重要[5]。

对于数据中心的余热利用，鉴于其不间断运行、规模庞大和高热通量密度特征，产生的余热可作为稳定热源用于提升能源效率和降低运行成本[6]。当前，研究主要将这部分余热用于满足电热需求。热需求包括区域供热[7]、吸收式冷却[8]和粮食干燥[9]。值得注意的是，数据中心余热温度约 50~60 ℃，难以满足更高品位热需求，因此可通过热泵将低品位余热提升至指定温度[10]。文献[11]利用空气源热泵将数据中心余热提升至 69 ℃用于烟草干燥，结果显示能源再利用效率可提升 64.92%，成本与碳排放分别降低 21.00%和 16.80%。此外，文献[12]建立了集成热泵的数据中心区域供热系统，对北京某小型数据中心进行案例研究，结果表明，供暖季节的性能系数（coefficient of performance，COP）达 5.27。然而，这些途径仅能将余热用于供暖、预热原料等低附加值用途，难以满足用电需求。因此，有研究[13]利用这部分余热驱动有机朗肯循环提供电力，发电过程无需额外消耗燃料，减少了碳排放。文献[14]通过数据中心余热回收驱动有机朗肯循环发电，发现热源温度从 43 ℃提高到 81 ℃时，有机朗肯循环效率从 1.9%提高到 4.6%。然而，其忽略了数据中心热源温度过低，无法直接驱动有机朗肯循环发电。热泵辅助−有机朗肯循环（heat pump assisted-organic rankine cycle，HPA-ORC）是一种将低品位余热升温并用于发电的有效途径，其净发电功率与余热回收量较无热泵的有机朗肯循环分别提升 9.37%和 12.04%[15]。

在数据中心绿电供应方面，文献[16]利用太阳能与生物质为数据中心供能并进行容量配置，结果显示，燃气轮机与内燃机的容量利用率可提升到 81.34%，整体效率为 41.33%。然而，其忽略了考虑生物质发电系统复杂造成的成本问题。文献[17]提出基于 Copula 理论的风光联合概率建模方法对数据中心综合能源系统进行双层优化配置，结果表明，系统总成本和碳排放分别降低 8.4%和 7.6%，绿电消纳率提升至 95.7%。此外，文献[18]聚焦于大型数据中心供能系统中储能设备的配置优化，发现当风光装机容量小于 1 500 kW 时，不建议配置储能系统；若装机容量超过一定值时，加入蓄电池可提高效益。然而，理想的情景是数据中心 100%依赖绿电，实现零碳排放[19]。由于绿电数据中心直供方案中可再生能源的间歇性和波动性严重限制其电力稳定供应，因此寻求一种具有发展前景的储能途径显得十分重要。

氢作为一种可持续能源载体，可通过大规模长周期储能充分消纳风光弃电生产绿氢，支撑绿电直供数据中心的稳定运行[19]。文献[20]提出氢燃料电池耦合数据中心余热回收的制氢系统，使系统总成本和碳排放量分别降低了 4.2%和 5.38%。文献[21]提出一种考虑数据中心余热回收和氢能利用的随机分布鲁棒韧性规划方法，结果表明，考虑氢储能的投资成本有所提高，但运行成本大幅下降，总成本降低 1.8%。此外，余热回收促进了电、氢、热的多能互补，使得投资成本和总成本分别下降了 11.8%和 10.4%。然而，这些研究忽略了数据中心余热温度过低问题[10]，仅将这部分热量进行量上的回收，未采取有效途径将其提升至目标温度后再行利用。

近期关于数据中心能源系统的研究集中在余

热利用、风光等可再生能源的容量配置和利用储能应对可再生能源的间歇性，很少有研究考虑在完全依赖绿电的条件下探索 HPA-ORC 余热回收与氢储能的协同潜力和技术经济可行性。尽管一些研究探索了数据中心余热回收耦合氢储能的技术经济可行性，但忽略了其余热温度过低的问题，仅将这部分热量进行量上的回收，未采取有效途径将其提升至目标温度后再行利用。为此，本文提出了一种采用 HPA-ORC 将数据中心余热提升至目标温度用于发电，并通过氢储能确保在可再生能源波动下的数据中心电力供需平衡的数据中心能源系统及其运行策略；建立其能-㶲-经济模型，并基于中国贵阳市 2023 年气象数据在月和年时间尺度评估其运行性能。此外，采用敏感性分析探究不同服务器利用率及 6 种低全球变暖潜能值（global warming potential，GWP）工质对整体能源系统性能的影响。

1 数据中心能源系统介绍

1.1 系统架构

可再生能源驱动的数据中心能源系统如图 1 所示。该系统由数据中心余热回收系统、HPA-ORC、风光发电系统及制氢发电系统 4 部分构成。运行时，以液冷技术回收服务器机架余热，经蒸发器将热量输入 HPA-ORC 热泵。在热泵中，制冷剂（R134a）于蒸发器吸热转为低压蒸汽（状态 2），随后进入压缩机转为高压蒸汽（状态 3），通过中间换热器向有机朗肯循环传热，自身冷却为高压液态工质（状态 4），之后经膨胀阀降压为低压两相混合物（状态 1），重回蒸发器，完成热泵循环。此外，在有机朗肯循环中，中间换热器提供的 90 ℃热量驱动工质（R245fa）蒸发为高温、高压蒸汽（状态 5），经涡轮机膨胀做功发电（状态 9）；涡轮机出口蒸汽（状态 6）进入冷凝器，经冷却介质冷却成液态工质（状态 7），由泵加压（状态 8）返回中间换热器，完成循环。

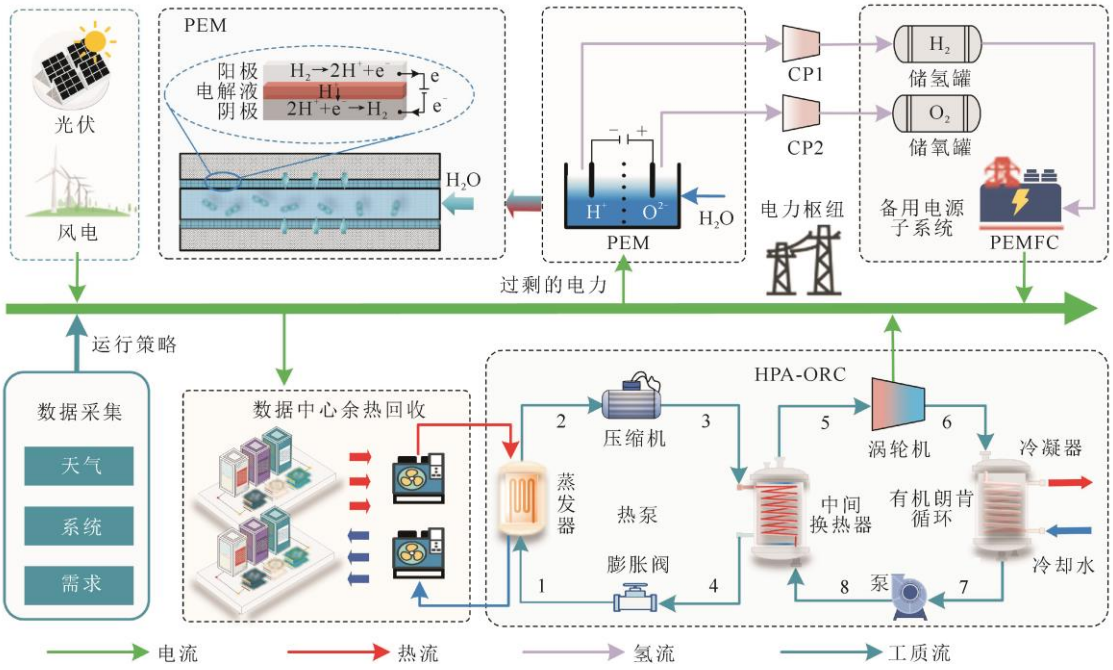


图 1 数据中心综合能源系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the integrated energy system of the data center

1.2 运行策略

拟议运行策略旨在保障数据中心电力稳定供应，系统运行流程如图 2 所示。系统总电力输出含光伏机组（photo voltaic，PV）、风力涡轮机（wind turbine，WT）及 HPA-ORC 发电，优先满足数据中心负荷；盈余时，多余电力经质子交换膜（proton exchange membrane，PEM）电解制氢设备制氢，储于储罐；当电力输出无法满足需求时，通过质子交换膜燃料电池（proton exchange membrane fuel cell，PEMFC）补能。总体而言，将氢储能与 HPA-ORC 余热回收结合，既可保障数据中心能源系统电力平衡，缓解可再生能源间歇性，还能降低储氢系统配置成本并满足安全要求。本系统由数据中心运营方投资建设，其收益来源于余热回收发电、绿电盈余

