

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406133

补气增焓-抽气回热型卡诺电池可行性分析

王志朋¹, 叶琳², 童欢², 侯培然¹, 张家兴¹, 张宇¹, 李敏霞¹, 田华¹
(1.天津大学先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300350;
2.上海船舶设备研究所, 上海 200031)

[摘要] 可再生能源发电的间歇性和波动性对电网的消纳能力提出了巨大挑战, 基于热泵和有机朗肯循环的余热耦合卡诺电池被认为是潜在的解决方案之一, 但其电-电转换效率受热源温度影响较大。为解决这一问题, 提出了一种在充、放电模块分别应用了补气增焓和抽气回热技术的新型高效卡诺电池系统。基于所建立的热力学模型, 研究了该系统在不同运行参数下的循环性能, 并分析了其在广州、南京、哈尔滨 3 座典型城市中的能耗表现和经济性。结果表明: 卡诺电池系统的电-电转换效率随热源温度的升高、环境温度的降低而增大, 且新系统在充放电过程均存在最优中间压比使效率达到最佳; 与传统卡诺电池系统相比, 新系统在广州、南京、哈尔滨 3 座城市的日平均电-电转换效率分别提升了 21.8%、22.5% 和 23.6%, 年净收入分别提升了 45.6%、52.8% 和 50.2%。该研究为卡诺电池系统的提效提供了理论指导。

[关键词] 卡诺电池; 补气增焓; 抽气回热; 能效表现; 经济性

[引用本文格式] 王志朋, 叶琳, 童欢, 等. 补气增焓-抽气回热型卡诺电池可行性分析[J]. 热力发电, 2025, 54(2): 126-134.
WANG Zhipeng, YE Lin, TONG Huan, et al. Feasibility analysis for vapor injection-regeneration Carnot battery[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(2): 126-134.

Feasibility analysis for vapor injection-regeneration Carnot battery

WANG Zhipeng¹, YE Lin², TONG Huan², HOU Beiran¹, ZHANG Jiaying¹,
ZHANG Yu¹, LI Minxia¹, TIAN Hua¹

(1.State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
2.Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: The intermittency and volatility of renewable energy generation poses significant challenges to grid integration. A waste heat-coupled Carnot battery system, based on heat pumps and organic Rankine cycles, is considered a potential solution. However, the system's power-to-power efficiency is greatly affected by waste heat temperature. To address this issue, a novel high-efficiency Carnot battery system is proposed, utilizing vapor injection and regeneration technologies in the charging and discharging modules, respectively. A thermodynamic model is developed to investigate the cycle performance of the system under various operating conditions. Additionally, the energy consumption and economic viability of the system are analyzed in three representative cities: Guangzhou, Nanjing, and Harbin. The results indicate that, the power-to-power efficiency increases with higher heat source temperatures and lower ambient temperatures. Moreover, the new system features an optimal intermediate pressure during both the charging and discharging processes, maximizing efficiency. Compared with the conventional Carnot battery systems, the new system demonstrates a 21.8%, 22.5%, and 23.6% increase in daily average power to power efficiency in Guangzhou, Nanjing, and Harbin, respectively. Furthermore, the annual net income increases by 45.6%, 52.8%, and 50.2% in these cities, respectively. This study provides theoretical guidance for enhancing the efficiency of Carnot battery systems.

Key words: Carnot battery; vapor injection for enthalpy increase; extraction and heat regeneration; energy

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFF0306801)

Supported by: National Key Research and Development Program (2021YFF0306801)

第一作者简介: 王志朋 (1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为热泵储能技术, 3018201206@tju.edu.cn.

通信作者简介: 李敏霞 (1971), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为可再生能源利用, tjmxli@tju.edu.cn.

efficiency performance; economy

以太阳能、风能为主的可再生能源在全球能源结构中的占比稳步上升。然而,可再生能源发电的间歇性和波动性使得电网的消纳能力面临巨大挑战^[1]。储能技术可以捕获、存储各种形式的能量并在需要时释放给用户,在电力系统调峰填谷、可再生能源并网等方面发挥着重要的作用^[2]。目前,国内外较为成熟的储能技术包括抽水储能、压缩空气储能和电化学储能等^[3]。然而,抽水储能和压缩空气储能技术均对周围地理条件有较高要求,电化学储能技术受限于高昂的初始投资和有限的使用寿命,推广难度较高^[4-5]。

卡诺电池是一种新兴储能技术,其遵循着“电-热-电”的转化路径,具有安装灵活性高、不受地理条件限制、建设成本较低等优点^[6]。同时,基于热泵循环(HP)和有机朗肯循环(ORC)的卡诺电池系统可以耦合自然界和工业生产中存在的废热,能够在储能的同时实现低品位热能的回收,因而展现出独特的优势^[7]。目前,已有一些关于余热耦合卡诺电池系统的研究。Mateu-Royo 等人^[8]设计了一种带有废热回收功能的卡诺电池系统。Bellos 等人^[9]将太阳集热模块应用至卡诺电池系统中以提高系统效率。卢沛等^[10]提出了一种全时段耦合余热的卡诺电池系统,该系统可以全面提高卡诺电池的热经济性。

