

DOI: 10.19666/j.rlfd.202505077

基于 S-CO₂ 布雷顿循环的新型多联产系统设计 设计与性能分析

王 刚, 徐晨旭, 高春天
(东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

[摘 要] 【目的】为提升太阳能光热发电的综合能源利用效率, 提出了一种利用超临界二氧化碳 (S-CO₂) 布雷顿循环和有机朗肯循环 (ORC) 的新型线性菲涅尔反射镜聚光太阳能多联产系统, 用于同时生产电力、淡水和氢气。【方法】利用 Ebsilon 程序, 对多联产系统进行了运行性能分析。【结果】多联产系统的输出功率和布雷顿循环效率分别为 50.0 MW 和 44.0%; 多联产系统的产氢率和产水率分别为 18.34 kg/h 和 311.61 t/h; 线性菲涅尔反射式太阳能模块、布雷顿循环、ORC 制氢模块和多级闪蒸海水淡化装置可以实现长期有效的协调运行。【结论】多联产系统的电力、氢气和淡水的平准化成本分别为 0.72 元/(kW h)、28.8 元/kg 和 7.75 元/t, 表明该多联产系统具有经济可行性。

[关 键 词] 多联产系统; 超临界二氧化碳; 布雷顿循环; 多级闪蒸海水淡化; 制氢; 太阳能发电

[引用本文格式] 王刚, 徐晨旭, 高春天. 基于 S-CO₂ 布雷顿循环的新型多联产系统设计与性能分析[J]. 热力发电, 2026, 55(3): 1-5. WANG Gang, XU Chenxu, GAO Chuntian. Design and performance analysis of a novel solar polygeneration system based on S-CO₂ Brayton cycle[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(3): 1-5.

Design and performance analysis of a novel solar polygeneration system based on S-CO₂ Brayton cycle

WANG Gang, XU Chenxu, GAO Chuntian
(School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: [Objective] To improve the comprehensive energy utilization efficiency of solar thermal power generation, this paper presents a novel linear Fresnel reflector (LFR) concentrated solar polygeneration system using supercritical carbon dioxide (S-CO₂) Brayton cycle and organic Rankine cycle (ORC), which is designed for producing electricity, fresh water and hydrogen. [Methods] By using the Ebsilon code, the operation performance of the polygeneration system is investigated. [Results] The results show that the output power and Brayton cycle efficiency of the polygeneration system are 50.0 MW and 44.0%, respectively. The hydrogen production rate and freshwater production rate of the polygeneration system are 18.34 kg/h and 311.61 t/h, respectively. The LFR solar section, Brayton cycle, ORC hydrogen production section and multistage flash desalination facility can achieve the coordinated operation effectively during a long term. [Conclusion] The economic performance evaluation results show that for the polygeneration system, its levelized costs of electricity, hydrogen and freshwater are 0.72 yuan/(kW h), 28.8 yuan/kg and 7.75 yuan/t, respectively, revealing the economic feasibility of the polygeneration system.

Key words: polygeneration system; supercritical carbon dioxide; Brayton cycle; multistage flash desalination; hydrogen production; solar power generation

为应对全球能源危机和气候变化问题, 国家提出“碳中和”战略。为促进“碳中和”目标的实现, 减少化石能源的使用, 增加可再生能源^[1]的使用成为必然。近年来, 得益于储能技术^[2-3]的日益成熟,

收稿日期: 2025-05-17 修回日期: 2025-06-07 接受日期: 2025-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12305175)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (12305175)

第一作者简介: 王刚 (1984), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为太阳能利用技术, kinggang009@163.com。

通信作者简介: 高春天 (1994), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为超临界二氧化碳发电技术, gaochunxu@foxmail.com。

太阳能^[4]和风能^[5]成为发展较为成熟的 2 种可再生能源发电方式。对于太阳能发电,目前大多数的聚光太阳能发电(CSP)系统使用蒸汽朗肯循环,这限制了 CSP 系统的能量转换效率。为了获得更高的循环效率,同时考虑到 S-CO₂ 用作循环介质时的特性所提供的优势以及布雷顿循环设备的特点,未来的聚光太阳能发电场有望利用不同的 S-CO₂ 布雷顿循环代替朗肯循环发电^[6]。Calle 等人^[7]对利用超临界 CO₂ 再压缩布雷顿循环的 CSP 系统进行了技术经济分析,其储热装置中的传热流体和储热材料分别为钠和相变材料。Abid 等人^[8]利用碟式太阳能集热器与超临界二氧化碳布雷顿循环进行结合,分析了集成再热再压缩和无再热再压缩的 S-CO₂ 布雷顿循环系统的经济性、产氢率、发电功率等。