制氢售氢等场景，用于满足数据中心降本提效、减碳适配的需求。

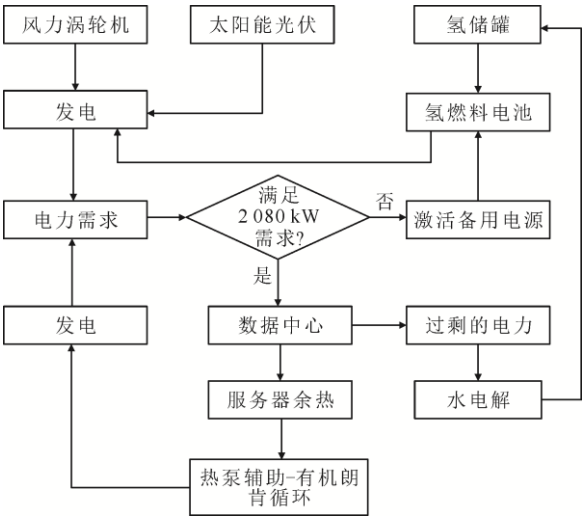


图 2 系统运行流程

Fig.2 System operation process

2 模型建立

2.1 热力学模型

本节将阐述各子系统的热力学模型及系统评估标准。为便于模型构建，做如下假设：1）环境温度和压力分别为 25 ℃和 101.3 kPa；2）为简化建模，忽略储罐的能量损失；3）泵和蒸汽轮机绝热运行，而压缩机等温运行。

2.1.1 数据中心余热回收子系统

通过液冷技术直接捕获数据中心中 IT 设备运行时产生的低品位废热，并传递至外部循环系统，用于能源回收利用，数据中心的设计参数见表 1。液冷式冷板出口的温度为[22]：

$$T_{\mathrm{w,o}}=T_{\mathrm{w,i}}+\frac{Q_{\mathrm{w}}}{\rho_{\mathrm{w}}\cdot c_{p,\mathrm{w}}\cdot V_{\mathrm{w}}} \tag{1}$$

式中：$T_{\mathrm{w,o}}$ 和 $T_{\mathrm{w,i}}$ 分别表示水的进、出口温度，℃；Q_{w} 为所有液冷服务器的散热量总和，kW；V_{w} 为所有服务器的水流总和，GPM；$c_{p,\mathrm{w}}$ 为水比热容，J/(kg·℃)；ρ_{w} 为水密度，kg/m^3。

从数据中心回收并供给 HPA-ORC 的余热量（$Q_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}}$，kW）和㶲（$Ex_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}}$，kJ/kg）可定义为：

$$Q_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}}=m_{\mathrm{w}}\cdot c_{p,\mathrm{w}}\cdot\Delta T_{\mathrm{w}} \tag{2}$$

$$Ex_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}}=Q_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}}(1-(T_0/T_{\mathrm{w,i}})) \tag{3}$$

式中：m_{w} 表示数据中心中冷却水的质量流量，kg/s；ΔT_{w} 表示冷却水进出口的温差，℃；T_0 为环境温度，℃。

表 1 数据中心设计参数

Tab.1 Design parameters of the data center

参数	数值	参数	数值
液冷机架数量	100	每台服务器散热量/W	325
每个机架中服务器数量	40	水的密度/(kg·m^{-3})	983.191
服务器最大总水流量/GPM	105[22]	水的比热容/(J·(kg·℃)$^{-1}$)	4 182
液冷机架进口温度/℃	40~65[22]	液冷机架出口温度/℃	50~60[10]

采用能源使用效率（power usage efficiency，PUE）评估数据中心的运行性能，定义为数据中心的总能耗（P_{DC}，kW）与 IT 负载能耗（P_{IT}，kW）的比值。PUE 值越小，说明数据中心能源效率越高。同时，因 PUE 未考虑余热利用及热泵等额外耗电，故引入能源再利用效率（energy reuse efficiency，ERE）评估数据中心余热利用能效。PUE 及 ERE 定义如下[23-24]：

$$\mathrm{PUE}=\frac{P_{\mathrm{DC}}}{P_{\mathrm{IT}}}=\frac{P_{\mathrm{IT}}+P_{\mathrm{cooling}}+P_{\mathrm{other}}}{(Q_{\mathrm{w}}/\eta_{\mathrm{cwc}})} \tag{4}$$

$$\mathrm{ERE}=\frac{P_{\mathrm{DC}}+W_{\mathrm{comp}}+W_{\mathrm{pump}}-Q_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}}}{P_{\mathrm{IT}}} \tag{5}$$

式中：η_{cwc} 表示冷却水循环效率，为 0.9；P_{cooling} 和 P_{other} 分别表示冷却设备和其他设备的耗电量，kW。

2.1.2 热泵辅助-有机朗肯循环子系统

热泵主要用于将数据中心的余热提升至有机朗肯循环可利用的温度，主要包括热泵和有机朗肯循环。有关能量平衡方程如下：

$$Q_{\mathrm{cond}}=Q_{\mathrm{evap}}+W_{\mathrm{comp}}=m_{\mathrm{ref}}(h_4-h_3) \tag{6}$$

$$Q_{\mathrm{evap}}=Q_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}}=m_{\mathrm{ref}}(h_2-h_1) \tag{7}$$

式中：Q_{cond}、Q_{evap} 和 W_{comp} 分别表示冷凝器传热功率、蒸发器传热功率和压缩机功耗，kW；m_{ref} 为制冷剂质量流量，kg/s；h_i 表示热泵循环不同位置（图 1）制冷剂的焓值，kJ/kg。

此外，压缩机的耗电量（W_{comp}，kW）、COP 和第一定律效率（$\eta_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}}$）可定义为[25]：

$$\mathrm{COP}_{\mathrm{HP}}=\frac{Q_{\mathrm{cond}}}{W_{\mathrm{comp}}}=\frac{Q_{\mathrm{cond}}}{(m_{\mathrm{ref}}\cdot(h_3-h_2))/(\eta_{\mathrm{me}}\cdot\eta_{\mathrm{el}})} \tag{8}$$

$$\eta_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}}=\frac{P_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}}}{Q_{\mathrm{evap}}}=\frac{W_{\mathrm{NET,ORC}}-W_{\mathrm{comp}}}{Q_{\mathrm{evap}}} \tag{9}$$

式中：$P_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}}$ 表示 HPA-ORC 输出的净功率，kW；η_{me} 和 η_{el} 分别代表压缩机的机械效率和电气效率，分别设为 0.95 和 0.98[11]。

本研究中考察的有机工质包括 6 种制冷剂：

R134a、R245fa、R1234yf、R1234ze、R161 和 Pentane[26-28]。HPA-ORC 设计参数见表 2。

表 2 HPA-ORC 设计参数
Tab.2 Design parameters of HPA-ORC

参数	数值	参数	数值
蒸发器传热率/kW	1 440	中间换热器出口压力/MPa	8.700
蒸发器温度/℃	60	涡轮机出口压力/MPa	1.250
中间热交换器温度/℃	90	泵和压缩机效率/%	85
冷凝器出口温度/℃	20	涡轮机等熵效率/%	80
蒸发压力/MPa	1.765	热泵流量/(kg s^{-1})	10.5
冷凝压力/MPa	2.900	有机朗肯循环的流量/(mol s^{-1})	90.3

㶲损失根据每个组件入/出口处的㶲流量计算得到。由于余热回收过程中不会发生化学反应，势能和动能的影响可以忽略不计，因此制冷剂的㶲分析如下[29]：

$$Ex_{\mathrm{ref}} = m_{\mathrm{ref}}((h_{\mathrm{ref}} - h_{\mathrm{sta}}) - T_{\mathrm{sta}}(s_{\mathrm{ref}} - s_{\mathrm{sta}})) \tag{10}$$