值得注意的是,余热耦合卡诺电池系统的电-电转换效率受热源温度影响较大,使其应用领域受限^[11]。如果能提高系统在充放电循环的能效表现,将会极大提高系统整体效率,进而削弱热源的影响。从系统充电循环来看,传统热泵系统运行温区较宽、系统不可逆损失较高^[12],且压缩机排气温度较高、系统的可靠性与安全性较差^[13]。在实际工程中,补气增焓技术以其形式简单,可靠性强的优势被广泛应用于热泵领域^[14-17]。从系统放电循环来看,传统有机朗肯发电模块同样存在发电效率较低的问题^[18]。但在朗肯循环发电系统中,抽气回热技术是一种较为成熟的提效技术^[19-20],其与热泵中的补气增焓技术形式相似。若将其应用到有机朗肯发电循环中可有效地提升循环效率^[21-23]。

为提高余热耦合卡诺电池系统的效率,本研究提出了一种应用补气增焓和抽气回热技术的新型卡诺电池系统。为探究系统的可行性,本文分析了系统在不同运行参数下的循环特性,并选择哈尔滨、南京与广州作为应用地点,以传统卡诺电池系统作为对比

对象,进一步分析了系统全年能耗表现和经济性。

1 系统介绍

图1和图2分别为补气增焓-抽气回热(VIHP-RORC)卡诺电池系统的原理和温熵图。该系统由补气热泵模块(VIHP)、抽气有机朗肯循环模块(RORC)和蓄热模块(TES)3个部分组成。其中,VIHP模块包括蒸发器、冷凝器、膨胀阀、闪蒸器和补气式压缩机,RORC模块包括蒸发器、冷凝器、工质泵、再生器和抽气式膨胀机。而TES模块由高、低温水箱和配套的水泵以及开关阀组成,用于连接VIHP模块和RORC模块。当VIHP模块工作时,开关阀V2与水泵3开启,水箱2中的低温水经冷凝器1吸热后进入水箱1中储存;当RORC模块工作时,开关阀V1与水泵2开启,水箱1中储存的高温水经蒸发器2放热后重新回到水箱2。表1为典型工况下各点的参数,典型工况下热源温度为60℃、环境温度为15℃。

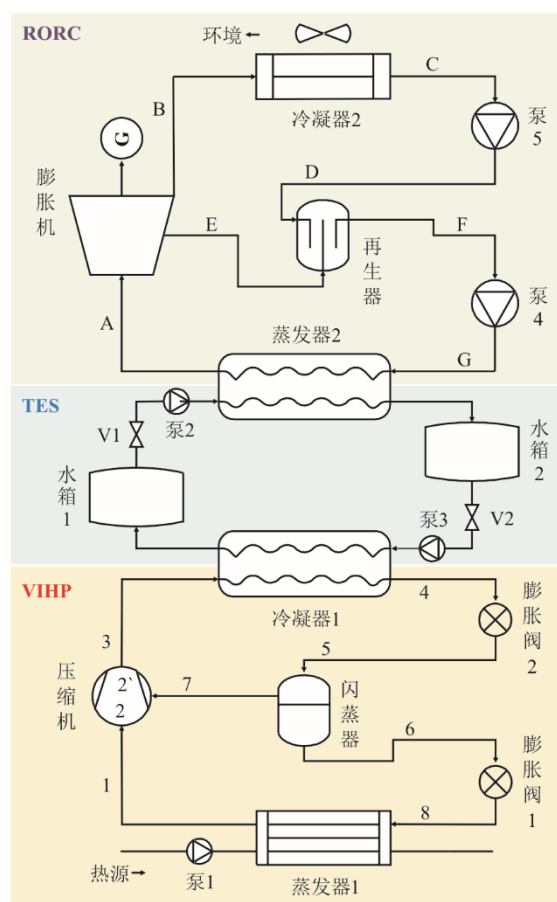


图1 VIHP-RORC 系统原理
Fig.1 Principle of VIHP-RORC system

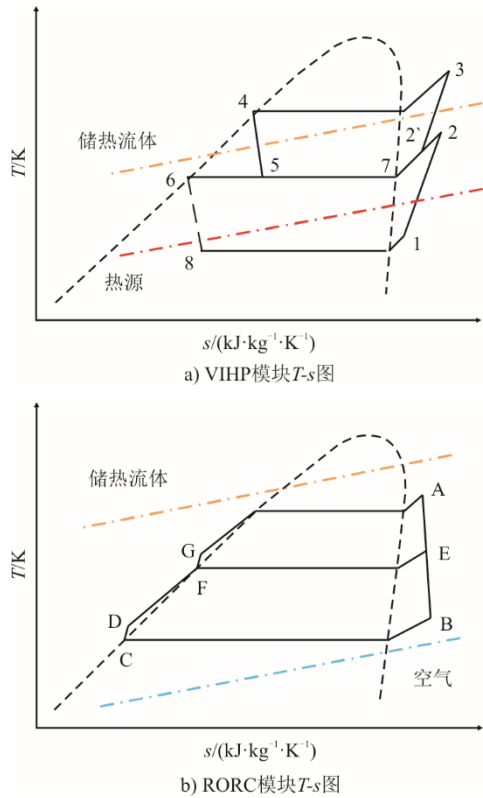


图 2 VIHP-RORC 系统 T-s 图
Fig.2 T-s diagram of VIHP-RORC system

表 1 典型工况下各点参数

Tab.1 Parameters of each point under typical condition

状态点	温度/°C	压力/Mpa	焓值/(kJ·kg ⁻¹)
1	50.0	0.252	440.9
2	81.6	0.612	462.1
2'	80.6	0.612	461.1
3	106.7	1.151	476.0
VIHP 模块			
4	102.6	1.151	332.4
5	77.0	0.612	332.4
6	77.0	0.612	297.5
7	77.0	0.612	457.7
8	45.0	0.252	297.5
RORC 模块			
A	82.9	0.625	463.1
B	45.8	0.151	439.7
C	24.3	0.151	230.0
D	24.4	0.340	230.2
E	65.7	0.340	453.0
F	55.1	0.340	268.9
G	55.3	0.625	269.2