除了太阳能发电外,太阳能也能驱动其他生产技术。例如太阳能驱动的海水淡化^[9]、太阳能驱动的制氢^[10]和太阳能驱动的制冷^[11]等。为了满足更多的需求,研究了各种基于太阳能的多能互补系统^[12],以及基于太阳能的多联产系统^[13]。例如, Wang 等人^[14]

提出了太阳能-燃气混合发电制氢系统,并分析了混合发电系统的热力学性能。卞飞宇等^[15]提出了一种集电、热、冷、氢于一体的太阳能集热多联产系统,研究工作主要集中于该系统的热力学分析。

本文提出了一种利用 S-CO₂ 布雷顿循环和有机朗肯循环(ORC)的新型线性菲涅尔反射式聚光太阳能多联产系统,该系统旨在生产电力、淡水和氢气;介绍了多联产系统的工作流程和原理,并进行运行性能分析,考察该系统的技术可行性和热力学性能;并从经济性角度对系统进行评估,证明多联产系统的经济可行性。

1 多联产系统原理

本文提出了一种新型的基于线性菲涅尔式太阳能聚光的发电、制氢与淡水多联产系统,具体耦合布局结构如图 1 所示。该多联产系统主要由太阳能镜场、S-CO₂ 布雷顿循环、ORC 制氢和海水淡化系统 4 部分组成,通过多种方式实现能量梯度利用,进一步提高了太阳能的利用率。

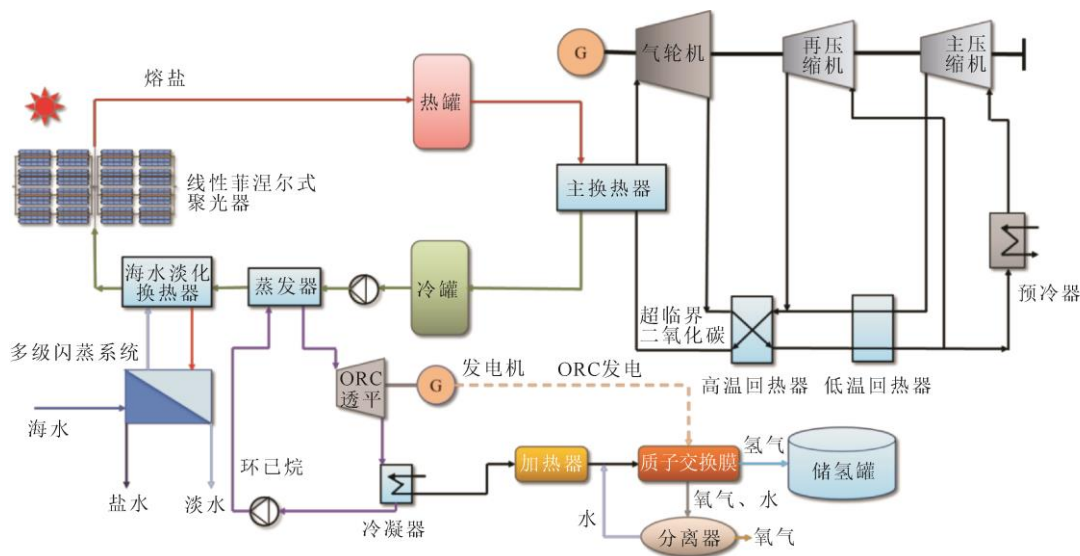


图 1 基于 S-CO₂ 布雷顿循环和 ORC 的新型线性菲涅尔反射式太阳能多联产系统

Fig.1 The novel linear Fresnel reflector solar polygeneration system using S-CO₂ Brayton cycle and organic Rankine cycle