在有机朗肯循环中，这里选择 R245fa 作为有机工质。相关的能量平衡方程表示如下：

$$W_{\mathrm{NET,ORC}} = W_{\mathrm{Turbine}} - W_{\mathrm{Pump}} = m_6 \cdot h_6 - m_5 \cdot h_5 - m_8 \cdot h_8 + m_7 \cdot h_7 \tag{11}$$

$$Q_{\mathrm{in,\,ORC}} = m_5(h_8 - h_5) \tag{12}$$

式中：W_{Pump} 表示水泵消耗的功率，kW；$W_{\mathrm{NET,ORC}}$ 和 $Q_{\mathrm{in,ORC}}$ 分别表示有机朗肯循环输出的净功率和输入的热量，kW；m_i 表示有机朗肯循环中第 i 条流股的制冷剂的流量，mol/s。

2.1.3 制氢发电子系统

质子交换膜 PEM 因其产氢纯度高、电流密度大、动态响应快、与可再生能源适配性好等特点[30]，多余的电力通过该 PEM 装置制氢，模型如下[31]：

$$P_{\mathrm{PEM}}^t = N_{\mathrm{PEM}} \cdot V_{\mathrm{PEM}} \cdot I_{\mathrm{PEM}}^t = P_{\mathrm{PV}}^t + P_{\mathrm{WT}}^t + P_{\mathrm{HPA\text{-}ORC}} - P_{\mathrm{DC}} \tag{13}$$

$$m_{\mathrm{H_2}}^t = \frac{0.5 M_{\mathrm{H_2}} \cdot I_{\mathrm{PEM}}^t}{F},\quad m_{\mathrm{O_2}}^t = \frac{0.25 M_{\mathrm{H_2}} \cdot I_{\mathrm{PEM}}^t}{F} \tag{14}$$

式中：N_{PEM} 为 PEM 电堆数量；P_{PEM}^t 为 PEM 提供的电力，kW；V_{PEM} 为单个电池堆的工作电压，1.9 V[32]；I_{PEM}^t 为电堆电流，A；$m_{\mathrm{H_2}}^t$ 为氢气的生产率，kg/s；F 为法拉第常数，96 486 C/mol；$M_{\mathrm{H_2}}$ 为氢的摩尔质量，2 g/mol。

当电力不足时，采用 PEMFC 的输出功率（P_{PEMFC}^t，kW）补充电力缺额（P_{shortage}^t，kW），有关定义如下[33]：

$$P_{\mathrm{PEMFC}}^t = \frac{P_{\mathrm{shortage}}^t}{\eta_{\mathrm{PEMFC}}} = N_{\mathrm{PEMFC}} \cdot E_{\mathrm{PEMFC}} \cdot I_{\mathrm{PEMFC}}^t \tag{15}$$

式中：η_{PEMFC} 为 PEMFC 的系统效率；N_{PEMFC} 为 PEMFC 电堆数量；E_{PEMFC} 为工作电压，为了简化建模，在本文中设置为 0.7 V。

此外，单个电池的氢气消耗率（$m_{\mathrm{PEMFC,H_2}}$，kg/s）可表示为：

$$m_{\mathrm{PEMFC,H_2}}^t = \frac{I_{\mathrm{PEMFC}}^t \cdot M_{\mathrm{H_2}}}{2F} \tag{16}$$

单个 PEM 和 PEMFC 的设计参数如表 3 所示[32]。

表 3 单个 PEM 和 PEMFC 的设计参数
Tab.3 Design parameters of single PEM and PEMFC

单个 PEM 电堆参数		单个 PEMFC 参数	
工作温度/℃	80	工作温度/℃	60~70
工作电压/V	1.9	工作电压/V	0.7
电流密度/(A cm^{-2})	2.0	电流密度/(A cm^{-2})	1.5
工作压力/MPa	0.3	工作压力/MPa	0.2
功率密度/(W cm^{-2})	1.26	系统效率	0.5

2.1.4 可再生能源发电子系统

本研究还对 PV 和 WT 进行了研究，设计参数见表 4。此外，考虑太阳辐照度和环境温度的影响，建立了太阳能光伏的热力学模型[34]。为简单起见，忽略了光谱和角度效应。太阳能光伏的输出功率由以下表达式确定：

表 4 PV 和 WT 的设计参数
Tab.4 Design parameters of PV and WT

	设计参数	符号	数值
PV	转换效率/%	η_{sta}	18.7
	太阳能电池的数量	N_{PV}	5 000
	单个电池的面积/m^2	A_{PV}	1.63
	功率温度系数/%/℃	γ	0.38
	电池的光学参数	$\tau\alpha$	0.81
WT	风力涡轮机的数量	N_{WT}	80
	单个风力涡轮机的转子面积/m^2	A_{WT}	52.81
	功率系数	C_{WT}	0.49
	机械效率/%	η_{WT}	90

$$P_{\mathrm{PV}}^t = N_{\mathrm{PV}} \cdot A_{\mathrm{PV}} \cdot \mathrm{DNI}^t \cdot \eta_{\mathrm{sta}} \cdot (1 + \gamma(T_{\mathrm{C}}^t - T_{\mathrm{sta}})) \tag{17}$$

$$T_{\mathrm{C}}^t = \frac{26.6 \cdot T_{\mathrm{a}} + \mathrm{DNI}^t \cdot [\tau\alpha - \eta_{\mathrm{sta}}(1 - \gamma \cdot T_{\mathrm{sta}})]}{26.6 + \gamma \cdot \eta_{\mathrm{sta}} \cdot \mathrm{DNI}^t} \tag{18}$$

$$Q_{\mathrm{sol}}^t = A_{\mathrm{PV}} \cdot \mathrm{DNI}^t \tag{19}$$

式中：P_{PV}^t 为 PV 的输出功率，kW；η_{sta} 为标准条件下的转换效率，%；N_{PV} 为太阳能电池的数量；A_{PV}

为单个电池的面积，m^2；DNI^t 为太阳辐照度，kW/m^2；γ为功率温度系数，%；T_c^t 为不考虑风速时的电池温度，℃；T_{sta} 为标准温度，℃；T_a 为环境温度，℃；$\tau\alpha$为电池的光学参数。

此外，WT 的约束为[35]：

$$P_{WT}^t=\begin{cases}0, & v<v_{in}\ \text{or}\ v>v_{off}\\ N_{WT}\cdot P_{output,WT}^t, & v_{in}\leqslant v<v_{rated}\\ N_{WT}\cdot P_{rated,WT}^t, & v_{rated}\leqslant v\leqslant v_{off}\end{cases} \tag{20}$$

式中：P_{WT}^t 为 WT 的总输出功率，kW；N_{WT} 为风力涡轮机的数量；$P_{rated,WT}^t$ 为单个涡轮机的额定功率，kW；v_{in}、v_{rated} 和 v_{off} 分别表示切入风速、额定风速和切出风速，分别为 3、12 m/s 和 25 m/s[36]。

采用典型的分段功率曲线计算风力涡轮机的输出功率（$P_{output,WT}^t$，kW）[37]。

$$P_{output,WT}^t=0.5\cdot\rho_{air}\cdot A_{WT}\cdot C_P\cdot v^3\cdot\eta_{WT} \tag{21}$$

$$\rho_{air}=1.293\cdot\frac{273.15}{T_a} \tag{22}$$

$$P_{wind}^t=0.5N_{WT}\cdot\rho_{air}\cdot A_{WT}\cdot v^3 \tag{23}$$

式中：ρ表示空气密度，kg/m^3；A_{WT} 表示单个风力涡轮机的转子面积，m^2；C_P 表示功率系数；v 为转子高度处的风速，m/s；η_{WT} 为风力涡轮机的机械效率；P_{wind} 为产生的风能，kW。此外，还考虑了环境温度对空气密度的影响。

2.2 经济模型

计算各组件的资本支出（capital expenditure，CAPEX）与运营支出（operation expenditure，OPEX）。CAPEX 定义如下：

$$\text{CAPEX}=C_{BM}+C_{CF}+C_{AF} \tag{24}$$

中：C_{BM} 为裸模块成本；C_{CF} 为应急不可预见费用，设置为 $0.107C_{BM}$；C_{AF} 为辅助设施的成本，设置为 $0.298C_{BM}$，万元。

成本估算需要考虑化学工程工厂成本指数（chemical engineering plant cost index，CEPCI）。所需时间（C_t，万元）为：

$$C_t=C_0\left(\frac{\text{CEPCI}_t}{\text{CEPCI}_0}\right) \tag{25}$$

式中：C_0 为基本时间的设备成本；CEPCI_t 和 CEPCI_0 分别表示所需时间的成本指数和基准时间的成本指数。成本按通胀修正至 2024 年，CEPCI_{2024} 为 844.10。总体而言，不同组件的裸模块成本如表 5 所示。

