DOI: 10.19666/j.rlfd.202506066

可实现的新型卡诺电池与塔式光热并联系统及其协同优化研究

葛士宇[1]，杜亚轩[1]，徐 钢[1]，汪茹康[1]，薛小军[2]
（1. 华北电力大学热电生产过程污染物监测与控制北京市重点实验室，北京 102206；
2. 山西大学电力与建筑学院，山西 太原 030006）

［摘 要］【目的】在“双碳”目标与新能源高比例并网背景下，光伏弃电消纳难题与传统光热系统定日镜场投资高、能效偏低等问题日益突出。为实现光伏弃电高效利用、提升光热系统综合能效与经济性，本文提出一种基于卡诺电池驱动的新型光伏-塔式光热并联系统，开展系统架构设计与协同优化研究。【方法】针对卡诺电池压缩机出口温度受限的技术瓶颈，设计“压缩机回热+电加热器串联”分段温升方案；采用 EBSILON 专业软件构建系统热力学耦合模型，设置单光热系统、电加热器耦合光热系统为参比方案，以卡诺电池替代部分定日镜场，从能量效率、㶲效率与经济性三方面开展对比分析。【结果】研究表明，新型并联系统整体能量效率达 39.28%，较 2 个参比系统分别提升 6.00%、10.84%，整体㶲效率达 41.80%，分别提升 5.29%、11.35%；相较于单光热系统，新方案可降低设备与土地成本约 0.11 亿元，全生命周期售电收益增加 8.11 亿元，动态投资回收周期缩短 7.11 年。【结论】该新型卡诺电池-光热并联系统可高效消纳光伏弃电，兼具能效提升与成本优化双重优势，为光伏-光热互补系统的工程化应用提供了可行技术路径与理论支撑。

［关 键 词］卡诺电池；光伏弃电消纳；光热机组；热力学模型；性能分析

［引用本文格式］葛士宇，杜亚轩，徐钢，等. 可实现的新型卡诺电池与塔式光热并联系统及其协同优化研究[J]. 热力发电，2026, 55(7): 24. Ge S Y, Du Y X, Xu G, et al. Research on a novel realizable Carnot battery and tower-type solar thermal parallel system and their coordinated optimization[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(7): 24.

Research on a novel realizable Carnot battery and tower-type solar thermal parallel system and their coordinated optimization

Ge Shiyu[1], Du Yaxuan[1], Xu Gang[1], Wang Rukang[1], Xue Xiaojun[2]
(1. Beijing Key Laboratory of Pollutant Monitoring and Control in Thermoelectric Power Production, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. School of Electric Power and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: [Objective] Against the backdrop of the “dual carbon” goal and the high proportion of renewable energy grid integration, the challenge of absorbing curtailed photovoltaic (PV) power has become increasingly prominent, alongside issues such as high investment costs and relatively low energy efficiency in traditional solar thermal systems. To achieve efficient utilization of curtailed PV power and improve the overall energy efficiency and economic viability of solar thermal systems, this paper proposes a novel PV-tower solar thermal hybrid system driven by a Carnot battery, and conducts research on system architecture design and collaborative optimization. [Methods] To address the technical bottleneck of limited outlet temperature in Carnot battery compressors, a staged temperature-rise scheme combining “compressor heat recovery and electric heater series connection” was designed. Using the EBSILON professional software, a thermodynamic coupling model of the system was constructed. A standalone CSP system and a CSP system coupled with an electric heater were set as reference schemes. By

收 稿 日 期：2025-06-24 修 回 日 期：2025-07-17 接 受 日 期：2025-07-23
基 金 项 目：国家自然科学基金青年科学基金项目（52406019）
Supported by: National Natural Science Foundation of China Youth Science Foundation Program (52406019)
第一作者简介：葛士宇（2001），男，硕士，主要研究方向为太阳能光热-光伏一体化系统优化运行，GSY_Ncepu@163.com。
通信作者简介：徐钢（1978），男，教授，主要研究方向为火储调峰、能源系统集成及熔盐储热技术，xg2008@ncepu.edu.cn。

replacing part of the heliostat field with a Carnot battery, a comparative analysis was conducted in terms of energy efficiency, exergy efficiency, and economic viability. [Results] The study indicates that the overall energy efficiency of the new parallel system reaches 39.28%, representing improvements of 6.00% and 10.84% over the two reference systems, respectively. The overall exergy efficiency reaches 41.80%, representing improvements of 5.29% and 11.35%, respectively. Compared to a standalone CSP system, the new scheme reduces equipment and land costs by approximately 11 million yuan, increases lifetime electricity sales revenue by 811 million yuan, and shortens the dynamic payback period by 7.11 years. [Conclusion] This novel Carnot battery-solar thermal parallel system can efficiently absorb curtailed PV power, offering the dual advantages of improved energy efficiency and cost optimization. It provides a feasible technical pathway and theoretical support for the engineering application of complementary PV-solar thermal systems.

Key words: Carnot battery; photovoltaic power curtailment; solar thermal power plant; thermodynamic model; performance analysis

在“双碳”目标下，我国已明确提出要大力发展可再生能源，截至到 2024 年底，风电和太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上[1]。但如果忽视电力系统对大规模高比例新能源接网和消纳的适应性不足等制约因素，那么新能源的开发利用还有可能重演大规模弃风弃光。因此，我国新能源发展面临着既要大规模开发，又要高水平消纳，更要保障电力安全可靠供应等多重挑战。为解决新能源弃电问题，储能系统应运而生。目前，电池储能因其具有高效率与低成本的优势，成为配储的主力，但是其较短的储能时间，以及恶劣的环保性能，限制了其在未来的发展能力[2]。故而需要考虑一些长时储能手段，以解决弃电消纳问题。对比抽水蓄能及压缩空气储能等长时储能技术，卡诺电池具有低成本、长寿命、环保性好以及灵活性高等优点，因此，未来卡诺电池在储能领域将会有广阔的发展前景[3]。

传统光热发电系统因定日镜场的投资成本大，需要进行适当的生产改造，而其自带的储能系统也为弃电消纳与配储提供了改造路径。目前，在光热电站弃电热转换的路径中，电加热器得益于其低成本，成为了光热−光伏一体化系统改造的主流措施，也被称为原始卡诺电池。刘佳佳等[4]研究了光伏直连电加热器耦合光热系统，考虑一系列约束后，找出了最优配比，实现了 94.1%的弃电回收率。李富春等[5]建立的光伏−光热一体化系统，在电加热器的加持下，互补运行后，提高了项目的顶峰能力，实现了较大的收益。但是，从热力学优化的角度分析，生产过程产生的巨大㶲损失也成为了明显的弊端。

卡诺电池由于其独特的电转热特性以及较为丰富的改造性（例如吸收低温余热、环境热、进口处设置压缩式热泵的优化改造方式），有待成为替换电加热器的光伏−光热一体化实现手段。韩瑞等[6]研究了面向火电厂改造的熔盐卡诺电池，对比直接电加热，熔盐卡诺电池系统往返效率提高了 45.16%。Niu 等人[7]研究了利用太阳能和电网弃电的储能系统，通过阀门调节和回热器优化建立系统，筛选最佳工质，系统效率达 454.14%，成本为 0.168 美元/(kW ⋅h)。于博旭等[8]研究了卡诺电池对于火电厂灵活性改造的帮助，提出了最佳耦合方案，实现了调峰容量及调峰深度的增大。

由以上综述可知，目前卡诺电池在调节火电厂灵活性方面技术较为成熟，而对于有光热机组存在的系统，也只对系统部件进行了简要优化及分析，并未彻底分析系统的整体能效以及评估其投资经济性。有鉴于此，本文提出光伏弃电驱动的卡诺电池（含电加热器）并联光热发电机组的分段温升耦合系统，旨在将低品位环境热与弃电资源协同利用，突破传统电加热系统以及光热直接发电利用的能效瓶颈。为评估所提系统的先进性，本文从能量效率、㶲效率以及经济性 3 个不同维度，对系统进行了分析。