在电网非高峰时段，系统利用 VIHP 模块进行充电循环，将过剩电力以热量的形式储存在 TES 模块；在电网高峰时段，系统切换到 RORC 模块进行放电循环，将储存的热量转换为电力重新输回电网。具体工作原理如下。

1) 充电循环

低温低压工质在蒸发器 1 中被外部热源加热

后，进入压缩机中被一级压缩至中温中压状态；接着，与闪蒸器气态出口处工质混合并被二级压缩至高温高压状态后，进入冷凝器 1 中向 TES 模块放热，然后经膨胀阀 2 节流进入闪蒸器中分离；最后，闪蒸器液态出口处工质经膨胀阀 1 节流至低温低压状态，重新进入蒸发器 1 中完成充电循环。

2) 放电循环

中温高压工质在蒸发器 2 中被 TES 模块加热后，进入膨胀机中经一级膨胀至中温中压状态；接着，部分工质被抽出通入再生器，剩余工质在膨胀机中二级膨胀至低温低压状态后，经冷凝器 2 冷却、工质泵 5 加压进入再生器；最后，工质在再生器中与从膨胀机抽出的工质混合换热后经工质泵 4 加压至中温高压状态，重新进入蒸发器 2 中完成放电循环。

2 模型构建

循环工质对卡诺电池系统的电-电转换效率具有显著影响^[24]，R1233zd(E)因其安全性、不易燃性、环境友好性以及出色的热力学性能而被认为是卡诺电池储能技术最有潜力的工质之一^[25]。因此，本文选择 R1233zd(E)作为 HP 和 ORC 系统的循环工质，热源侧流体为 Novec 649，对所提出的新系统进行热力学和经济性分析。系统设计参数及 R1233zd(E)物性见表 2 和表 3。

表 2 VIHP-RORC 系统设计参数

Tab.2 Design parameters of the VIHP-RORC system

项目	数值	文献
VIHP 模块		
蒸发器热源进口温度/°C	45~70	[11]
蒸发器热源侧温降/°C	10	[24]
蒸发器出口过热度/°C	5	[26]
蒸发器夹点温差/°C	5	[26]
冷凝器出口过冷度/°C	2	[26]
冷凝器夹点温差/°C	5	[26]
压缩机等熵效率	0.80	[11]
RORC 模块		
冷凝器空气进口温度/°C	-25~35	[11]
冷凝器空气侧温升/°C	10	[24]
冷凝器夹点温差/°C	5	[26]
冷凝器出口过冷度/°C	5	[26]
蒸发器夹点温差/°C	8	[26]
蒸发器出口过热度/°C	5	[26]
膨胀机等熵效率	0.85	[11]
泵等熵效率	0.70	[11]
TES 模块		
储热介质	水	[24]
热罐温度/°C	100	[24]
冷罐温度/°C	80	[24]
储热效率	1.00	[27]

表3 R1233zd(E)物性参数
Tab.3 Physical properties of R1233zd(E)

物性	数值	物性	数值
临界温度/°C	165.60	ODP	0.000 34
临界压力/MPa	3.57	GWP	1
沸点/°C	18.26	安全分类	A1

同时,为了便于分析,对数学模型做出如下假设:

- 1) 系统各部件稳定运行,压缩机、膨胀机和泵的效率恒定;
- 2) 换热器均为逆流换热,忽略管道或部件的压降和热损失;
- 3) 工质节流为绝热过程。

2.1 热力学模型

对于压缩机的消耗功率 W_{comp} 和补气压比 α_1 , 计算公式为:

$$W_{\text{comp}} = m_1(h_2 - h_1) + (m_1 + \Delta m_1)(h_3 - h_2) \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \frac{p_2 - p_1}{p_3 - p_1} \quad (2)$$

式中: m_1 为压缩机进口处的工质流量, kg/s; Δm_1 为压缩机补气量, kg/s; h 为工质的比焓, kJ/kg; p 为工质压力, MPa; 下标 1—8 为 VIHP 模块的状态点, 下标 A—G 为 RORC 模块的状态点。

对于膨胀机的输出功率 W_{exp} 和抽气压比 α_2 , 计算公式为:

$$W_{\text{exp}} = m_A(h_A - h_B) + (m_A - \Delta m_A)(h_E - h_B) \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{p_E - p_B}{p_A - p_B} \quad (4)$$