OPEX 计算公式如下：

$$\text{OPEX}=C_{RAM}+C_{UT}+C_{IM} \tag{26}$$

式中：C_{RAM} 代表原材料成本；C_{UT} 代表公用事业成本；C_{IM} 代表维护和保险成本，设置为 CAPEX 的 5%。

表 5 主要组件的采购和裸模块成本

Tab.5 Procurement and bare module costs of main components

组件名称	裸模块成本 C_{BM}/元	年份	CEPCI_0	文献
换热器	$6.534\,Q_{HE}$	2005 年	468.2	[38]
蒸发器	$6.534\,Q_{evap}$	2005 年	468.2	[38]
膨胀阀	$9\,624\,W_{Exp}$	2021 年	754.7	[38]
压缩机	$91\,565\,(W_{comp}/455)^{0.67}$	2018 年	603.1	[38-39]
中间换热器	$6.534\,Q_{IHE}$	2005 年	468.2	[38]
ORC	$2\,340\,W_{NET,ORC}$	2016 年	541.7	[40]
PEM	$1\,000\cdot P_{PEM}^t$	2017 年	567.5	[41]
氧气/氢气储罐	$295\,V_{tank}$	2019 年	607.5	[38]
PV	990 元/kW (CAPEX)	2022 年	816.0	[42]
WT	6 500 元/kW (CAPEX)	2021 年	796.1	[43]

此外，OPEX 估算的相关参数表 6 所示[35]。各组件的寿命如表 7 所示。

表 6 OPEX 估算的设计参数

Tab.6 Design parameters for OPEX estimation

项目	数值	年份	参考文献
系统寿命/年	30		
年利率/%	6		
工业电价/(元·MWh^{-1})	640.95	2024 年	[44]
氧气价格/(元·t^{-1})	1 220.84	2020 年	[31]
氢气价格/(元·kg^{-1})	62.08	2023 年	[45]
工艺用水/(元·t^{-1})	0.477		[31]

表 7 各组件的寿命

Tab.7 Service life of the components

组件名称	寿命/年	文献
系统	30	[46]
PV	30	[47]
WT	20	[48]
PEM	7	[49]
PEMFC	20	[50-51]
ORC	20	[52]

2.3 评估标准

1）能量效率（η_{en}^t）和㶲效率（η_{ex}^t）可定义为：

$$\eta_{en}^t=\frac{m_{H_2}^t\cdot\text{HHV}_{H_2}+\Delta E_{out}+Q_{HPA\text{-}ORC}}{Q_{sol}^t+P_{wind}^t} \tag{27}$$

$$\Delta E_{out}=P_{PV}^t+P_{WT}^t+P_{PEMFC}^t+P_{HPA\text{-}ORC}-P_{DC}-P_{PEM}^t \tag{28}$$

$$\eta_{ex}^t=\frac{m_{H_2}^t\cdot ex_{H_2}+Ex_{HPA\text{-}ORC}+\Delta E_{out}}{Q_{sol}^t+P_{wind}^t} \tag{29}$$

式中：Q_{sol}^{t} 和 P_{wind}^{t} 分别表示输入的太阳能和风能，kW；ex_{H_2} 为氢气的标准化学㶲，MJ/kg；HHV_{H_2} 为氢气的高位热值，其值为 142.0 MJ/kg[53]；ΔE_{out} 为输出电能，kW；$Ex_{HPA\text{-}ORC}$ 为数据中心向 HPA-ORC 供应的㶲，kJ/kg。

2）净现值（net present value，NPV）、正贴现现金流（discounted cash flow，PDCF）和现值比率（present value ratio，PVR）可定义为[54]：

$$PDCF=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{(1-t)}{(1+r)^{i}}\right)\cdot\sum_{i=1}^{n}((REV-OPEX-d_i)+d_i) \tag{30}$$

$$NPV=PDCF-CAPEX \tag{31}$$

$$d_i=\frac{2}{n}(CAPEX-\sum_{k=1}^{i-1}d_k) \tag{32}$$

$$PVR=\frac{NPV}{CAPEX} \tag{33}$$

式中：n 为使用寿命；REV 为年收入，万元；d_i 为折旧费用，万元；r 和 t 分别表示年利率和税率，本文中，二者分别设定为 6%和 30%[30]。

2.4 模型验证

为了验证 HPA-ORC 系统及氢能循环模型的准确性，将 HPA-ORC 的模拟结果与文献[26]、[27]中的研究结果进行对比，具体结果见表 8。将 PEM 的设计参数和模拟结果与参考文献[32]、[55]研究结果进行对比，结果见表 9。

表 8 HPA-ORC 不同工质组合仿真结果与文献[26-27]对比

Tab.8 Comparison of simulation results of different working fluid combinations for HPA-ORC with references [26] and [27]

HPA-ORC 工质组合	热泵性能系数 COP			误差/%	$\eta_{HPA\text{-}ORC}$/%			误差/%
	文献[26]	文献[27]	本文模型		文献[26]	文献[27]	本文模型	
R134a/R245fa	12.28	12.32	12.370	0.41/0.73	4.70	4.74	4.71	0.210/0.630
R1234ze/R1234ze		11.4	11.401	0.006		2.70	2.718	0.667
Pentane/Pentane		11.5	11.498	0.016		4.10	4.112	0.281
R161/Pentane		13.2	13.120	0.610		4.10	4.118	0.438

表 9 PEM 的模型仿真结果与参考文献[32]、[55]对比

Tab.9 Comparison of PEM model simulation results with references [32] and [55]

参数	文献[32]	文献[55]	本文	误差/%
工作电压/V	1.9	2.1	1.9	0/9.53
电流密度/(A cm^{-2})	2.1	2 A	2	
效率/%	76.76%（51.1 kW h/kg）	70.03	77.40	0.83/10.53

由表 8 可见，各项误差均小于 0.73%，验证了所建立 HPA-ORC 系统模型的准确性。此外，由表 9 可见，最大误差为 10.53%，其次为 9.53%。这主要是由于这项工作与文献[55]工作电压的区别，与参数相似的文献[32]相比，最大误差为 0.83%，验证了制氢模型的准确性。

3 结果与讨论

从能量、㶲和经济层面阐述整体系统及各子系统的性能，涵盖能量/㶲流分析、氢气产量评估、敏感性分析及 CAPEX 和 OPEX。为评估所提系统及其运行策略的性能，选取中国贵阳作为示范站点，其年逐时风速、环境温度和太阳辐射的初始数据如图 3 所示。

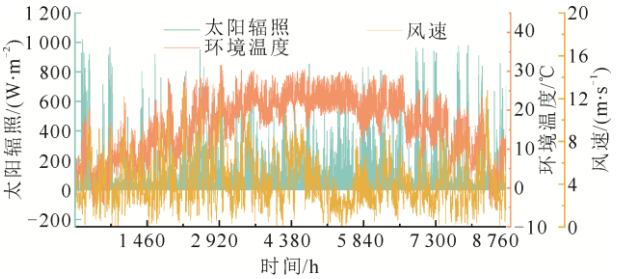


图 3 太阳能与风能的日均分配量及月度总分配量

Fig.3 Average daily and total monthly allocation of solar and wind energy

3.1 热力学性能

系统能流如图 4 所示。额定工况下，数据中心向 HPA-ORC 供应可回收热能 1 440 kW，HPA-ORC 则向系统传输电能 67.88 kW，其发电效率为 4.71%，且子系统内的能流由模拟过程所得焓值决定。太阳能与风能输入分别为 830.28 kW 和 4 489.49 kW，对应向系统输送的电功率为 158.89 kW 和 1 979.87 kW，能源效率分别为 18.41%和 44.10%；PEMFC 贡献电力 987.73 kW，能源效率为 69.99%，上述所有电力均汇入电力枢纽。该系统向电枢纽供应净电功率 3 194.07 kW，其中数据中心消耗 2 080 kW，剩余电

力用于 PEM 制氢，能源效率为 76.51%；所产氢气中的 762.81 kW 注入储氢罐，与储氢罐含有的初始储氢功率 648.24 kW 用于 PEMFC 发电。系统整体能源效率为 57.12%。