1 卡诺电池与光热发电机组分段温升并联系统

1.1 卡诺电池系统

卡诺电池是一种基于热力学循环的能量转换装置，其采用热泵循环提升电转热能力。本文所述卡诺电池系统采用空气为工质，采取开式循环模式，模型示意如图 1 所示。其核心特点为：1）以空气为流动介质，通过压缩机增压升温（预加热至 490 ℃），直接与环境进行热交换，避免闭式循环的工质回收损耗；2）开式循环设计大幅降低了系统复杂性，空气吸入后经压缩、电加热（二次升温至 562 ℃）直接输出热能，无工质循环管路的建设成本；3）通过压缩机回热技术汲取环境热量，同时消

纳光伏弃电驱动电加热器，形成环境热能捕获+弃电转化的双源供能模式，电热转换效率可达 121%（卡诺电池系统性能系数 COP=1.21），显著提升了系统发电能力与经济性。

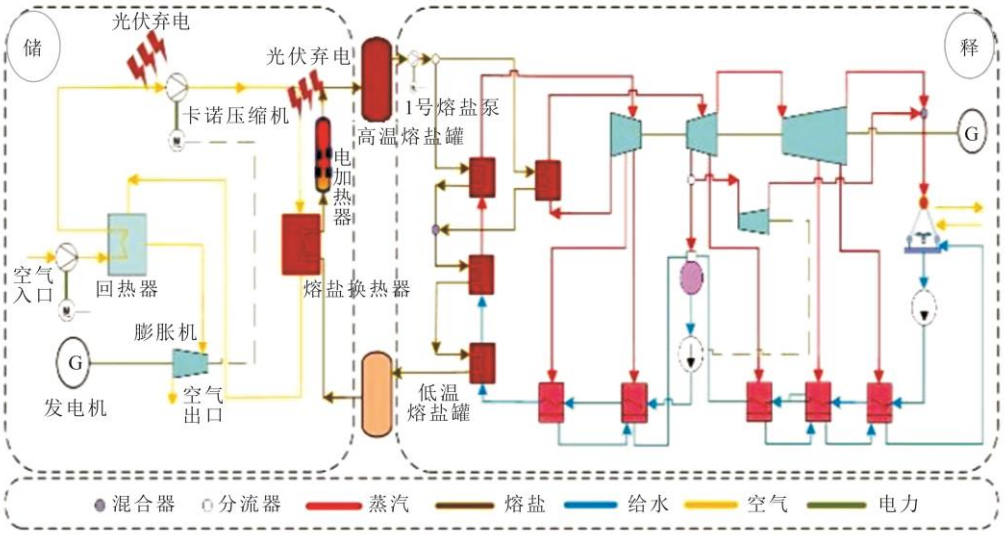


图 1 卡诺电池模型示意

Fig.1 Schematic diagram of the Carnot battery model

1.2 参比系统

为了突出改进系统的优势所在，本文提出 2 个参比系统，分别是单光热循环发电系统（方案 a）以及电加热器（原始卡诺）耦合光热循环发电系统（方案 b），系统示意如图 2、图 3。方案 a 光热发电系统采用聚光集热系统与双级熔盐储热单元耦合架构，通过梯级换热装置（预热器、蒸发器、过热器及再热器）实现热能传递，集成高低压回热加热器优化热力学循环效率。系统配置蒸汽透平驱动给水系统及汽轮发电机组构成蒸汽朗肯循环系统，实现太阳能的高效热电转换与持续稳定输出。方案 b 光热电站通过并联电加热器实现镜场容量优化配置，在维持等效聚光功率条件下显著降低了定日镜场初始投资。该混合式架构可有效消纳弃光转化为高品位热能，同步提升系统能量效率、㶲效率与运行经济性。

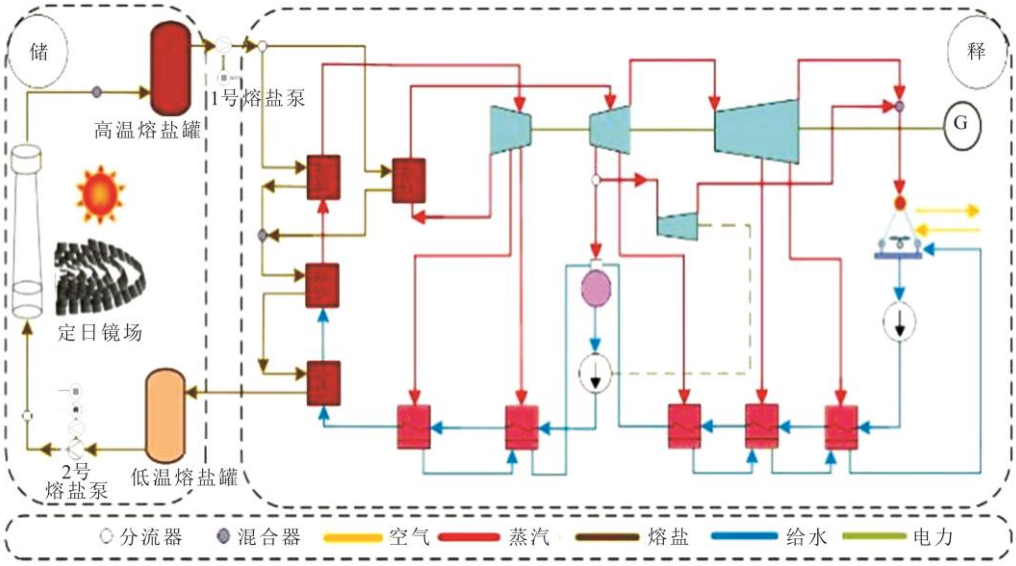


图 2 单光热发电系统（方案 a）

Fig.2 Schematic diagram of a standalone solar thermal power generation system (Scheme a)

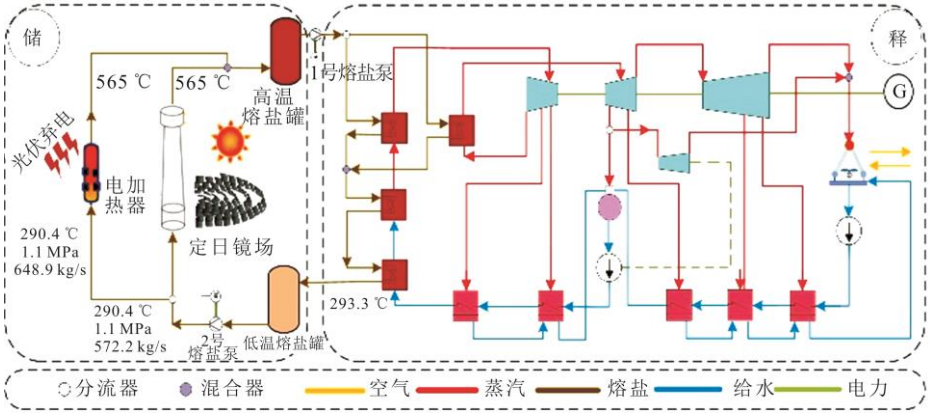


图 3 光热并联电加热器发电系统（方案 b）

Fig.3 Schematic diagram of a solar thermal parallel electric heater power generation system (Scheme b)

1.3 改进系统

由于卡诺电池系统相较于传统电加热器电转热特性更优，本节提出一种采用卡诺电池代替电加热器消耗光伏弃电，并与光热机组并联耦合的设计（即方案 c），系统示意如图 4 所示。方案 c 卡诺电池通过消纳光伏弃电，代替一部分投资较大的定日镜场，将电转为热存储起来，并于电价高峰时段释放，可进一步减少整个系统的初始投资，并增加售电收益。表 1 列出了方案 a、方案 b、方案 c 3 个系统的基本设计参数[6-10]。本文选择 1 个装机容量为 900 MW 的光伏发电厂以及 1 个装机容量为 100 MW 的光热发电厂作为研究对象。