式中: m_A 为膨胀机进口处的工质流量, kg/s; Δm_A 为膨胀机抽气量, kg/s。

对于泵的输入功率 W_{pmp} , 计算公式为:

$$W_{\text{pmp4}} = m_A(h_G - h_F) \quad (5)$$

$$W_{\text{pmp5}} = (m_A - \Delta m_A)(h_D - h_C) \quad (6)$$

对于蒸发器内的吸热量 Q_{eva} , 计算公式为:

$$Q_{\text{eva1}} = m_1(h_1 - h_8) \quad (7)$$

$$Q_{\text{eva2}} = m_A(h_G - h_A) \quad (8)$$

对于冷凝器内的放热量 Q_{con} , 计算公式为:

$$Q_{\text{con1}} = (m_1 + \Delta m_1)(h_3 - h_4) \quad (9)$$

$$Q_{\text{con2}} = (m_A - \Delta m_A)(h_B - h_C) \quad (10)$$

在闪蒸器中, 能量方程为:

$$(m_1 + \Delta m_1)h_5 = m_1h_6 + \Delta m_1h_7 \quad (11)$$

在再生器中, 能量方程为:

$$m_A h_F = \Delta m_A h_E + (m_A - \Delta m_A) h_D \quad (12)$$

2.2 评价指标

电-电转换效率 η_{PHP} 是评价卡诺电池系统的关键指标, 其被定义为放电周期总输出电能与充电周期总输入电能之比^[28], 通常由式(13)计算:

$$\eta_{\text{PHP}} = \eta_{\text{sto}} \eta_{\text{ORC}} \text{COP} \quad (13)$$

$$\eta_{\text{ORC}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{sto}}} \quad (14)$$

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{sto}}}{W_{\text{tot}}} \quad (15)$$

式中: η_{sto} 为储热效率; η_{ORC} 为有机朗肯循环热效率; COP 为热泵性能系数; Q_{sto} 为储热模块中储存的热量, kW; W_{net} 为放电周期内输出的净功率, kW; W_{tot} 为充电周期内输入的总功率, kW。

此外,以热效率为基础的焓效率 η_{ex} 和储能密度 ρ_e 也是储能系统常用的评价指标之一^[24]。焓效率通常由式(16)计算:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\text{EX}_{\text{ORC}}}{\text{EX}_{\text{hs}} + \text{EX}_{\text{HP}}} = \frac{\eta_{\text{PHP}} \text{EX}_{\text{HP}}}{\text{EX}_{\text{hs}} + \text{EX}_{\text{HP}}} \quad (16)$$

$$\text{EX}_{\text{HP}} = \frac{Q_{\text{hs}}}{\text{COP} - 1} \quad (17)$$

$$\text{EX}_{\text{hs}} = m_{\text{hs}}(h_{\text{in}} - h_{\text{out}}) - m_{\text{hs}} T_0 (s_{\text{in}} - s_{\text{out}}) \quad (18)$$

式中: EX_{ORC} 、 EX_{HP} 、 EX_{hs} 分别为系统的输出焓以及电网和耦合热源的输入焓, kW; Q_{hs} 为热源输入热量, kW; m_{hs} 为热源质量流量, kg/s; T_0 为环境温度, K; h_{in} 、 h_{out} 分别为热源进出口比焓, kJ/kg; s_{in} 、 s_{out} 分别为热源进出口比熵, kJ/(kg·K)。

储能密度 ρ_e 通常由式(19)计算:

$$\rho_e = \frac{W_{\text{net}} t}{V_H + V_L} \quad (19)$$

式中: V_H 为高温储水箱的容积, m^3 ; V_L 为低温储水箱的容积, m^3 ; t 为充电时长, h。

对于系统的经济性能, 本文选取卡诺电池放电周期的收入 C_{ORC} 与充电周期的支出 C_{HP} 的差值 ΔC 作为评价指标, 由式(20)计算:

$$\Delta C = C_{\text{ORC}} - C_{\text{HP}} = W_{\text{tot}} t_v (\eta_{\text{PHP}} Z_p - Z_v) \quad (20)$$

式中: t_v 为系统应用地区日谷电的时长, h; Z_p 为系统应用地区的峰电或尖端电价, 元/(kW·h); Z_v 为系统应用地区的谷电电价, 元/(kW·h)。

3 不同参数对系统性能的影响

3.1 补气/抽气压比

图3为VIHP模块COP随补气压比的变化情况。由图3可知, 在相同热源温度下, 随着补气压

比的增加系统热泵模块 COP 呈现先增大后减小的趋势。在热源温度为 60 °C 的情况下，当补气压比从 0.1 增到 0.3 时，系统 COP 从 4.31 增到 4.56；当补气压比继续增到 0.6 时，系统 COP 又减小到 4.45。这是因为随着补气压比的增加，系统的功耗先减小后增大，进而使得系统 COP 先增大后减小。

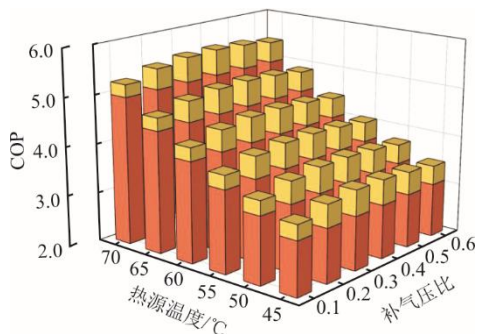


图 3 补气压比对 VIHP 模块 COP 的影响
Fig.3 Effect of injection pressure on COP of VIHP module