多联产系统工作原理为:线性菲涅尔反射镜将太阳光照反射到集热器上并将太阳辐射能聚集起来,当熔盐吸收热量后温度上升,实现光热的转换,随后进入主熔盐换热器对 S-CO₂ 进行加热,升温后的 S-CO₂ 驱动气轮机发电,气轮机排气后的 S-CO₂ 依次流经布雷顿循环的其余部件。从主熔盐换热器换热后的熔盐依次经过有机朗肯循环换热器和海水淡化换热器,分别加热环己烷和冷海水,加热后

的环己烷驱动涡轮机进行发电,为质子交换膜(PEM)电解槽提供电能。有机朗肯循环介质为环己烷(cyclo-C₆H₁₂)。海水淡化系统的工作流体为冷海水。冷海水加热后形成蒸汽,蒸汽进入闪蒸室冷凝后成为淡水。

2 多联产系统建模

根据多联产系统的工作原理,表 1 给出了多联

产系统在设计工况下（环境温度为 293.15 K，太阳辐照强度为 900.0 W/m²）的节点设计参数。利用 Ebsilon 软件对多联产系统建模，仿真模型如图 2 所示。多联产系统仿真模拟运行成功后，各主要管道、部件内工质的焓值、质量流量、温度、压力均在图 2 中给出。

布雷顿循环的效率 $\eta_{brayton}$ 为：

$$\eta_{brayton} = \frac{P_e}{Q_{hx}} \tag{1}$$

式中： P_e 为布雷顿循环的输出功率； Q_{hx} 为主换热器中的换热功率。

ORC 效率 η_{orc} 为：

$$\eta_{orc} = \frac{P_{orc}}{Q_{eva}} \tag{2}$$

式中： P_{orc} 为 ORC 功率； Q_{eva} 为 ORC 蒸发器换热功率。

表 1 多联产系统参数
Tab.1 Parameters of the polygeneration system

参数	数值
线性菲涅尔式太阳能光场面积/m ²	1.822×10 ⁶
储热罐体积/m ³	2.741×10 ⁴
S-CO ₂ 的质量流量/(kg s ⁻¹)	451.0
主压缩机的入口温度/℃	32.0
主压缩机的入口压力/MPa	7.6
气轮机的入口温度/℃	631.7
气轮机的入口压力/MPa	20.0
发电功率/MW	50.0
ORC 输出功率/MW	3.13
PEM 反应温度/℃	80.00
产氢率/(kg h ⁻¹)	18.34
淡水产率/(t h ⁻¹)	311.61