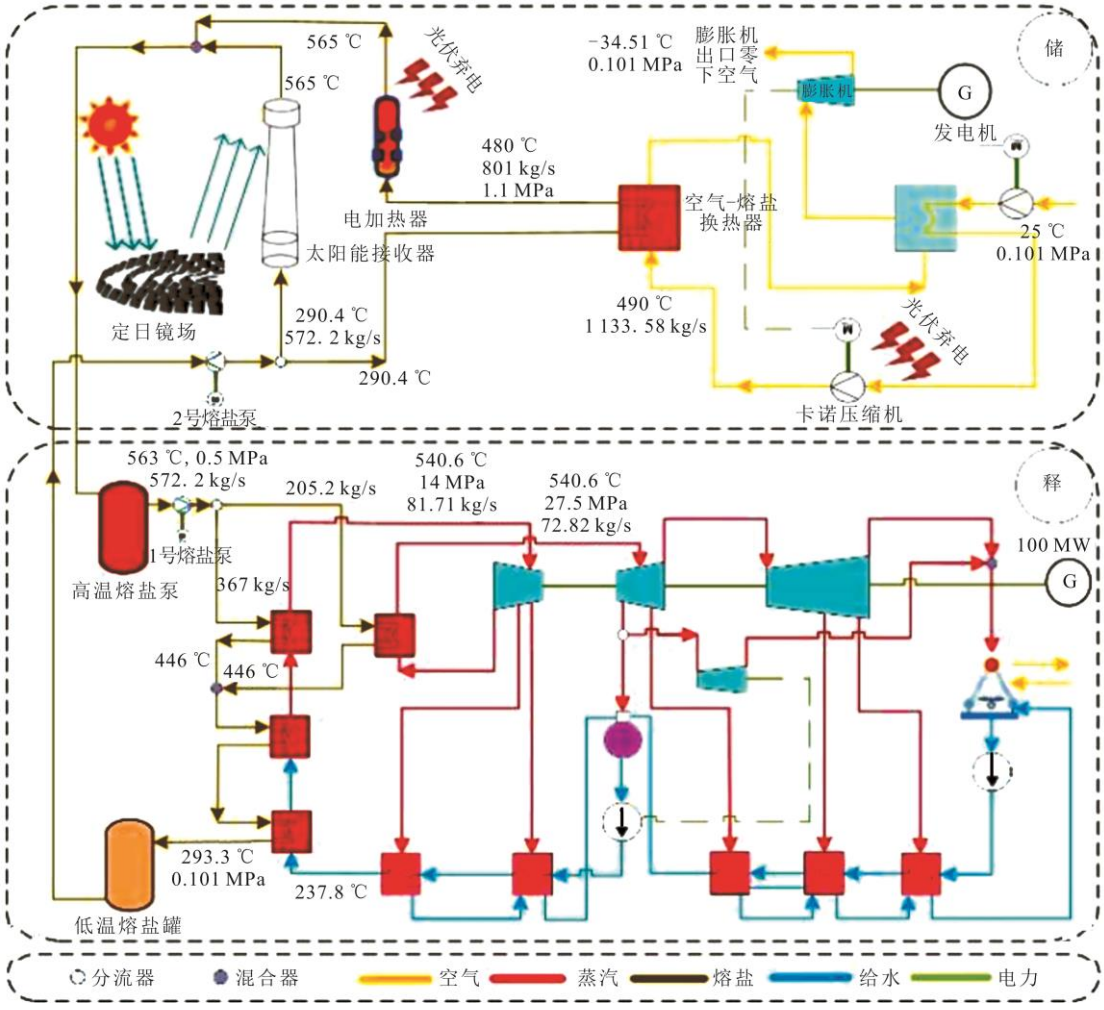


图 4 弃电消纳卡诺电池耦合光热系统（方案 c）

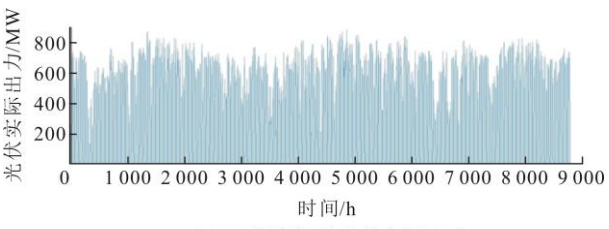
Fig.4 Schematic diagram of the curtailed PV power accommodation Carnot battery-coupled solar thermal system (Scheme c)

表 1 案例参比系统及改进系统基本设计参数
Tab.1 Basic design parameters of the case reference system and the modified system

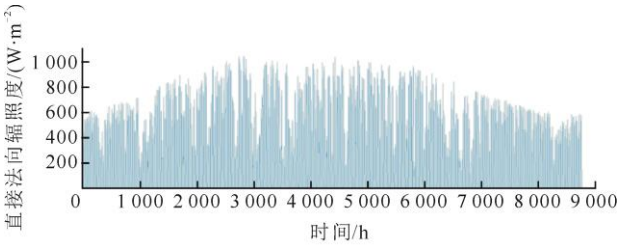
项目	参数
单光热参比系统（方案 a）	
定日镜场面积/m²	931 000
镜场有效效率	0.74
接收器效率	0.91
额定直接法向辐照度/(W·m⁻²)	850.00
太阳能接收器换热功率/MW	537.65
发电机发电功率/MW	100.00
汽轮机组发电效率	0.43
储能时长/h	3.46~8.00
释能时长/h	9.00
光热并联电加热器参比系统（方案 b）	
电加热器耗电功率/MW	276.50
电加热器热效率	0.98
定日镜场面积/m²	416 850
太阳能接收器换热功率/MW	238.95
发电机发电功率/MW	100.00
发电机多发电功率/MW	67.00
光热储能时长/h	3.46~8.00
光伏储能时长/h	7.00（不固定）
释能时长/h	10.00
卡诺电池与光热并联系统（方案 c）	
热泵 COP	1.21
定日镜场面积/m²	416 850
压缩机等熵效率	0.85
膨胀机等熵效率	0.90
压缩机耗电功率/MW	256.60
电加热器耗电功率/MW	106.80
膨胀机做功功率/MW	86.90
卡诺电池系统换热功率/MW	334.60
太阳能接收器换热功率/MW	238.95
发电机发电功率/MW	100.00
光热储能时长/h	3.46~8.00
光伏储能时长/h	7.00（不固定）
释能时长/h	11.00

1.4 案例系统运行模式

图 5 和图 6 展示了青海省 2023 年全年的光伏实际出力，以及全年直接法向辐照度与夏季某晴朗日太阳直接法向辐照度。



a) 2023年青海省光伏实际出力



b) 2023年青海省光热直接法向辐照度

图 5 2023 年青海省光伏实际出力及光热直接法向辐照度
Fig.5 Actual PV output and direct normal irradiance in Qinghai Province in 2023