图 4 为 RORC 模块 η_{ORC} 随抽气压比的变化情况。由图 4 可知，在相同环境温度下，随着抽气压比的增加系统 ORC 模块 η_{ORC} 也呈现出与先增大后减小的趋势，但变化幅度较小。在环境温度为 -25 °C 的情况下，当抽气压比从 0.1 增加到 0.3 时，系统 η_{ORC} 从 18.3% 增大到 18.5%；当抽气压比继续增加到 0.6 时，系统 η_{ORC} 又减小到 17.9%。原因在于，增加抽气压比会使使得蒸发器吸热量减小，进而使得系统 η_{ORC} 增大，同时也会降低膨胀机的做功能力。

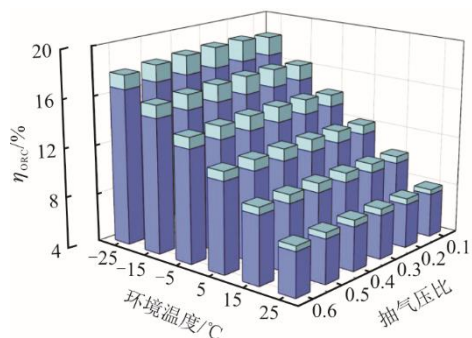


图 4 抽气压比对 RORC 模块 η_{ORC} 的影响
Fig.4 Effect of regeneration pressure on η_{ORC} of RORC module

由图 3 和图 4 可知，在系统稳定运行过程中，VIHP 模块和 RORC 模块分别存在最优中间压比使得 VIHP-RORC 系统的整体能效达到最优。但值得注意的是，系统的最优补气压比、抽气压比分别受热源温度、环境温度的影响。图 5 为最优补气压比随热源温度和最优抽气压比随环境温度的变化情

况。从图 5 可以看出，VIHP 模块的最优补气压比随热源温度的升高而增大，RORC 模块的最优补气压比随着环境温度的升高而增大。因此，当热源温度或环境温度较高时，可以通过增大补气压比、抽气压比的方式使系统达到最优能效。

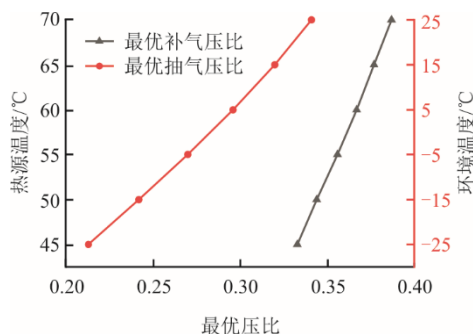


图 5 热源/环境温度对最优补气/抽气压比的影响
Fig.5 Effect of heat source/ambient temperature on optimal injection/regeneration pressure

3.2 热源温度

图 6 为环境温度 15 °C 时 VIHP-RORC 系统的 COP、 η_{ORC} 和 η_{PHP} 随热源温度的变化情况。由图 6 可知，当热源温度升高时，系统热泵模块的 COP 逐渐增大，而 ORC 模块的 η_{ORC} 却保持不变。这是因为热源温度升高导致热泵模块的蒸发温度升高，从而提高了 COP；而储热温度和环境温度保持不变，ORC 模块 η_{ORC} 不受影响。另外，VIHP-RORC 系统的 η_{PHP} 受热泵模块 COP 和 ORC 模块 η_{ORC} 影响，当热源温度升高时，系统 η_{PHP} 也随之增大。当热源温度从 45 °C 增到 70 °C 时，系统热泵模块 COP 从 3.61 升至 5.54、系统 η_{PHP} 从 37.3% 升至 57.2%。

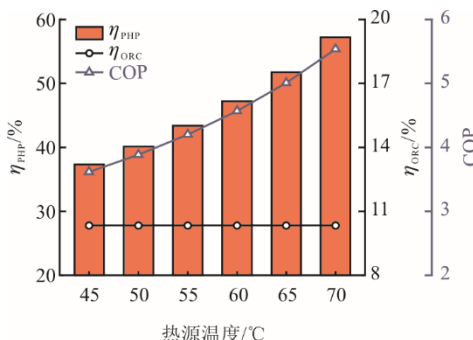


图 6 热源温度对 COP、 η_{ORC} 、 η_{PHP} 的影响
Fig.6 Effect of heat source temperature on COP, η_{ORC} and η_{PHP}

图 7 为环境温度为 15 °C 时 BHP-BORC 系统与 VIHP-RORC 系统的 η_{ex} 和 η_{PHP} 随热源温度的变化情况。由图 7 可知，当热源温度升高时，系统 η_{ex} 也随

之增大,原因在于,系统 η_{ex} 受 η_{PHP} 的影响较大。当热源温度从 45 °C 升高到 70 °C 时,VIHP-RORC 系统的 η_{ex} 从 31.0% 提升至 34.2%。此外,在不同热源温度下,VIHP-RORC 系统效率均高于 BHP-BORC 系统。当热源温度为 60 °C 时,VIHP-RORC 系统 η_{ex} 和 η_{PHP} 为 32.9% 和 47.2%,而 BHP-BORC 系统 η_{ex} 和 η_{PHP} 为 28.1% 和 38.5%。