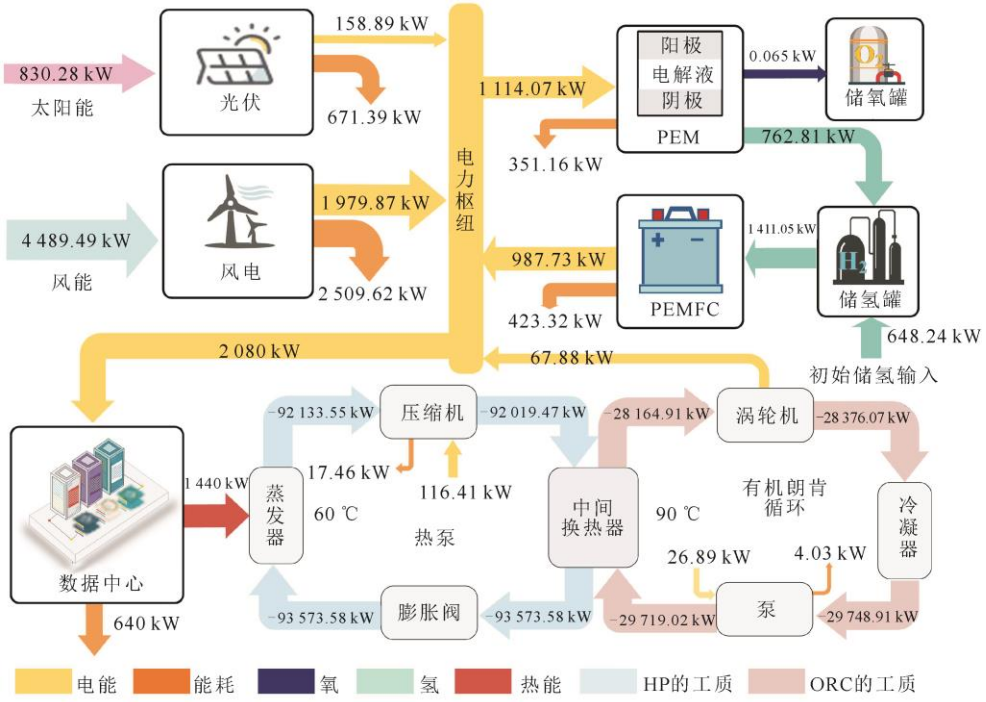


图 4 系统能量流动

Fig.4 Energy flow diagram of the system

系统㶲流如图 5 所示。额定工况下，数据中心向 HPA-ORC 提供㶲输入 151.28 kW，经其回收后向系统输送电能 67.88 kW，HPA-ORC㶲效率为 44.87%，㶲损失 83.62 kW。风光子系统能量效率与㶲效率一致，HPA-ORC 中㶲流基于模拟生成的物理㶲值计算。系统整体㶲效率为 55.36%。

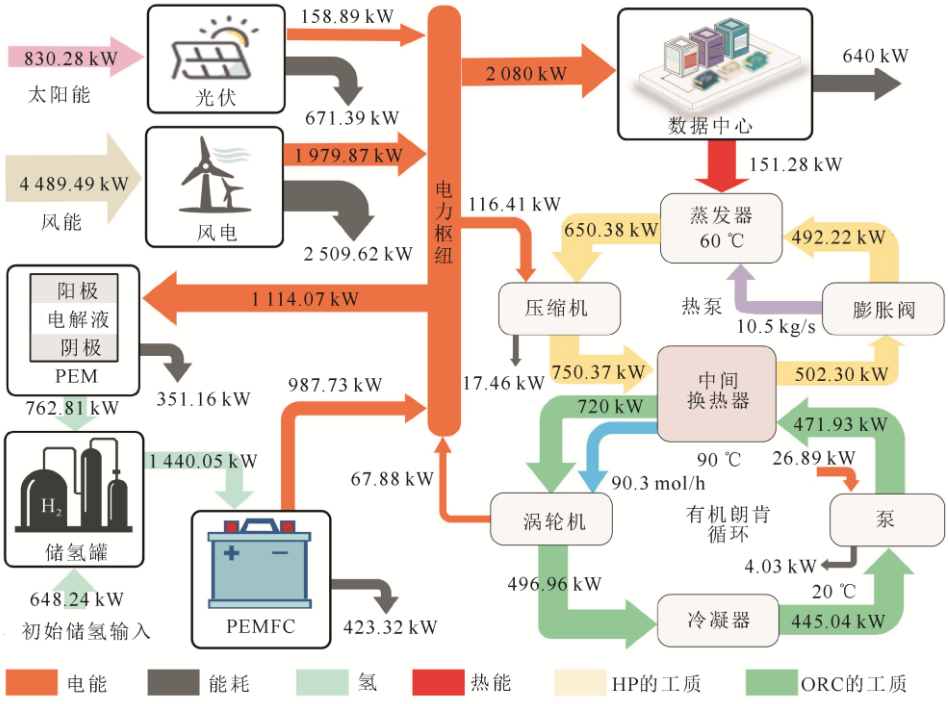


图 5 系统的㶲流动图

Fig.5 Exergy flow diagram of the system

图 6 展示了系统的氢产量和氧产量。如图 6a)所示，1 月—12 月产氢量在凌晨 1:00—6:00 较低，随后渐升，10:00—13:00 达峰值后下降，其中 5 月最高（25.38 kg/s），8 月最低（1.70 kg/s）。由图 6b)可见，氧气产量变化规律与氢气相似，总体春末夏初产量较高，秋季和冬季则下降。

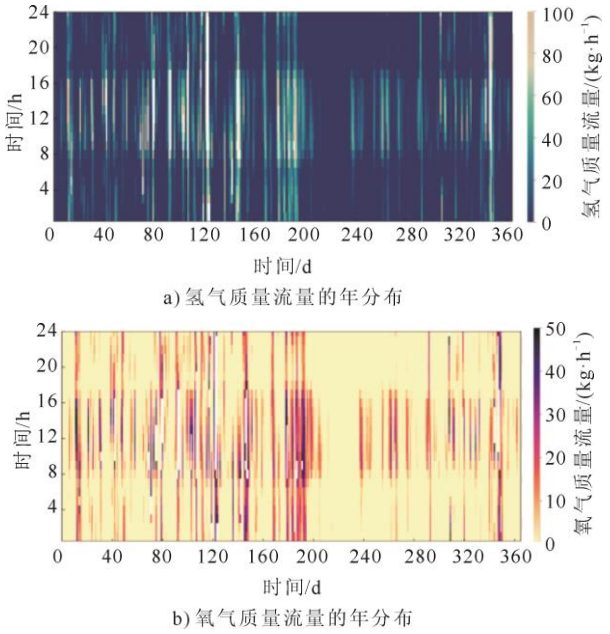


图 6 系统的氢产量和氧产量

Fig.6 Hydrogen production and oxygen production of the system

图 7 展示了月度电力平衡曲线。春夏季（如 4 月、5 月、6 月）风光发电量不仅能满足数据中心的电力需求，还会产生电力盈余。如 5 月的盈余量达到 1 758.89 kW·h，这些盈余电力用于 PEM 制氢/储氢。然而，在 8 月、9 月、10 月，系统会出现电力短缺（如 8 月缺 1 397.14 kW·h），这表明发电侧的电力无法满足用电侧的需求。此时，系统激活储氢罐并通过 PEMFC 发电弥补缺口。

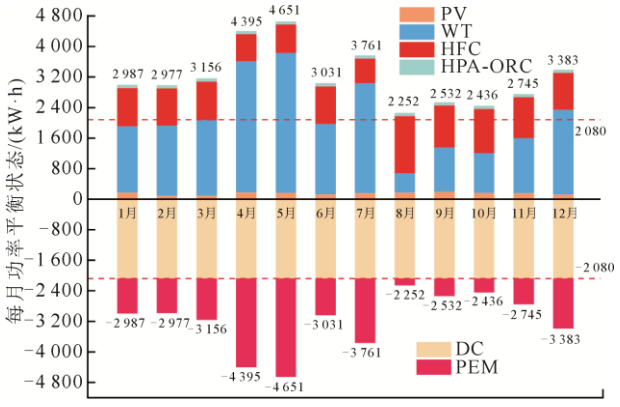


图 7 系统月度功率平衡图

Fig.7 Monthly power balance diagram of the system

3.2 敏感性分析

本研究通过敏感性分析，探究不同服务器利用率（server utilization rate，SUR）对系统热力学性能的影响，以及不同工质在不同条件下对系统性能的潜在作用。6 种工质在 SUR50%~90%范围内的第一定律效率如图 8 所示。由图 8a)可知，HPA-ORC 效率随 SUR 提高而上升，当 SUR 为 90%时，高 GWP 的 R134a/R245fa 组合效率最高（4.71%），其次是 R161/Pentane（效率为 4.66%）和 Pentane/Pentane（效率为 4.61%），低 GWP 的 R1234yf/R1234yf 组合效率最低（效率为 3.14%）。此外，R161/Pentane 性能优于其他低 GWP 工质，其 COP 比 R134a/R245fa 高 6.06%，比 Pentane/Pentane 高 14.10%；尽管 R161/Pentane 第一定律效率略低于 R134a/R245fa，但环境效益显著，且只需少量技术改造，是理想的低 GWP 替代工质。图 8b)显示 SUR 为 90%时 6 种工质的压缩机功耗：低 GWP 的 R1234ze/R1234ze 组合功耗最高（126.40 kW·h），R161/Pentane 和 R161/R161 组合功耗最低（110.14 kW·h），与 R134a/R245fa 相比，R161/Pentane 功耗降低约 5.43%。