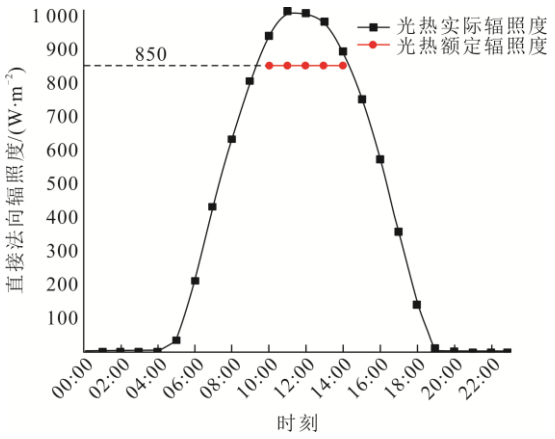


图 6 夏季某晴朗日直接法向辐照度
Fig.6 Direct normal irradiance on a clear day in summer

考虑太阳能持续发电的简易运行策略如图 7 所示。如果考虑持续发电，而不只考虑短期储能，就需要弥补因为减少定日镜场面积所导致的光热发电量缺失。图 7 中，红色线表示减少定日镜场面积前后的实际发电功率。因定日镜场面积减少，光热储热量也随之减少，实际发电量因储热量的减少而减少，二者所围成的面积即是镜场面积减少前后实际发电量的减少值。如果考虑持续发电，则除了这部分低谷储能时段，其他时间的光热发电量会因为镜场面积的减少而减少，而这部分减少的发电量并未在收益中缩减，因此这部分缺失可能需要更大量的弃电或者外购电，导致消纳不符合实际。在对比投资回报时，回收弃电量也无法做动态衡量。由于本文在做能量分析及㶲分析时需要稳态下恒定的能量，机组改造前后额定光热功率及时间是确定的，所选的强光照天的实际光热功率值在额定功率值之上，因此实际利用光热储热量会减少，实际储能时间一定的情况下，实际利用光热功率会因此减少。综上所述，在静态热力学建模的基础上，须将光热储能看作固定长周期储能。

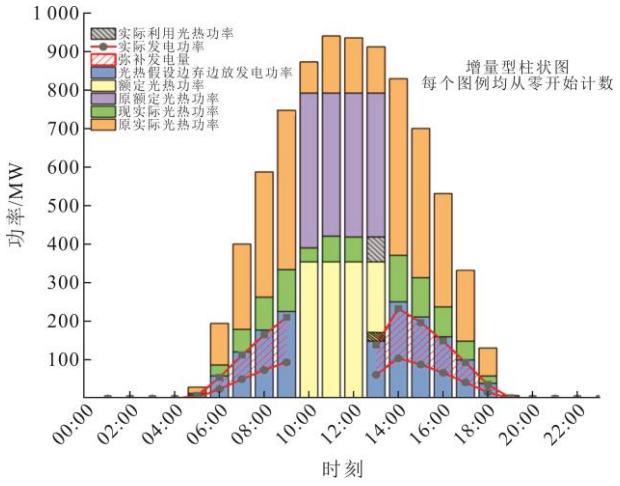


图 7 考虑太阳能持续发电简易运行策略

Fig.7 A simple operation strategy considering continuous solar power generation

方案 a、b、c 夏季晴朗日简易运行策略如图 8 和图 9 所示。本文将第 1 天开始储能的时间点作为起点，并连接第 2 天需要释能的时间。光伏弃电发生在 10:00—17:00 时段，总弃电量折算后为 1 383 MW·h。10:00—11:00 时段内 1 h 弃电 76 MW·h；11:00—12:00 时段内 1 h 弃电 197 MW·h；12:00—14:00 时段内 2 h 弃电 543 MW·h；14:00—16:00 时段内 2 h 弃电 509 MW·h；16:00—17:00 时段内 1 h 弃电 57 MW·h。另外，由于太阳能直接法向辐照度全年内每日存在波动，从全年数据中找出辐照度最强的 1 天，10:00—13:00 时段内的辐照度分别是 937、1 009、1 004 和 979 W/m^2，在满足额定的 4 h、850 W/m^2 的储热条件时，理论上只需要 3.46 h 就能满足 1 天的储热容量，而最大储能时间则是 8 h[11-14]。因此储能时间可以调整至 3.46~8.00 h。

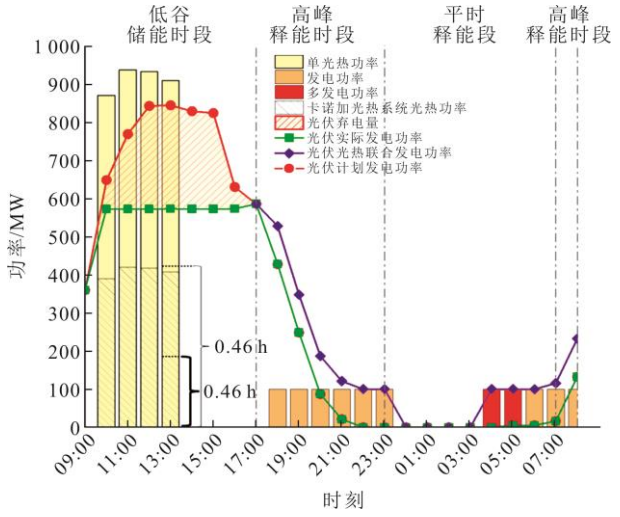


图 8 方案 a、c 夏季晴朗日简易运行策略

Fig.8 Simple operating strategy for Scheme a and c for clear summer days

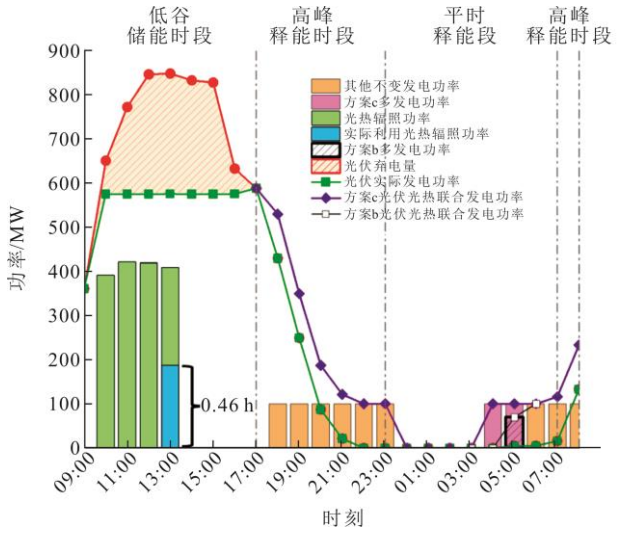


图 9 方案 b、c 夏季晴朗日简易运行策略

Fig.9 Simple operating strategy for Scheme b and c for clear summer days

方案 a、b、c 夏季晴朗日储电容量变化如图 10 所示。方案 a 由于只消耗了自身镜场所吸收的光热能量，在输入全部不变的情况下储电容量比方案 b 和 c 都小。由于方案 c 卡诺电池系统独特的电转热特性，传递给放热熔盐的热量更多，导致最终发电量也更多。

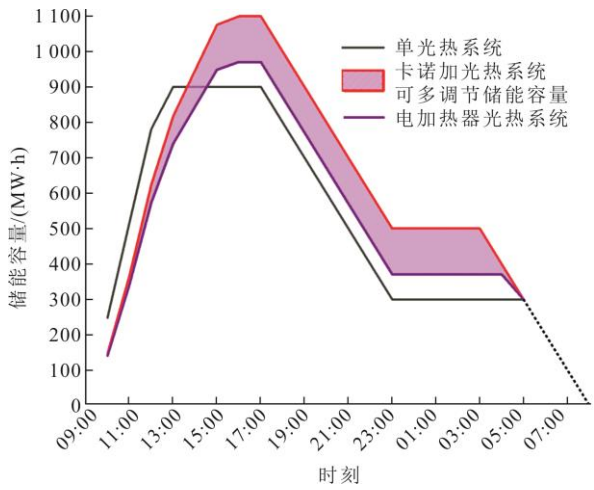


图 10 方案 a、b、c 夏季晴朗日储电容量变化

Fig.10 Variations of storage capacity on sunny days in summer for Scheme a, b and c

2 系统建模与分析方法

2.1 系统建模

EBSILON Professional 软件在模拟热力学系统时具有较高的精准度以及普适通用的性质，因而被广泛应用于发电行业的各类热力系统建模中。本文涉及热力机组的搭建，故选择此软件对所研究的系统进行模拟仿真。