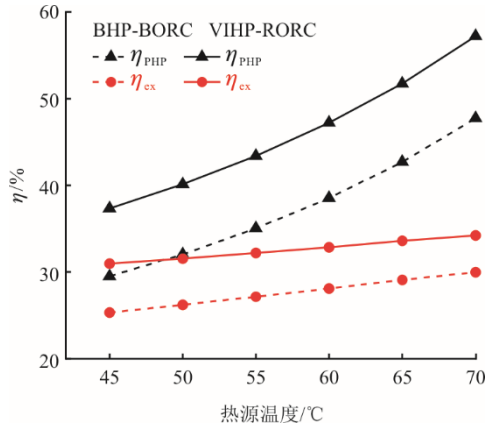


图 7 热源温度对系统效率的影响

Fig.7 Effect of heat source temperature on system efficiency

3.3 环境温度

图 8 为热源温度 60 °C 时系统的 COP、 η_{ORC} 、 η_{PHP} 和 η_{ex} 随环境温度的变化情况。由图 8 可知,当环境温度升高时,热泵模块的 COP 保持不变,而 ORC 模块的 η_{ORC} 、系统 η_{PHP} 和 η_{ex} 逐渐减小。原因在于,当环境温度升高、热源温度和储热温度不变时,系统热泵模块 COP 不受影响,ORC 模块的冷凝温度随着环境温度的升高而增大,使得膨胀机做功能力下降、 η_{ORC} 减小,进而导致系统 η_{PHP} 减小,最终影响系统 η_{ex} 。当环境温度从-25 °C 升高到 25 °C 时,VIHP-RORC 系统 ORC 模块 η_{ORC} 从 18.5% 降低至 8.1%,系统 η_{PHP} 从 84.7% 降低至 37.1%,系统 η_{ex} 从 45.3% 降低至 28.0%。

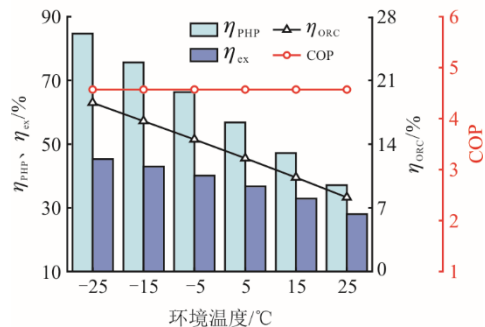


图 8 环境温度对系统性能的影响

Fig.8 Effect of ambient temperature on system performance

4 系统可行性分析

4.1 应用地点全年运行参数

为评估 VIHP-RORC 系统的可行性,本文选取 3 座城市气候差异较为明显的典型城市作为应用地点,并将传统卡诺电池系统作为对比对象,分析 VIHP-RORC 系统在年耗电量、年发电量和年净收入方面的优越性。其中,给定热源温度为 60 °C,热负荷为 160 kW,选取的典型城市为哈尔滨、南京和广州,3 座城市的谷电时段和峰谷电价见表 4,数据来源为各省电网公司关于 2023 年 7 月代理购电工商业用户价格的公告。其中,哈尔滨尖峰电价执行时间为 7 月—9 月、11 月—次年 1 月,广州尖峰电价执行时间为 7 月—9 月,而南京并未执行尖峰电价政策。3 座城市的年气象参数如图 9 所示,数据来源为暖通空调系统模拟软件 DeST。

表 4 典型城市峰谷电价和时长
Tab.4 Peak-valley electricity price and duration of typical cities

城市	哈尔滨	南京	广州
尖峰电价/(元·(kW·h) ⁻¹)	1.354 9		1.751 9
尖峰时长/h	2	0	3
高峰电价/(元·(kW·h) ⁻¹)	1.135 8	1.316 1	1.407 1
高峰时长/h	8	8	7
平时电价/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.760 5	0.787 2	0.839 0
平时时长/h	9	8	9
低谷电价/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.400 5	0.355 7	0.336 0
低谷时长/h	7	8	8

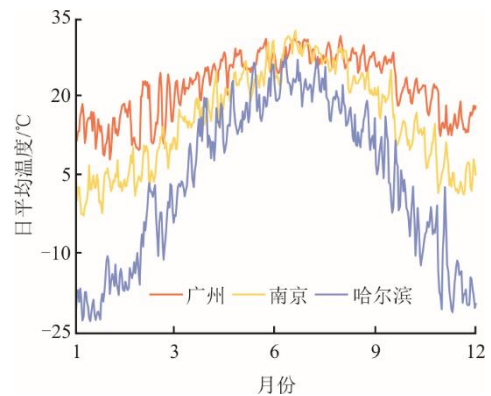


图 9 典型城市全年气象参数

Fig.9 Annual meteorological parameters of typical cities

4.2 系统全年能耗表现

通过系统在不同城市的电-电转换效率、年耗电量以及发电量来评估其能耗表现。图 10 为

VIHP-RORC 系统在广州、南京和哈尔滨的日平均电-电转换效率变化情况。从图 10 可以看出, 3 座城市的日平均电-电转换效率都具有冬季高, 夏季低的特点, 且随着城市纬度的升高, 系统同天的平均电-电转换效率也增大。VIHP-RORC 系统在广州、南京和哈尔滨的年平均日电-电转换效率分别为 39.8%、46.2%和 57.4%。