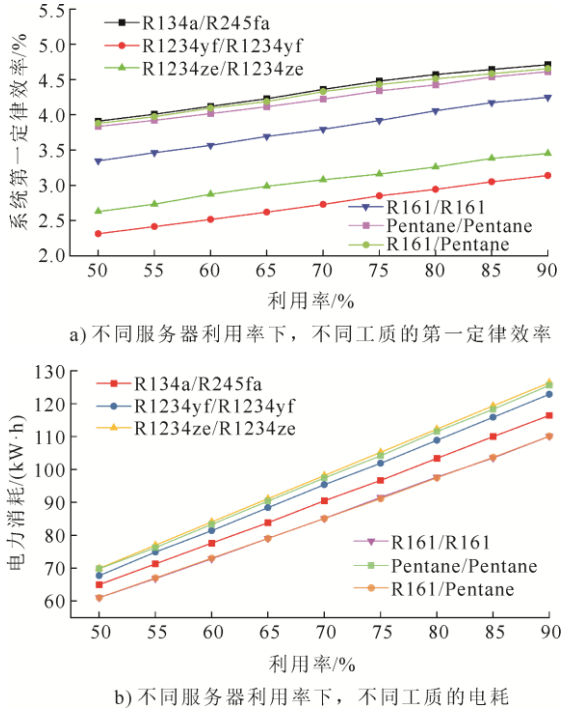


图 8 不同服务器利用率下系统不同工质的性能对比

Fig.8 Comparison of the performance of various working fluids in the system with different server utilization rates

总体而言，HPA-ORC 的第一定律效率和压缩机功耗均随 SUR 提高而上升。SUR 为 90%时，R134a/R245fa 和 R161/Pentane 在第一定律效率方面

表现优异，且 R161/Pentane 功耗最低。综合来看，R161/Pentane 性能优越且 GWP 值低，是一种极具应用前景的替代工质。

3.3 经济性能分析

图 9 展示了系统的 CAPEX 明细，占比最高的是 PEM 装置（23.47%）、储氢罐（20.03%）和辅助设施（19.28%），其费用分别为 1 118.82、954.61、918.97 万元。这主要是由于制氢量较大且设备本身成本较高。PV 和 WT 的总资本支出为 433.85 万元，占总投资成本的 9.10%。值得注意的是，热泵的资本支出主要包括蒸发器、压缩机和中间换热器成本，分别为 13.90（占比 0.29%）、1.22（占比 0.03%）、15.09 万元（占比 0.32%）。此外，有机朗肯循环的资本支出为 312.43 万元（占比 6.55%）。因此，HPA-ORC 的总资本支出为 342.64 万元，占总投资成本的 7.19%。PEMFC 的资本支出为 190.41 万元，占比 3.99%。

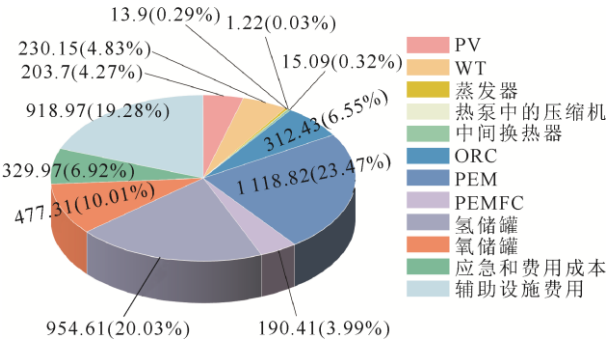


图 9 系统的 CAPEX 明细

Fig.9 CAPEX details of the system

图 10 展示了系统的 OPEX 明细。支出方面主要为维护和保险的支出，达 324.35 万元。收入方面，售氢收入 923.93 万元；售电收入 1 167.86 万元。用水成本接近 0，可忽略不计。结果表明，售电和售氢收入是系统收益的主要组成部分，对系统经济性能影响最为显著。

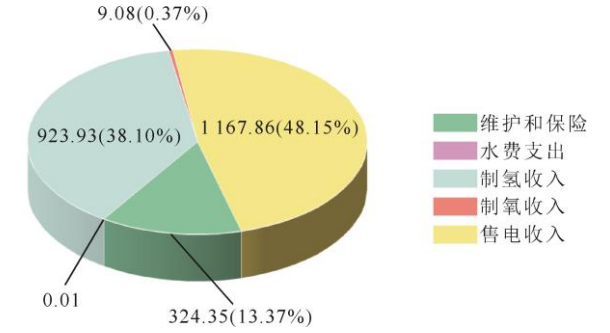


图 10 系统的 OPEX 明细

Fig.10 OPEX details of the system

图 11 为系统的 NPV 和 PDCF。拟议系统的贴现投资回收期为 6 年，表明数据中心在投资的第 6 年即可实现盈利。净现值达 174.96 万元，正贴现现金流为 941.44 万元。此外，WT、ORC、PEMFC 组件寿命为 20 年，届时需进行集中更换。PEM 寿命仅为 7 年，因此在其更换年份（第 7、14、21、28 年），PDCF 出现明显下降。在第 20 年，因 WT、ORC、PEMFC 等组件的集中更换，现金流冲击最为显著，PDCF 一度降至负值，之后又回升至正常水平。总体而言，该系统展现出优异的经济性能。

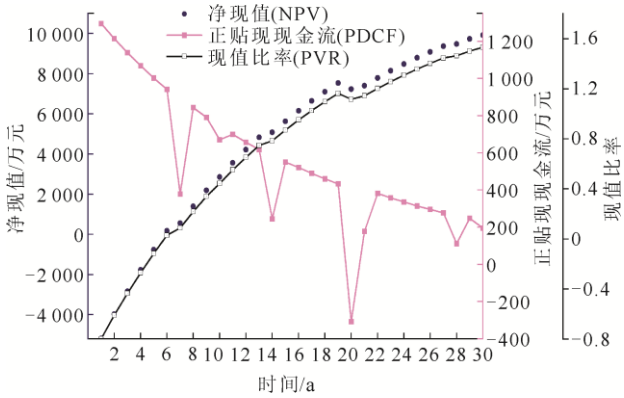


图 11 系统的 NPV 和 PDCF

Fig.11 NPV and PDCF of the system

图 12 和图 13 分别展示了部分系统的技术进步和经济性能的价格敏感性。由图 12 和图 13 可见：随着 PV 发电效率、PEM 制氢效率和 PEMFC 效率的提升，系统的能源效率也随之上升；而光伏、电力和氢价格下降后，系统的投资成本和运营支出也随之下降。总之，光伏发电与氢能循环技术的进步也将推动绿电直供数据中心运行成本的下降与可靠性的提升，因此含氢储能与余热回收的数据中心也将逐渐普及。

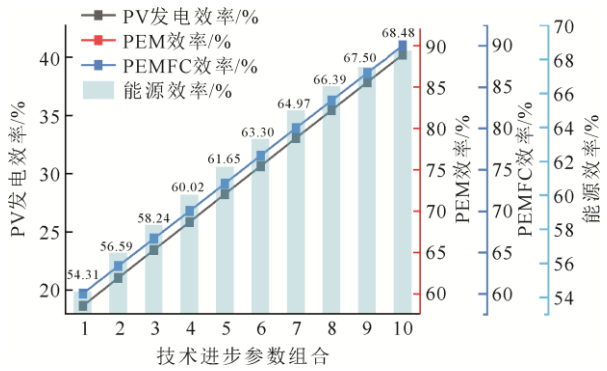


图 12 PV、PEM 和 PEMFC 的技术进步对总体能效的影响

Fig.12 Effects of technological advances in PV, PEM and PEMFC on overall energy efficiency