为了方便评估耦合系统各项性能指标，提出以下假设：

1）储、释能熔盐循环量保持不变；

2）本文所提出的新型卡诺电池系统由于改动较大，只比较系统 COP，其他部分误差忽略不计；

3）环境温度和压力分别为 25.0 ℃和 0.101 MPa；

4）忽略辅助系统及周围环境对系统的影响；

5）忽略流体在热交换器中流动时的传热损失和流体动能、势能的变化；

6）管道压降忽略不计。

模型验证结果如表 2 所示。设计值与模拟值相对误差均在±2.00%以内，因此可以进行下一步分析。

表 2 模型验证结果

Tab.2 Model validation results

子系统	项目	设计值[6,10]	模拟值	误差/%
光热机组	熔盐循环量/(kg s^{-1})	281.51	286.09	–1.63
	净输出功率/MW	45.30	45.30	0
	系统效率/%	39.23	38.81	–1.48
卡诺电池	热泵 COP	1.20	1.21	0.83

2.2 能量评价指标

能量效率公式为：

$$\eta = \frac{e}{En_{\mathrm{q}} + Q_{\mathrm{solar}}} \tag{1}$$

式中：En_{q} 为进口消耗弃电能量，MW h；Q_{solar} 为进口消耗太阳能，MW h；e 为出口电能，MW h。

2.3 烟评价指标

2.3.1 部件㶲损失

太阳能辐射㶲为[11]：

$$\psi^{*} = Q^{*}(1 - T_0 / T^{*}) \tag{2}$$

式中：ψ^{*}为太阳能辐射㶲，MW h；Q^{*}为太阳辐射能，MW h；T^{*}为太阳表面温度，取 4 500 K；T_0 为环境温度，为 298.15 K。

接收器辐射㶲为[11]：

$$\psi^{*}_{\mathrm{rec}} = Q^{*}_{\mathrm{rec}}(1 - T_0 / T^{*}) \tag{3}$$

式中：ψ^{*}_{rec} 为接收器辐射㶲，MW h；Q^{*}_{rec} 为接收器辐射能，MW h；T^{*}为太阳表面温度，取 4 500 K；T_0 为环境温度，为 298.15 K。

熔盐的㶲Ex_{ms} 为[12]：

$$Ex_{\mathrm{ms}} = m_{\mathrm{ms}} c_{P,\mathrm{ms}} \left(T_{\mathrm{ms}} - T_0 - T_0 \ln \frac{T_{\mathrm{ms}}}{T_0} \right) \tag{4}$$

式中：m_{ms} 为熔盐的质量流量，kg/s；$c_{P,\mathrm{ms}}$ 为熔盐的恒压比热容，kJ/(kg K)；T_{ms} 为熔盐的温度，K。

卡诺电池及光热机组中其他工质（水、空气、蒸汽）的㶲e_{m}[12]可表示为：

$$e_{\mathrm{m}} = q_{\mathrm{m}}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \tag{5}$$

式中：q_{m} 为工质的质量流量，kg/s；h 为工质当前的焓，kJ/kg；h_0 为工质在环境状态下的焓，kJ/kg；T_0 为工质在环境状态下的温度，K；s 为工质在当前状态下的熵，kJ/(kg K)；s_0 为工质在环境状态下的熵，kJ/(kg K)。

2.3.2 耦合系统整体㶲损

耦合系统的整体㶲损失η_{Ex} 为[12]：

$$\eta_{\mathrm{Ex}} = \frac{Ex_{\mathrm{e,out}} + Ex_{\mathrm{air,out}}}{Ex_{\mathrm{e,in}} + Ex_{\mathrm{solar,in}}} \tag{6}$$

式中：$Ex_{\mathrm{e,out}}$ 为出口电能㶲，MW h；$Ex_{\mathrm{air,out}}$ 为出口空气㶲，MW h；$Ex_{\mathrm{e,in}}$ 为进口弃电电能㶲，MW h；$Ex_{\mathrm{solar,in}}$ 为进口太阳能辐射㶲，MW h。

2.4 经济性评价指标

卡诺电池系统投资如下：

$$\begin{aligned} C_{\mathrm{invest}} = {} & C_{\mathrm{exp}} + C_{\mathrm{hel}} + C_{\mathrm{heater}} + C_{\mathrm{COM}} + C_{\mathrm{ele}} + \\ & C_{\mathrm{land}} + C_{\mathrm{O\&M,Carnot}} + C_{\mathrm{O\&M,solar}} + C_{\mathrm{EH}} + \\ & C_{\mathrm{solarsalt}} + C_{\mathrm{exchanger}} + C_{\mathrm{tower}} + C_{\mathrm{tank}} + C_{\mathrm{DL}} \end{aligned} \tag{7}$$

式中：C_{exp} 为膨胀机投资成本；C_{hel} 为定日镜场投资成本；C_{heater} 为熔盐换热器投资成本；C_{COM} 为压缩机投资成本；C_{ele} 为发电机投资成本；C_{land} 为土建投资成本；$C_{\mathrm{O\&M,Carnot}}$ 为卡诺电池储能系统运维成本；$C_{\mathrm{O\&M,solar}}$ 为光热电站运维成本；C_{EH} 为电加热器投资成本；$C_{\mathrm{solarsalt}}$ 为太阳盐投资成本；$C_{\mathrm{exchanger}}$ 为回热器投资成本；C_{tower} 为太阳能接收器投资成本；C_{tank} 为蓄热罐投资成本；C_{DL} 为镜场电缆投资成本。

定日镜场投资为[13]：

$$C_{\mathrm{hel}} = 1\,044 \times A \tag{8}$$

式中：1 044 元/m^2 为单位面积定日镜场投资；A 为定日镜场面积，m^2。

熔盐换热器成本为[13]：

$$C_{\mathrm{heater}} = 350 \times (Q_{\mathrm{MSHE}} \times \eta_{\mathrm{t}}) \times 1\,000 \tag{9}$$

式中：Q_{MSHE} 为熔盐换热器的换热功率；η_{t} 为光热电站的发电效率，此处取 0.426，不包括厂用电。

蓄热罐成本为[13]：

$$C_{\mathrm{tank}} = h_{\mathrm{tes}} \times Q_{\mathrm{MSHE}} \times 172.8 \times 1\,000 \tag{10}$$

式中：h_{tes} 为蓄热罐的蓄热时间。

太阳能接收器成本为[13]：

$$C_{\mathrm{tower}} = 6 \times 10^{8} \times (A_{\mathrm{rec}} / 1\,133)^{0.7} \tag{11}$$

式中：A_{rec} 为 246.77 m^2。

压缩机成本为[14]：

$$C_{\mathrm{COM}}=\frac{39.5\times m_{\mathrm{air}}}{0.9-\eta_{\mathrm{COM}}}\times\pi\ln(\pi) \tag{12}$$

式中：m_{air} 为空气的质量流量，kg/s；η_{COM} 为压缩机的等熵效率；π为压缩机的压比。

电加热器成本[14]C_{EH} 约为 720 元/kW。

膨胀机成本为[14]：

$$C_{\mathrm{exp}}=\frac{301.45m_{\mathrm{i}}}{0.94-\eta_{\mathrm{is,GT/AT}}}\ln\frac{p_{\mathrm{i}}}{p_0}\times(1+\exp(0.025T_{\mathrm{i}}-1\,570)) \tag{14}$$

式中：m_{i} 为膨胀工质质量流量，kg/s；$\eta_{\mathrm{is,GT/AT}}$ 为膨胀机的等熵效率；p_{i} 为膨胀机入口压力，MPa；p_0 为膨胀机出口压力，MPa；T_{i} 为膨胀机进口温度，K。

回热器成本[15]为：

$$C_{\mathrm{exchanger}}=Z_{\mathrm{R}}\left(\frac{A}{A_{\mathrm{R}}}\right)^{0.6} \tag{15}$$