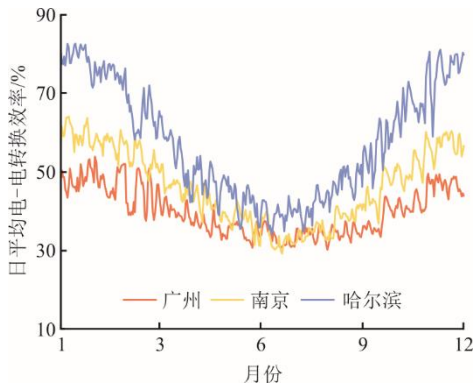


图 10 典型城市日平均电-电转换效率
Fig.10 Average daily power to power efficiency of typical cities

图 11 为 BHP-BORC 系统与 VIHP-RORC 系统在广州、南京和哈尔滨的年耗电量和年发电量情况。与 BHP-BORC 系统相比, VIHP-RORC 系统的年耗电量更少。

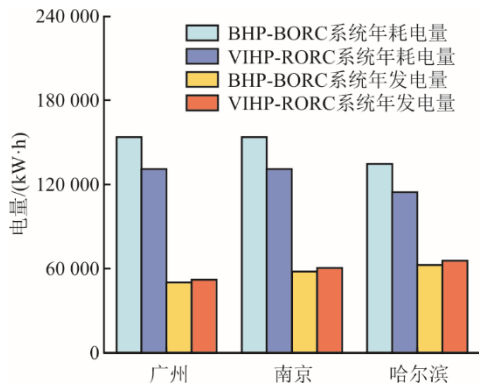


图 11 典型城市年发耗电量 and 年发电量
Fig.11 Annual power consumption and generation of typical cities

BHP-BORC 系统在广州、南京和哈尔滨中的年耗电量分别为 153 899 kW·h、153 899 kW·h 和 134 662 kW·h, 而 VIHP-RORC 系统的年耗电量分别为 130 883 kW·h、130 883 kW·h 和 114 522 kW·h, 约降低了 15%。同时, VIHP-RORC 系统在 3 座城市的年发电量也更高。BHP-BORC 系统在广州、南京和哈尔滨的年发电量分别为 50 269 kW·h、57 991 kW·h 和

62 523 kW·h, 而 VIHP-RORC 系统的年发电量分别为 52 080 kW·h、60 435 kW·h 和 65 736 kW·h。此外, 系统在哈尔滨的年耗电量低于广州和南京是因为哈尔滨谷电时段较短, 以至于系统充电时间较短; 而系统在哈尔滨的年发电量最高是因为哈尔滨的环境温度较低, 系统放电周期发电效率高。

4.3 系统经济表现

通过系统在不同城市的年净收入来评估其经济表现。图 12 为 BHP-BORC 系统与 VIHP-RORC 系统在 3 座典型城市的年净收入情况。其中, BHP-BORC 系统在广州、南京和哈尔滨的年净收入分别为 22 767 元、21 580 元和 24 091 元, 而 VIHP-RORC 系统的年净收入分别为 33 157 元、32 983 元和 36 175 元。从图 12 可以看出, 与 BHP-BORC 系统相比, VIHP-RORC 系统在 3 座城市的年净收入更高, 分别提高了 45.6%、52.8%和 50.2%。此外, 与年耗电量相同的广州相比, VIHP-RORC 系统在南京的年发电量更高, 但由于南京的峰谷电价差值相较于广州更小, 其净收入反而低于广州。因此, VIHP-RORC 系统的经济表现不仅与应用地点的气候有关, 还与当地的峰谷电价有关。

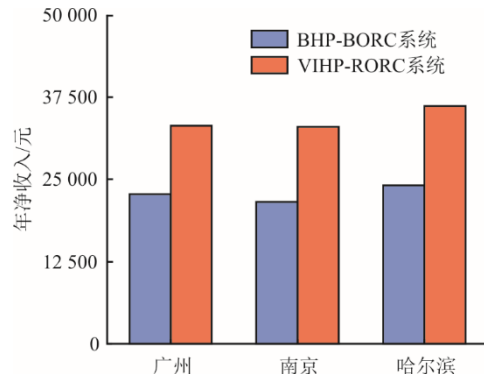


图 12 典型城市年净收入
Fig.12 Average net income of typical cities

5 结 论

本文将补气增焓技术和抽气回热技术与卡诺电池储能技术相结合, 提出了一种新型高效的卡诺电池系统, 并验证了其在能耗表现和经济性方面的优越性, 研究结果如下。

1) 将补气增焓、抽气回热技术分别应用到卡诺电池系统充放电循环中可以显著提高系统性能。当热源温度 60 °C、环境温度 15 °C 时, 系统电-电转换效率可提升 22.5%。同时, 将充放电循环时的补气/抽气压比调至最优可进一步提高系统性能。

2) 本文提出的新型卡诺电池系统具有良好的能效表现和经济性,且在热源温度较高、环境温度较低的情况下表现更为突出。此外,系统的经济性还受应用地点的峰谷电价影响。

值得注意的是,储能密度作为储能系统的重要评价指标之一,直接影响到其空间利用和投资成本。由于本文旨在为卡诺电池系统提出一种高效可行的改进方式,未考虑储热方式对储能密度的影响,系统在典型工况下的储能密度仅为 $2.3 \text{ (kW}\cdot\text{h)/m}^3$ 。因此,在后续研究中,有必要选取更加优秀的储热方式,进一步优化系统性能。