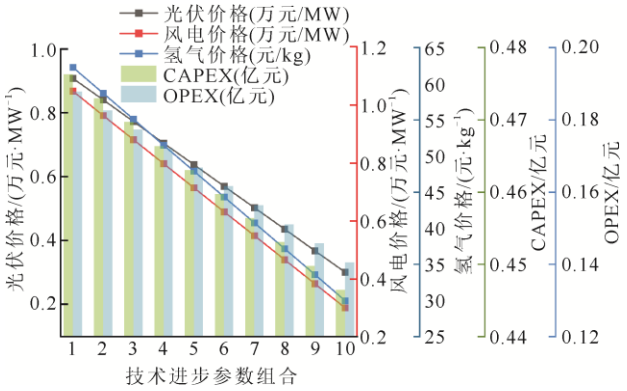


图 13 CAPEX 和 OPEX 对光伏、风电和氢价格的敏感性
Fig.13 Sensitivity of CAPEX and OPEX to the price of photovoltaic, wind power and hydrogen

4 结　论

为了探索在绿电直供数据中心场景下 HPA-ORC 与氢储能的协同潜力与技术经济优势，本文提出采用 HPA-ORC 进行余热回收和发电，并结合风光发电、氢储能及氢燃料电池协同运行，确保在可再生能源波动情况下数据中心的电力供需平衡。随后，建立其能-㶲-经济模型并基于中国贵阳市 2023 年气象数据在月和年时间尺度评估其运行性能。此外，采用敏感性分析探究不同服务器利用率及 6 种低全球变暖潜能值工质对整体性能的影响。主要结论如下。

1）在配置氢储能与余热回收后，绿电直供数据中心能源系统年均能量和㶲效率分别为 57.12%和 55.36%，PUE 为 1.3。回收余热后 ERE 从 1.3 降至 0.74，表明在数据中心中配置氢储能和余热回收系统可有效提升整体性能。

2）经济性分析结果表明，弃电用于制氢和工业用电后可实现 2 091.79 万元的额外收益，贴现投资回收期为 6 年，净现值 174.96 万元，表现出良好的经济性。同时，数据中心作为系统投资与运营主体，依托自身余热与绿电资源实现能源二次利用，获得显著经济收益，为行业能效升级提供了可复制的投资运营模式。

3）敏感性分析表明，服务器利用率 90%时，低 GWP 的 R161/Pentane 工质组合第一定律效率达 4.70%，功耗 110.14 kWh，热力学性能优于传统高 GWP 工质 R134a/R245fa，为工质选择提供了优化方向。

总之，随着氢储能成本的降低与数据中心总体规模的扩大，数据中心余热回收的潜力及经济优势将进一步扩大。未来的研究可考虑结合可再生能源技术的进步对绿电直供数据中心能源系统的精细化热管理发电潜力进一步研究。

［参 考 文 献］

［1］ 朱子恒，张策，丁肇豪，等. 数据中心纳入全国碳排放权交易市场机制研究[J]. 中国电机工程学报，2024, 44(14): 5562-5574.
ZHU Ziheng, ZHANG Ce, DING Zhaohao, et al. Research on the mechanism of integrating data centers into the national carbon emission rights trading market[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5562-5574.

［2］ KURTZ J, MA Z, SAUR G, et al. Analysis of hydrogen infrastructure for the feasibility, economics, and sustainability of a fuel cell powered data center[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 58: 103357.

［3］ HAO Y, ZHOU H, TIAN T, et al. Data centers waste heat recovery technologies: Review and evaluation[J]. Applied Energy, 2025, 384: 125489.

［4］ 白薪宇. 基于数据中心余热回收的综合能源系统集成及优化研究[D]. 北京：华北电力大学, 2024: 5.
BAI Xinyu. Integrated research and optimization of integrated energy system based on waste heat recovery of data center[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024: 5.

［5］ 张俊莲，杨传燕，张雪标. 基于有机朗肯循环的新型燃煤发电系统热力性能[J]. 热力发电，2025, 54(7): 144-152.
ZHANG Junlian, YANG Chuanyan, ZHANG Xuebiao. Thermal performance of a new coal-fired power generation system based on organic Rankine cycle[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(7): 144-152.

［6］ 黄琮琪，邵双全. 液冷数据中心余热驱动的压缩-吸收式制冷系统特性研究 [J]. 化工学报, 2025, 76(增刊 1): 326-335.
HUANG Congqi, SHAO Shuangquan. Study on characteristics of compression-absorption refrigeration system driven by waste heat of liquid-cooled data center[J]. CIESC Journal, 2025, 76(Suppl.1): 326-335.

［7］ YUAN X, LIANG Y, HU X, et al. Waste heat recoveries in data centers: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 188: 113777.

［8］ 葛立，韩宗伟，历秀明，等. 数据中心蒸气压缩-吸收式复合制冷系统工质对选取研究[J]. 制冷与空调，2024, 24(2): 72-77.
GE Li, HAN Zongwei, LI Xiuming, et al. Study on the selection of working fluid pairs for vapor compression-absorption hybrid refrigeration system in data centers[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2024, 24(2): 72-77.

［9］ ASAAD S M, INAYAT A, GHENAI C, et al. Integration of waste heat recovery with biomass thermal conversion processes: a review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 192: 567-579.

［10］ PAN Q, PENG J, WANG R. Application analysis of adsorption refrigeration system for solar and data center waste heat utilization[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 228: 113564.

［11］ GE Z, ZHOU Y, LI J, et al. Multi-objective optimization and benefit evaluation of heat pump system for tobacco drying using waste heat from data center[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 448: 141623.

［12］ ZHOU F, TIAN X, SONG Y, et al. Dynamic performance

of an integrated heat pump system coupled free cooling and waste heat recovery in data centers[J]. Energy, 2025, 323: 135838.

[13] 肖新文. 数据中心余热回收技术研究及应用进展[J]. 制冷与空调, 2025, 25(7): 57-71.
XIAO Xinwen. Research and application progress of waste heat recovery technology in data centers[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2025, 25(7): 57-71.

[14] ARAYA S, WEMHOFF A P, JONES G F, et al. Study of a lab-scale organic Rankine cycle for the ultra-low-temperature waste heat recovery associated with data centers[J]. Journal of Electronic Packaging, 2021, 143(2): 021001.

[15] YU H, GUNDERSEN T, FENG X. Process integration of organic Rankine cycle (ORC) and heat pump for low temperature waste heat recovery[J]. Energy, 2018, 160: 330-340.

[16] 陈付杰, 张婉琳, 程明, 等. 面向数据中心的生物质与太阳能互补冷电系统及容量配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(4): 1396-1406.
CHEN Fujie, ZHANG Wanlin, CHENG Ming, et al. Research on biomass and solar energy complementary cooling and power system and capacity configuration for data centers[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(4): 1396-1406.

[17] 李为润, 林永君, 刘卫亮, 等. 含数据中心综合能源系统双层容量优化配置[J]. 电力科学与工程, 2025, 41(5): 68-78.
LI Weirun, LIN Yongjun, LIU Weiliang, et al. Bi-level capacity optimal configuration of integrated energy system containing data centers[J]. Electric Power Science and Engineering, 2025, 41(5): 68-78.

[18] 赵石. 大型数据中心供能系统储能设备配置研究 [J]. 节能, 2025, 44(7): 80-84.
ZHAO Shi. Research on energy storage equipment configuration of energy supply system in large data centers [J]. Energy Conservation, 2025, 44(7): 80-84.

[19] 张诚, 檀志恒, 晁怀颇. “双碳”背景下数据中心氢能应用的可行性研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 327-334.
ZHANG Cheng, TAN Zhiheng, CHAO Huaipo. Feasibility study on hydrogen energy application in data centers under the “double carbon” background[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(6): 327-334.

[20] ZHAN Z, XU J, ZHANG T, et al. Optimal scheduling of integrated wind- photovoltaic-hydrogen energy system considering hydrogen application and waste heat recovery[J]. Energy Reports, 2024, 11: 3684-3694.