式中：A 为换热器的换热面积；A_{R} 为换热器面积常数，取 100 m^2；Z_{R} 为经验常数，85 080。

发电机成本为[14]：

$$C_{\mathrm{ele}}=60(1\,000\dot{W})^{0.95} \tag{16}$$

式中：W 为发电机的发电功率，MW。

熔盐成本 $C_{\mathrm{solarsalt}}$[15]约为 6 300 元/t。

镜场电缆成本[14] C_{DL} 为 11.4 元/m^2。

卡诺电池及光热运维成本为：

$$C_{\mathrm{O\&M,Carnot/solar}}=1\%\times C_{\mathrm{invest}} \tag{17}$$

土地成本为[13]：

$$C_{\mathrm{land}}=1.25\times(3\times A) \tag{18}$$

式中：A 为土地面积，m^2。

本文采用动态投资回收期 H 分析耦合系统的经济性能[16]：

$$\sum_{y=1}^{H}\frac{I-O}{(1+i_{\mathrm{dis}})^{y}}=0 \tag{19}$$

$$H=t^{+}-1+\frac{|(I-O)_{t^{+}}-1|}{(I-O)_{t^{+}}} \tag{20}$$

式中：I 和 O 分别为第 y 年的现金流入和现金流出，元；t^{+}为假设系统各年度累计净现金流量第 1 次为正或为零的年份；i_{dis} 为贴现率，%。

表 3 为收益测算的前提条件。

表 3 收益测算前提条件

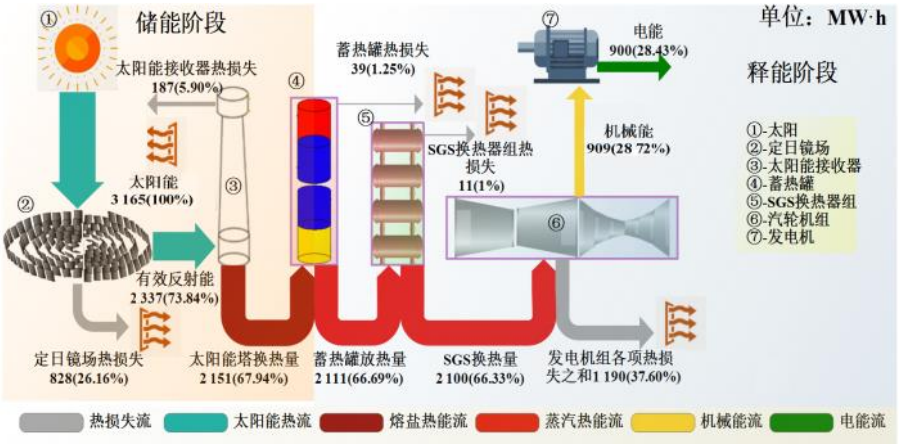
Tab.3 Prerequisites for earnings estimation

项目	数值
光热最大储能时长/h	8
8 h 内平均辐照度/(W m^{-2})	≥425
满足条件时间/天	180
弃电量/(MW h)	1 383
弃电成本/万元	0

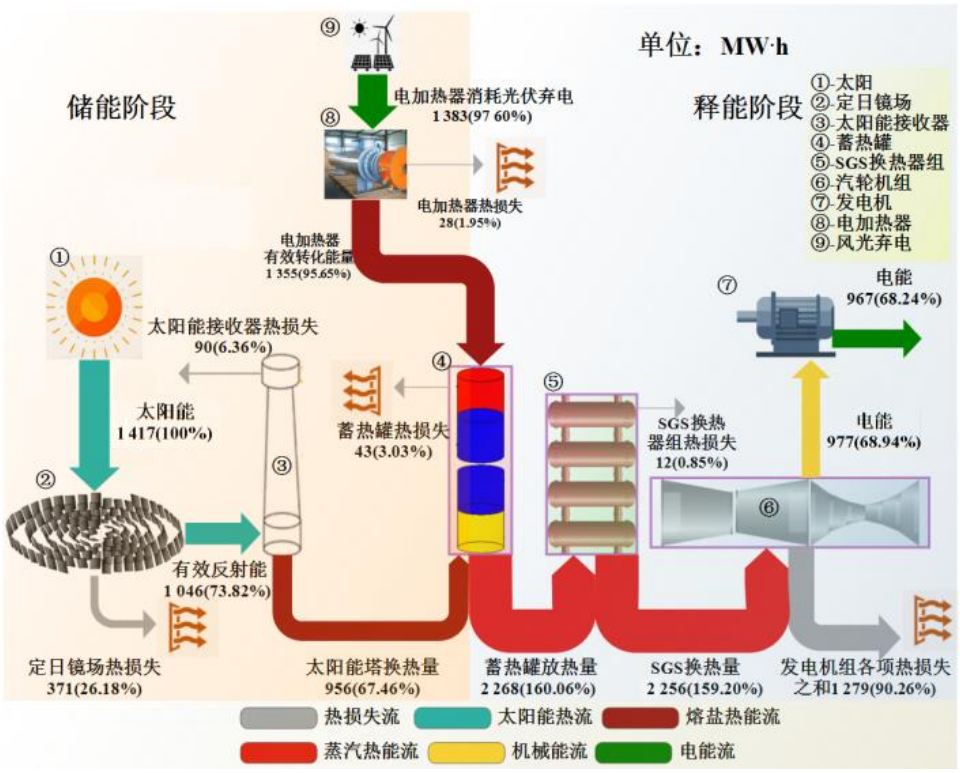
3 系统分析结果

3.1 能量分析

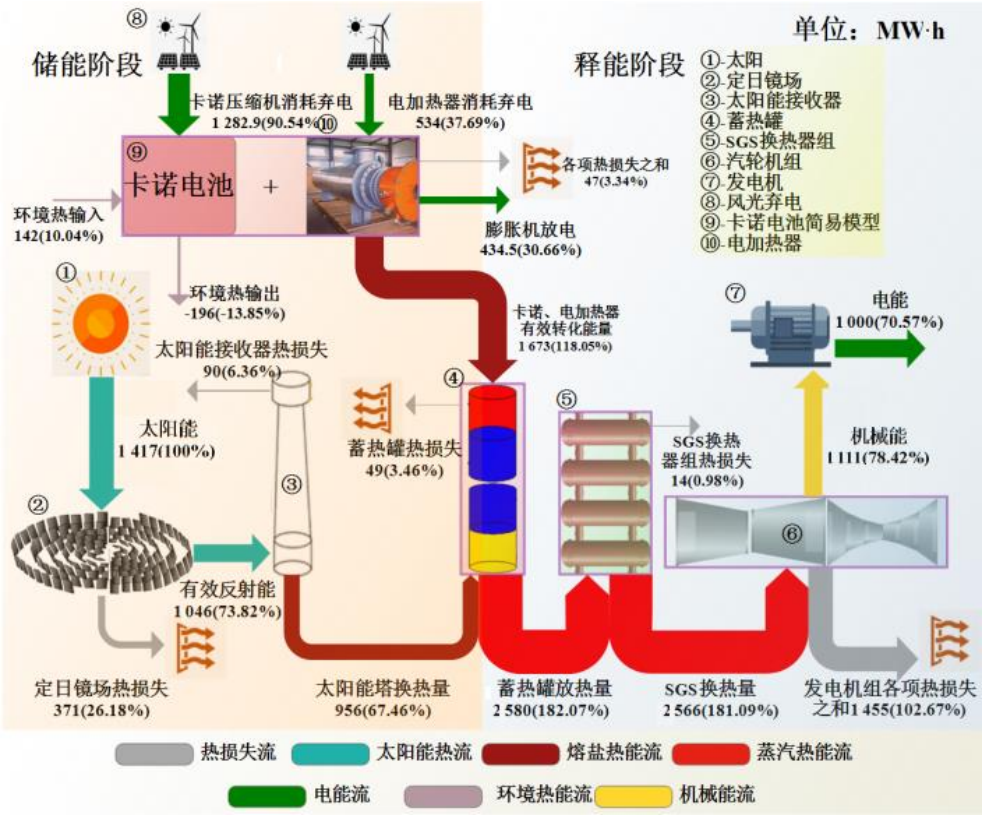
图 11 为参比系统和改进系统能量流动。对于单光热发电系统，太阳能输入了 3 165 MW h 的光能，储热侧定日镜场热损失为 828 MW h，太阳能接收器热损失为 187 MW h，进入蓄热罐的能量为 2 151 MW h，蓄热罐存在 39 MW h 的蓄热损失，SGS 换热器组共有 11 MW h 的热损失，汽轮发电机组热损失约为 1 190 MW h，最终发电 900 MW h。光热耦合电加热器系统中，太阳能输入了 1 417 MW h 的光量，弃电输入 1 383 MW h 的电量，进入蓄热罐的能量为 2 311 MW h，最终发电 967 MW h。卡诺电池耦合光热机组改进系统中，太阳能输入热量为 1 417 MW h，弃电输入量为 1 383 MW h，但是由于卡诺电池吸收了环境热的电转热特性，故进入蓄热罐的储热侧定日镜场以及太阳能接收器部件存在能量损失。