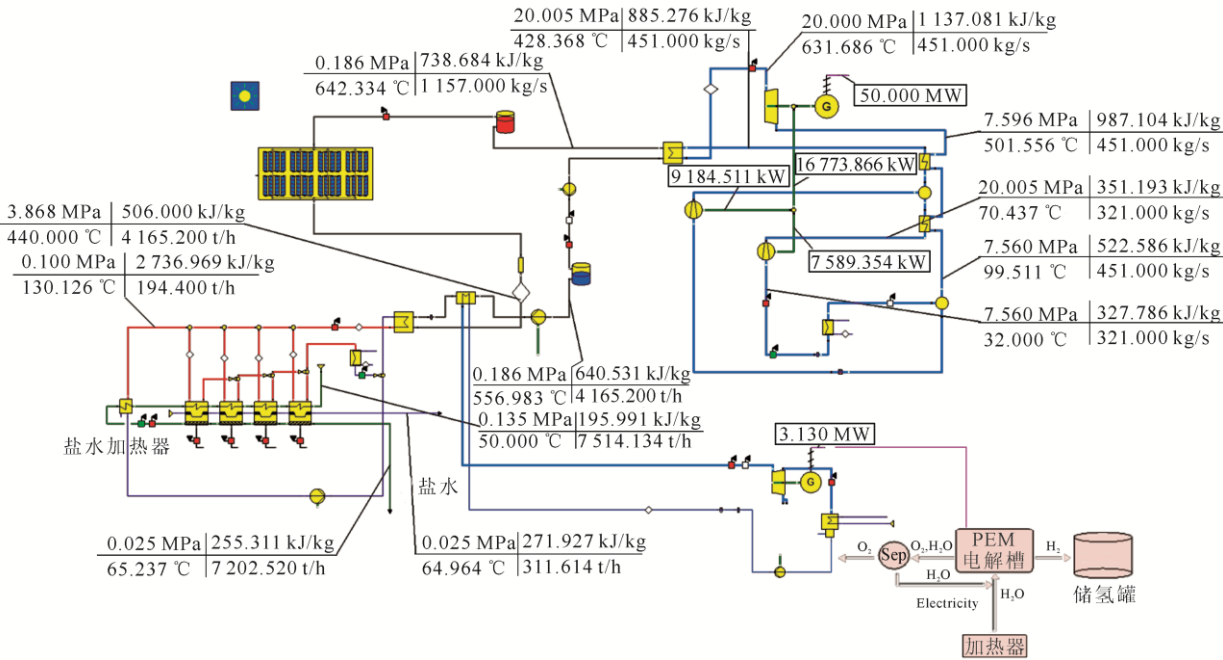


图 2 基于 Ebsilon 的多联产系统仿真模型
Fig.2 Ebsilon-based simulation model of the polygeneration system

3 系统运行性能分析

利用多联产系统参数及专业热力系统建模软件 Ebsilon 建立仿真模型，对系统在设计工况下的运行进行模拟。由于不同地区的太阳辐照情况不同，为了对多联产系统的长期运行进行模拟，首先需要制定该系统的运行策略。本文多联产系统初步运行策略如下：

1) 白天阳光充足时系统按 100.0%发电功率运行，在夜间和阳光不足的白天按 30.0%功率运行。

2) ORC 制氢和淡水生产系统每天工作时间为 8:00—17:00。

3) 储热罐内工质体积不能小于 200.0 m³。

4) 当光照强度和储热罐容量同时不足时，多联产系统需停止工作。

根据上述的运行策略，选取某地全年日照数据，对多联产系统在全年的运行进行模拟计算，结果见表 2。假设海水淡化系统和 ORC 制氢系统每天连续运行 10.0 h。从表 2 中可以看出：当系统在设计工况下运行时，主熔盐换热器的换热量为

113.6 MW, 海水淡化换热器的换热量为 125.3 MW, 蒸发器的换热量为 32.93 MW; S-CO₂ 布雷顿循环输出功率为 50.0 MW, 效率为 44.0%, ORC 发电功率和循环效率分别为 3.13 MW 和 9.5%; ORC 制氢系统和海水淡化系统的日产氢量和产水量分别为 183.4 kg 和 3 116.1 t, 海水淡化系统的产水比为 1.5。模拟运行的计算结果合理, 验证了多联产系统各子系统能够协同工作, 此系统具有一定的技术可行性。

表 2 多联产系统设计工况模拟结果

Tab.2 Simulation results of the polygeneration system under design condition

项目	数值
主换热器的换热功率/MW	113.6
海水淡化换热器的换热功率/MW	125.3
蒸发器的换热功率/MW	32.9
布雷顿循环输出功率/MW	50.0
布雷顿循环效率/%	44.0
ORC 输出功率/MW	3.13
ORC 效率/%	9.5
产水比	1.5
日产氢量/kg	183.4
日产水量/t	3 116.1

全年模拟运行模拟结果: 多联产系统年发电量为 245 890.0 MW h, 年产氢量为 59.54 t, 年产水量为 996 339.57 t。这表明从长期运行考虑, 多联产系统也具备技术可行性。图 3 给出了多联产系统的全年运行模拟结果中 9 月份连续 7 天运行参数的归一化数据。图 3 中各归一化参数由图 3 中 7 天内多联产系统各参数的仿真结果数值与其相应参数仿真结果的最大值相除得到。从图 3 可以看到, 在阳光充足的白天时段多联产系统运行在额定功率水平, 而在其余规定时段则多联产系统运行在 30% 额定功率水平。储热罐中热罐液位的变化同时受到布雷顿循环、多级闪蒸装置和 ORC 的运行以及太阳辐射强度变化的影响。

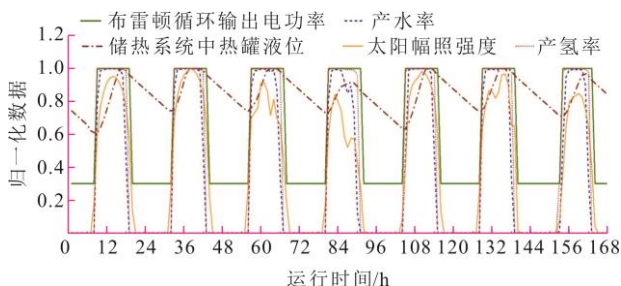


图 3 多联产系统运行模拟结果

Fig.3 Operation simulation results of the polygeneration system

4 系统经济性分析

本文对多联产系统进行经济性分析, 利用平准化成本作为系统经济性指标。在此系统中主要包括平准化电价、平准化水价、平准化氢价。平准化电价 C_{LCOE} 计算式:

$$C_{LCOE} = \frac{(R \times C_{cons} + C_{FOMC})}{W_{ann}} + C_{VOMC} \quad (3)$$