[21] 周亦洲, 李想, 孙国强, 等. 考虑余热回收的电-氢-热综合能源系统随机分布鲁棒韧性规划[J]. 电网技术, 2025, 49(6): 2243-2251.
ZHOU Yizhou, LI Xiang, SUN Guoqiang, et al. Stochastic distributionally robust resilience planning of electricity-hydrogen-heat integrated energy system considering waste heat recovery[J]. Power System Technology, 2025, 49(6): 2243-2251.

[22] GUPTA R, PURI I K. Waste heat recovery in a data center with an adsorption chiller: Technical and economic analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 245: 114576.

[23] QU S, DUAN K, GUO Y, et al. Real-time optimization of the liquid-cooled data center based on cold plates under different ambient temperatures and thermal loads[J]. Applied Energy, 2024, 363: 123101.

[24] LI J, YANG Z, LI H, et al. Optimal schemes and benefits of recovering waste heat from data center for district heating by CO_2 transcritical heat pumps[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 245: 114591.

[25] 宋睿哲, 叶学民, 董志坚, 等. 集成有机朗肯循环与碳捕集的太阳能-燃煤发电系统的变工况热力性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 177-187.
SONG Ruizhe, YE Xuemin, DONG Zhijian, et al. Off-design thermodynamic performance study of solar-coal-fired power generation system integrated with organic Rankine cycle and carbon capture[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 177-187.

[26] MARSHALL Z M, DUQUETTE J. A techno-economic evaluation of low global warming potential heat pump assisted organic Rankine cycle systems for data center waste heat recovery[J]. Energy, 2022, 242: 122528.

[27] EBRAHIMI K, JONES G F, FLEISCHER A S. The viability of ultra low temperature waste heat recovery using organic Rankine cycle in dual loop data center applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 393-406.

[28] LIU L, WU J, ZHONG F, et al. Development of a novel cogeneration system by combining organic Rankine cycle and heat pump cycle for waste heat recovery[J]. Energy, 2021, 217: 119445.

[29] GU X, DAI J, LI H, et al. Experimental and theoretical assessment of a solar assisted heat pump system for in-bin grain drying: A comprehensive case study[J]. Renewable Energy, 2022, 181: 426-444.

[30] 吴谋. 风光生多能互补电热冷氨多联产系统的集成研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2025: 3.
WU Mou. Integrated research on wind-solar-biomass multi-energy complementary electricity-heat-cooling-ammonia polygeneration system[D]. Guiyang: Guizhou University, 2025: 3.

[31] WEN D, AZIZ M. Techno-economic analyses of power-to-ammonia-to-power and biomass-to-ammonia-to-power pathways for carbon neutrality scenario[J]. Applied Energy, 2022, 319: 119272.

[32] WEN D, MARÉCHAL F. Modeling and optimization of a membrane-assisted hybrid gas grid for methane and carbon dioxide transport, storage, and sector coupling[J]. Applied Energy, 2025, 401: 126667.

[33] 李青山, 郝勇生, 陈斌, 等. PEMFC 耦合高温热泵蒸汽电力联产系统热力学分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(2): 656-666.
LI Qingshan, HAO Yongsheng, CHEN Bin, et al. Thermodynamic analysis and optimal design of PEMFC coupled with high-temperature heat pump for steam and power cogeneration system[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(2): 656-666.

[34] SHI Y, SUN Y, LIU J, et al. Model and stability analysis of grid-connected PV system considering the variation of solar irradiance and cell temperature[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 132: 107155.

[35] WEN D, LIU S, NING Z, et al. Techno-economic evaluation of hydrogen and ammonia as energy carriers in a multi-generation system[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 277: 116670.

[36] WEN D, AZIZ M. Flexible operation strategy of an integrated renewable multi-generation system for electricity, hydrogen, ammonia, and heating[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 253: 115166.

[37] LYDIA M, KUMAR S S, SELVAKUMAR A I, et al. A

comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 30: 452-460.

[38] WANG J, AL-ATTAB K A, YEW HENG T. Techno-economic and thermodynamic analysis of solid oxide fuel cell combined heat and power integrated with biomass gasification and solar assisted carbon capture and energy utilization system[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 280: 116762.

[39] YOU H, HAN J, LIU Y, et al. 4E analysis and multi-objective optimization of a micro poly-generation system based on SOFC/MGT/MED and organic steam ejector refrigerator[J]. Energy, 2020, 206: 118122.

[40] WANG J, CUI Z, YAO W, et al. Regulation strategies and thermodynamic analysis of combined cooling, heating, and power system integrated with biomass gasification and solid oxide fuel cell[J]. Energy, 2023, 266: 126430.

[41] ABBASPOUR H, EHYAEI M A, AHMADI A, et al. Energy, exergy, economic, exergoenvironmental and environmental (5E) analyses of the cogeneration plant to produce electrical power and urea[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 235: 113951.

[42] National Renewable Energy Laboratory (NREL). NREL: US solar costs rise across all sectors, utility-scale up 6% [R/OL]. 2025-04-08. https://www.pv-tech.org/nrel-us-solar-costs-rise-across-all-sectors-utility-scale-up-6/.

[43] International Energy Agency (IEA). Report 2021 China [R/OL]. 2025-08-08. https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/12/CWEA_k2.pdf.

[44] WEN D, WEI X, BRUNEAU A, et al. Techno-economic analysis of ammonia to hydrogen and power pathways considering the emerging hydrogen purification and fuel cell technologies[J]. Applied Energy, 2025, 390: 125871.

[45] LI C, GAO Y, LIU H, et al. Energy, exergy, environmental, and economic analysis of a novel hydrogen production system integrating concentrated photovoltaic thermal collectors and wind turbines[J]. Energy, 2025, 322: 135670.

[46] PENEV M, RUSTAGI N, KEE J, et al. Capital structure for techno-economic analysis of hydrogen projects[R/OL]. 2026-01-08. https://research-hub.nlr.gov/en/publications/capital-structure-for-techno-economic-analysis-of-hydrogen-projec/.

[47] PRINCE K, MIRLETZ H, GAULDING E A, et al. Sustainability pathways for perovskite photovoltaics [R/OL]. 2025-09-08. https://research-hub.nlr.gov/en/publications/sustainability-pathways-for-perovskite-photovol-taics/?f_link_type=f_linkinlinenote &flow_extra=eyJkb2NfcG9zaXRpb24iOjAsImRvY19pZCI6IjM3NTkxMmQzMDcxYmYxOWYtNGIzOTY3MDMyYmVhOTFjNiIsImlubGluZV9kaXNwbGF5X3Bvc2l0aW9uIjowfQ%3D%3D.

[48] National Renewable Energy Laboratory (NREL). NREL research identifies motivations, methods for achieving a circular economy for wind energy[R/OL]. [2026-01-08]. https://www.nrel.gov/news/detail/program/2021/nrel-research-identifies-motivations-methods-for-achieving-a-circular-economy-for-wind-energy.

[49] National Renewable Energy Laboratory (NREL). H2A: hydrogen analysis production models[R/OL]. 2026-01-08. https://www.nrel.gov/hydrogen/h2a-production-models.

[50] National Renewable Energy Laboratory (NREL). DOE technical targets for fuel cell systems and stacks for transportation applications[R/OL]. 2026-02-08. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-backup-power-systems.

[51] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Hydrogen fuel cell electric bus evaluation project reveals success for transit partner[R/OL]. 2026-02-08. https://www.nrel.gov/grid/news/program/2018/hydrogen-fuel-cell-electric-bus-evaluation-project-reveals-success-for-transit-partner.

[52] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Performance and reliability of bonded interfaces for high-temperature packaging[R/OL]. 2026-02-02. https://research-hub.nlr.gov/en/publications/performance-and-reliability-of- bonded-interfaces-for-high-tempera-6/.

[53] 吴智泉, 周少祥, 安连锁. 氢能利用的热力学分析 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2011, 38(2): 84-86.
WU Zhiquan, ZHOU Shaoxiang, AN Liansuo. Thermodynamic analysis of hydrogen energy utilization[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2011, 38(2): 84-86.

[54] PRADHAN P, GADKARI P, MAHAJANI S M, et al. A conceptual framework and techno-economic analysis of a pelletization-gasification based bioenergy system[J]. Applied Energy, 2019, 249: 1-13.

[55] WU M, YAN R, ZHANG J, et al. An ammonia-electricity-heat-cooling multi-generation system with solar full-spectrum utilization and biomass pyrolysis: performance analysis of operation strategy across 34 Chinese cities[J]. Energy Conversion and Management, 2025, 343: 120191.

（责任编辑　杨嘉蕾）