a) 单光热发电系统



b) 光热耦合电加热器系统



c) 卡诺电池耦合光热机组改进系统

图 11 参比系统和改进系统能量流动

Fig.11 Energy flow diagrams of the reference and modified systems

表 4 为 3 个系统的能量分析结果。方案 c 的能量效率比单光热的方案 a 及光热并联电加热器的方案 b 分别提升了 6.00%和 10.84%。

表 4 能量分析结果
Tab.4 Energy analysis results

能量类型	方案 a	方案 b	方案 c
进口太阳能/(MW h)	3 165	1 417	1 417
进口弃电能量/(MW h)		1 383	1 383
进口总能量/(MW h)		2 800	2 800
出口电能/(MW h)	900	967	1 100
能量效率/%	28.44	34.54	39.28

3.2 烟分析

卡诺电池耦合光热机组改进系统整体烟损失分析如表 5 所示。b 方案和 c 方案将 a 方案的整体烟效率分别提升 5.29 百分点、11.35 百分点。

设备烟损失如图 12 所示。相比方案 a，方案 b 和方案 c 储热侧的设备烟损失相等，定日镜场烟损失和接收器烟损失均减小了 55.23%。考虑到蓄热罐在 1 天内冷、热罐的模拟时分别按减小 2 ℃左右设置，故而存在烟损失，方案 b、方案 c 较方案 a 原系统分别增加了 1.62 、4.83 MW h 的烟损失。由于方案 b 和方案 c 的发电能力提升，方案 b 和方案 c 较方案 a 原系统的 SGS 换热器组烟损失分别增加了 8.50（7.44 %）、25.38（22.22 %）MW h。方案 b 和方案 c 较方案 a 的汽轮机组烟损失分别增加了 14.22（7.44 %）、42.44（22.22%）MW h。由于方案 b 和方案 c 都用了各自的电转热系统代替定日镜场吸热，故分别产生 622.56、353.12 MW h 的烟损失。相比减少的定日镜场烟损失和太阳能接收器烟损失，方案 b 和方案 c 的整体烟损失明显降低，较方案 a 原系统总烟损失分别减少了 263.31、574.64 MW h。

表 5 耦合系统整体烟损失分析
Tab.5 Overall exergy loss analysis of the coupled system

烟类型	方案 a	方案 b	方案 c
出口空气烟/(MW h)			39.08
出口电能烟/(MW h)	900.00	967.00	1 100.00
弃电电能烟/(MW h)		1 383.00	1 383.00
太阳能辐射烟/(MW h)	2 955.68	1 323.39	1 323.39
整体烟效率/%	30.45	35.74	42.09
整体烟损失提升百分点		5.29	11.35

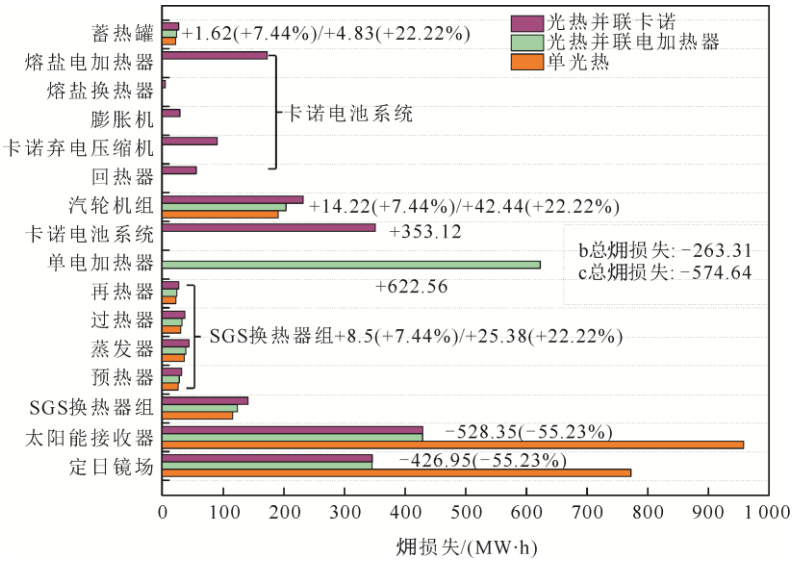


图 12 设备烟损失
Fig.12 Exergy loss of each equipment

3.3 经济性分析

方案 c 储热侧投资成本分布如图 13 所示。假设 3 个系统所用的汽轮机组及配套的发电机是由退役机组改造的，则 3 个系统的发电侧投资均为零，因此初始投资只考虑储热侧投资。由图 13 可以看出，改进系统的定日镜场投资成本最高，其次是蓄热器成本和系统运行维护成本。其他投资包括回热器、电加热器、膨胀机、压缩机等的设备投资按通用投资计算公式计算。

3 个方案储热侧投资成本对比、方案 c 较方案 a、方案 b 新增投资产生收益分析、系统整体经济性分析结果如表 6—表 8 所示[17]。

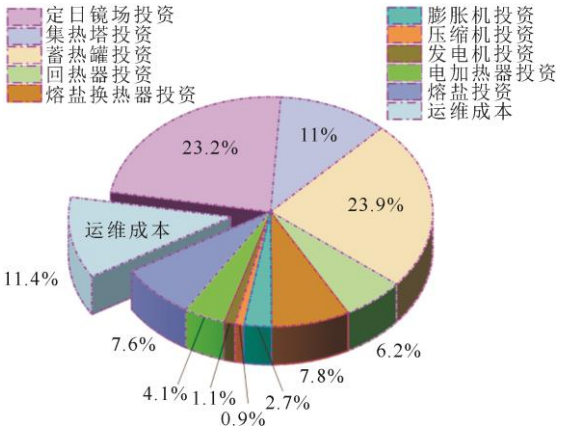


图 13 方案 c 储热侧投资成本分布

Fig.13 Investment cost distribution on the heat storage side of Scheme c

表 6 方案 a、b、c 储热侧投资成本对比分析 单位：亿元

Tab.6 Comparative analysis of investment costs on the heat storage side for Scheme a, b and c

项目		数值
方案 a 储热侧	定日镜场投资	9.72
	太阳能接收器投资	2.06
	蓄热罐投资	3.65
	熔盐投资	1.17
	运维成本	2.24
	总投资	18.84
方案 b 储热侧	电加热器投资	2.00
	定日镜场投资	4.35
	太阳能接收器投资	2.06
	蓄热罐投资	3.92
	运维成本	1.46
	熔盐投资	1.26
	总投资	15.05
方案 c 储热侧	定日镜场投资	4.35
	太阳能接收器投资	2.06
	蓄热罐投资	4.47
	回热器投资	1.16
	熔盐换热器投资	1.47
	膨胀机投资	0.44
	压缩机投资	0.23
	发电机投资	0.21
	电加热器投资	0.77
	熔盐投资	1.43
	运维成本	2.14
	总投资	18.73
方案 c 较方案 a 减少投资		0.11
方案 c 较方案 b 多出投资		3.68