式中: W_{ann} 为发电系统的全年发电量; R 为折现率; C_{cons} 为不包括海水淡化和制氢系统所用镜场部分的发电模块总建筑成本; C_{FOMC} 和 C_{VOMC} 分别为太阳能发电机组的年固定运维成本和可变运维成本。

平准化水价 C_{LCOW} 计算式:

$$C_{LCOW} = \frac{C_{msf} + C_{w,th}}{M_{ann}} \quad (4)$$

式中: M_{ann} 为海水淡化系统年产水量; C_{msf} 为海水淡化系统固定投资成本; $C_{w,th}$ 为海水淡化系统的热力成本, 即为多联产系统中驱动海水淡化系统所需要的太阳能镜场部分的建设成本。

对于 ORC 制氢子系统, 假设系统的寿命为 30 年, 平准化氢价 C_{LCOH} 可表示为:

$$C_{LCOH} = \frac{C_{h,fix} + C_{h,th}}{t_{life} \cdot M_{h,ann} + E_{Op}} \quad (5)$$

式中: $C_{h,fix}$ 为 ORC 制氢系统的固定投资成本, 主要由有机朗肯循环系统、PEM 制氢系统和储氢罐 3 部分建设成本组成; $M_{h,ann}$ 为 ORC 制氢系统年产氢量; $C_{h,th}$ 为有机朗肯循环制氢系统的热力成本, 即驱动制氢系统所需的镜场的建设成本; E_{Op} 为制氢系统所需要的额外电力, 对于 ORC 制氢系统 $E_{Op}=0$ 。

多联产系统经济性分析结果见表 3。

表 3 多联产系统经济性分析结果

Tab.3 Economic analysis results of the polygeneration system

项目	数值
发电系统建设成本/元	9.130×10^8
发电系统固定运维成本/元	2.334×10^7
发电系统可变运维成本/(元 (kW h) ⁻¹)	0.288
平准化电价/(元 (kW h) ⁻¹)	0.720
海水淡化系统固定投资成本/元	5.847×10^6
海水淡化系统的热力成本/元	1.870×10^6
平准化水价/(元 t ⁻¹)	7.750
ORC 制氢系统固定投资成本/元	3.384×10^7
ORC 制氢系统的热力成本/元	1.754×10^7
平准化氢价/(元 kg ⁻¹)	28.800

从表 3 可见: 多联产系统的平准化电价为 0.720 元/(kW h), 如果考虑当地对太阳能光热发电

的政策补助,平准化电价会更低;平准化水价为7.750元/t;平准化氢价为28.800元/kg。多联产系统子系统的平准化成本都处于合理范围内,证明此多联产系统在经济性上具有一定可行性。

5 结 论

本文提出了一种基于S-CO₂布雷顿循环和ORC的新型线性菲涅尔反射式聚光太阳能多联产系统,用于生产电力、淡水和氢气,主要结论如下。

1) 该多联产系统由线性菲涅尔反射镜太阳能部分、S-CO₂布雷顿循环、ORC制氢子系统和多级闪蒸海水淡化装置组成。对多联产系统进行了数值建模和运行性能分析,结果表明,多联产系统的输出功率和布雷顿循环效率分别为50.0 MW和44.0%,多联产系统的产氢率和产水率分别为18.34 kg/h和311.61 t/h。

2) 多联产系统的太阳能模块、布雷顿循环、ORC制氢模块和海水淡化装置可以实现协同运行。多联产系统的年发电量、年产氢量和年产淡水量分别为245 890.0 MW h、59.54 t和996 339.57 t。

3) 经济性分析表明,多联产系统的电力、氢气和淡水的平准化成本分别为0.72元/(kW h),28.8元/kg和7.75元/t,均较为合理,一定程度上证明了多联产系统的经济可行性。