表 7 方案 c 较方案 a、方案 b 新增投资产生收益分析

Tab.7 Analysis of the benefits generated by the additional investment in Scheme c compared to Scheme a and b

项目	方案 c 较方案 a	方案 c 较方案 b
一天内平段多发电量/(MW h)	200.00	133.00
弃电成本/万元	0	0
平段光热发电电价/(元 $(kW\ h)^{-1}$)[18]	0.98	0.98
年内多余收益/万元	3 528	2 346
项目生命周期/a	25	25
建设期/a	2	2
运行期/a	23	23
整个生命周期内多余盈利/亿元	8.11	5.40

表 8 系统整体经济性分析结果

Tab.8 Overall economic analysis results of the system

项目	数值		
	方案 a	方案 b	方案 c
总投资成本/万元	188 400	150 500	187 300
年运维成本/万元	896	584	856
年度燃料成本/万元	0	0	0
年总成本/万元	896	584	856
年总收入/万元	25 878	27 060	29 406
年总利润/万元	24 982	26 476	28 550
动态回收周期/a	21.78	11.12	14.67

如 2.4 节表 3 中所述，满足产生收益的运行时间及弃电成本为零 2 个前提下，本文所提出的改进系统相较于方案 a 原系统可以减少总投资约 0.11 亿元（表 6）。为了提高光热收益，并实现建设、运行期内动态投资回收，本文拟定青海省平段光热发电电价为 0.98 元，高峰时段电价按平段电价上浮 63%执行。考虑售电方案 c 可以在每年较方案 a 多产生 3 528 万元的收益，在整个生命周期中多产生 8.11 亿元的售电收益；而相较方案 b 增加总投资约 3.68 亿元，在整个生命周期多产生 5.40 亿元的售电收益。这也较为符合生产实际情况，未来通过改进储热侧熔盐换热器，成本有望得到降低，投资会进一步减少。由表 8 可以得出，方案 b、方案 c 在方案 a 的基础上进行了改进，方案 b 动态投资回收周期相比方案 a 缩减了约 10.66 年，而方案 c 缩减了 7.11 年。

4 结 论

本研究通过构建基于卡诺电池的光伏弃电消纳系统与光热机组的耦合架构，开展准稳态热力学分析与能量效率及㶲效率优化，得出以下结论。

1）单光热循环发电（方案 a）、电加热器（原始卡诺）耦合光热循环发电（方案 b）、弃电消纳卡诺电池耦合光热（方案 c）3 系统在光热储热时间相同

的情况下，方案 c 的整体能量效率达 39.28%，较方案 a（28.44%）提升 10.84%，较方案 b（34.54%）提升 4.84%，这得益于吸收环境热之后的电热转换效率（121%）的提升。

2）通过㶲损失图量化关键节点㶲损，发现方案 b 和方案 c 相较于方案 a 总㶲损失减少了 263.31 MW ｈ和 574.64 MW ｈ，优化后方案 c 的系统㶲效率提升至 41.80%，较方案 a 和方案 b 分别提升了 11.35%和 5.29%。

3）本文改进系统投资成本较方案 a 原系统整体降低 0.11 亿元，整个生命周期内售电收益增加 8.11 亿元，动态投资回收周期减少了约 7.11 年。这是由于卡诺电池代替一部分定日镜场后的设备成本较低以及更多的售电收益。而相对于替代相同定日镜场面积并进行并联改造的方案 b，研究表明因改造多出的投资大于实际售电收益，这是因为目前卡诺电池系统的研发相较于电加热器并不成熟，所以投资仍然很大。随着卡诺电池系统相关技术的发展，改进系统有望在经济性上超越方案 b 原始卡诺电池系统。

［参 考 文 献］

［1］ 邓振宇, 周家辉, 徐钢, 等. 并/离网风光互补制氢合成氨系统容量-调度优化分析[J]. 热力发电, 2024, 53(9):136.
Deng Z Y, Zhou J H, Xu G, et al. Capacity-scheduling optimization analysis of grid-connected/off-grid wind-solar hybrid hydrogen production and ammonia synthesis system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 136.

［2］ 居文平, 王一帆, 赵勇, 等. 新型电力系统长时储能技术综述[J]. 热力发电, 2024, 53(9): 1.
Ju W P, Wang Y F, Zhao Y, et al. A review of long-term energy storage technologies for new power systems[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 1.

［3］ Zhang X, Sun Y, Zhao W, et al. The Carnot batteries thermally assisted by the steam extracted from thermal power plants: A thermodynamic analysis and performance evaluation[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 297: 117724.

［4］ 刘佳佳, 巨星. 弃电热储能光伏-光热复合发电系统技术经济性分析[J]. 发电技术, 2025, 46(4): 807.
Liu J J, Ju X. Technical and economic analysis of abandoned thermal storage photovoltaic-photovoltaic composite power generation system[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(4): 807.

［5］ 李富春, 田旭, 党楠, 等. 光伏发电与塔式太阳能热发电联合电站配置特性研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 457.
Li F C, Tian X, Dang N, et al. Characterization of photovoltaic power generation and tower solar thermal power plant[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(2): 457.

［6］ 韩瑞, 廖志荣, 于博旭, 等. 面向火电厂改造的熔盐卡诺电池储能系统仿真研究[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3605.
Han R, Liao Z R, Yu B X, et al. Simulation study of molten salt Carnot battery energy storage system for thermal power plant retrofit[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3605.

［7］ Niu J, Wang J, Liu X, et al. Optimal integration of solar collectors to Carnot battery system with regenerators[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 277: 116625.

［8］ 于博旭, 韩瑞, 刘倩, 等. 耦合火电厂灵活改造的卡诺电池储能系统热力学性能研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(4): 1461.
Yu B X, Han R, Liu Q, et al. Thermodynamic performance of a Carnot battery energy storage system coupled with flexible retrofit of a thermal power plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(4): 1461.

［9］ Zhang Q, Jiang K. Heat transport and load response characteristics of a molten salt solar tower power station engaged in peak regulation[J]. Applied Energy, 2024, 371: 123734.

［10］ 路小娟, 白建聪, 范多进, 等. 风光热储互补发电系统容量配置技术研究[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 51.
Lu X J, Bai J C, Fan D J, et al. Research on capacity configuration technology for photovoltaic-thermal storage complementary power generation systems[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 51.

［11］ Xu C, Wang Z, Li X, et al. Energy and exergy analysis of solar power tower plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(17/18): 3904.

［12］ Xu J, Liu W, Wang Z, et al. Comparative investigation on the thermodynamic performance of coal-fired power plant integrating with the molten salt thermal storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 89: 111738.

［13］ Wang Y H, Duan L Q, Ji S Y, et al. Optimization study of a high-proportion of solar tower aided coal-fired power generation system integrated with thermal energy storage[J]. Energy, 2024, 307: 132724.

［14］ Xue X, Li S, Shi T, et al. Performance analysis of a compressed air energy storage incorporated with a biomass power generation system[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 248: 123281.

［15］ Blanquiceth J, Cardemil J M, Henríquez M, et al. Thermodynamic evaluation of a pumped thermal electricity storage system integrated with large-scale thermal power plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 175: 113134.

［16］ 贾振国, 王顺, 管洪军, 等. 耦合熔盐储热系统的火电机组调峰性能与热经济性研究[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 72.
Jia Z G, Wang S, Guan H J, et al. Study on the peak shifting performance and thermal economy of thermal power units coupled with molten salt thermal storage system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 72.

［17］ 赵瀚辰, 韩伟, 姚明宇, 等. 熔盐储热耦合压缩空气储能系统经济性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 1.
Zhao H C, Han W, Yao M Y, et al. Molten salt coupling of compressed air energy storage system for storing heat economy analysis[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 1.

［18］ Zhang M, Shi L, Hu P, et al. Carnot battery system integrated with low-grade waste heat recovery: toward high energy storage efficiency[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57: 106234.

（责任编辑　杨嘉蕾）