对于该多联产系统未来的研究,可考虑开展多联产系统的焓分析,以考察多联产系统的热力学特性,并为系统的优化提供依据。另外,还可对该多联产系统进行在某些典型工况下的动态分析,以揭示系统在这些工况下的动态特性。

【参 考 文 献】

- [1] 崔茗莉,冯天天,刘利利.双碳目标下区块链与可再生能源的融合发展研究[J].智慧电力,2024,52(2): 17-24.
CUI Mingli, FENG Tiantian, LIU Lili. Integration and development of blockchain and renewable energy under double carbon target[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 17-24.
- [2] 薛福,马晓明,游焰军.储能技术类型及其应用发展综述[J].综合智慧能源,2023,45(9): 48-58.
XUE Fu, MA Xiaoming, YOU Yanjun. Energy storage technologies and their applications and development[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(9): 48-58.
- [3] WANG G, XIE Z, PENG H, et al. Comparison study of thermocline heat storage tanks using different liquid metals for concentrated solar power[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 41: 102635.
- [4] 张金平,周强,王定美,等.太阳能光热发电技术及其发展综述[J].综合智慧能源,2023,45(2): 44-52.
ZHANG Jinping, ZHOU Qiang, WANG Dingmei, et al.

- Review on solar thermal power generation technologies and their development[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(2): 44-52.
- [5] XU B. Financial decentralization, renewable energy technologies, energy subsidies and wind power development in China: an analysis of nonparametric model[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 139902.
 - [6] WANG G, WANG C, CHEN Z, et al. Design and performance evaluation of an innovative solar-nuclear complementarity power system using the S-CO₂ Brayton cycle[J]. Energy, 2020, 197: 117282.
 - [7] CALLE A, BAYON A, PYE J. Techno-economic assessment of a high-efficiency, low-cost solar-thermal power system with sodium receiver, phase-change material storage, and supercritical CO₂ recompression Brayton cycle[J]. Solar Energy, 2020, 199: 885-900.
 - [8] ABID M, KHAN M S, RATLAMWALA T A H. Comparative energy, exergy and exergo-economic analysis of solar driven supercritical carbon dioxide power and hydrogen generation cycle[J]. Science Direct, 2020, 45: 5653-5667.
 - [9] 王刚,董博伟,姜铁骊,等.S-CO₂布雷顿循环太阳能电力淡水系统焓分析[J].太阳能学报,2022,43(7): 197-202.
WANG Gang, DONG Boyi, JIANG Tielu, et al. Exergy analysis of S-CO₂ Brayton cycle solar system for electric power and fresh water productions[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(7): 197-202.
 - [10] 张顺星,苑易伟,胡平,等.光伏-PEM直接耦合电解水制氢系统研究[J].工业仪表与自动化装置,2022(3): 49-52.
ZHANG Shunxing, YUAN Yiwei, HU Ping. Research on photovoltaic-PEM electrolytic water hydrogen direct coupling system[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2022(3): 49-52.
 - [11] 张小曼,冷波,许凌艳,等.太阳能驱动的制冷循环海水淡化系统性能分析[J].可再生能源,2023,42(8): 37-39.
ZHANG Xiaoman, LENG Bo, XU Lingyan, et al. Performance analysis of solar powered refrigeration cycle seawater desalination system[J]. Renewable Energy, 2023, 42(8): 37-39.
 - [12] WANG G, YIN J, LIN J, et al. Design and economic analysis of a novel hybrid nuclear-solar complementary power system for power generation and desalination[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 87: 116564.
 - [13] GURSOY M, DINCER I. A solar based system for integrated production of power, heat, hot water and cooling[J]. Energy, 2023, 282: 128943.
 - [14] WANG G, HE D, LIN J, et al. Exergy estimate of a novel hybrid solar-gas power and organic Rankine cycle-based hydrogen-production system[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 33: 101961.
 - [15] 卞飞宇,陈常念,赵浩然,等.太阳能驱动的氢-冷-热-电综合能源系统性能分析[J].供用电,2022,39(1): 17-23.
BIAN Feiyu, CHEN Changnian, ZHAO Haoran, et al. Performance assessment of hydrogen-cooling-heating-electricity integrated energy system driven by solar energy[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(1): 17-23.

(责任编辑 杨嘉蕾)