[参考文献]

- [1] LI J, LIU F, LI Z, et al. Grid-side flexibility of power systems in integrating large-scale renewable generations: A critical review on concepts, formulations and solution approaches[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 272-284.
- [2] LI Z, WANG L, JIANG R, et al. Experimental investigations on dynamic performance of organic Rankine cycle integrated with latent thermal energy storage under transient engine conditions[J]. *Energy*, 2022, 246: 123413.
- [3] AGHAHOSEINI A, BREYER C. Assessment of geological resource potential for compressed air energy storage in global electricity supply[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 169: 161-173.
- [4] ZHANG X, QIN C C, LOTH E, et al. Arbitrage analysis for different energy storage technologies and strategies[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 8198-8206.
- [5] 章颖缤, 周宇, 刘琰, 等. 超临界二氧化碳-高温热泵联合储能发电系统设计及分析[J]. *热力发电*, 2024, 53(4): 53-62.
ZHANG Haobin, ZHOU Yu, LIU Yan, et al. Design and analysis of a supercritical carbon dioxide and high-temperature heat pump combined energy storage and power generation system[J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53(4): 53-62.
- [6] DUMONT O, FRATE G F, PILLAI A, et al. Carnot battery technology: a state-of-the-art review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101756.
- [7] STEINMANN W D. Thermo-mechanical concepts for bulk energy storage[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 75: 205-219.
- [8] MATEU-ROYO C, MOTA-BABILONI A, NAVARRO-ESBRÍ J, et al. Multi-objective optimization of a novel reversible high-temperature heat pump-Organic Rankine cycle (HTHP-ORC) for industrial low-grade waste heat recovery[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 197: 111908.
- [9] BELLOS E, TZIVANIDIS C, SAID Z. Investigation and optimization of a solar-assisted pumped thermal energy storage system with flat plate collectors[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 237: 114137.
- [10] 卢沛, 王晋, 陈锴煌, 等. 新型全时段耦合余热的卡诺电池系统构建及热-经济性评估[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(11): 3084-3090.
LU Pei, WANG Jin, CHEN Kaihuang, et al. Thermo-economic evaluation of a novel Carnot battery with thermal integration during charging and discharging process [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(11):3084-3090.
- [11] FRATE G F, FERRARI L, DESIDERI U. Multi-criteria investigation of a pumped thermal electricity storage (PTES) system with thermal integration and sensible heat storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 208: 112530.
- [12] LUO B, ZOU P. Performance analysis of different single stage advanced vapor compression cycles and refrigerants for high temperature heat pumps[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 104: 246-258.
- [13] HUANG M, LIANG X, ZHUANG R. Experimental investigate on the performance of high temperature heat pump using scroll compressor[C]//*Proceedings of the 12th IEA Heat Pump Conference*, Rotterdam, The Netherlands, 2017: 20.
- [14] 张振亚, 曹浩宁, 金听祥, 等. 补气增焓热泵技术的研究现状及展望[J]. *制冷学报*, 2024, 45(2): 12-21.
ZHANG Zhenya, CAO Haoning, JIN Tingxiang, et al. Research status and prospect of vapor injection heat pump technology[J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(2): 12-21.
- [15] WEI F, WANG B, CHENG Z, et al. Experimental research on vapor-injected water source heat pump using R1234ze (E)[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 229: 120595.
- [16] 李江峰, 李帅旗, 宋文吉, 等. 电动汽车 CO₂ 热泵空调系统优化及制冷性能分析[J]. *可再生能源*, 2024, 42(5): 612-619.
LI Jiangfeng, LI Shuaiqi, SONG Wenji, et al. Optimization and cooling performance analysis of CO₂ heat pump air conditioning system for electric vehicle[J]. *Renewable Energy Resources*, 2024, 42(5): 612-619.
- [17] XU S, FAN X, MA G. Experimental investigation on heating performance of gas-injected scroll compressor using R32, R1234yf and their 20wt%/80wt% mixture under low ambient temperature[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 75: 286-292.
- [18] HABIBI H, CHITSAZ A, JAVAHERDEH K, et al. Thermo-economic analysis and optimization of a solar-driven ammonia-water regenerative Rankine cycle and LNG cold energy[J]. *Energy*, 2018, 149: 147-160.
- [19] LAI F, WANG S, LIU M, et al. Operation optimization on the large-scale CHP station composed of multiple CHP units and a thermocline heat storage tank[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 211: 112767.
- [20] 魏海蛟, 鹿院卫, 刘金恺, 等. 基于储热的燃煤机组深度调峰规模化消纳可再生能源发电研究[J]. *热力发电*, 2023, 52(2): 79-89.
WEI Haijiao, LU Yuanwei, LIU Jinkai, et al. Research on large-scale renewable energy power consumption by peak shaving system of coal-fired power unit integrated with thermal energy storage[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(2):79-89.
- [21] EYERER S, DAWO F, SCHIFFLECHNER C, et al. Experimental evaluation of an ORC-CHP architecture based on regenerative preheating for geothermal applications[J]. *Applied Energy*, 2022, 315: 119057.
- [22] KARA O. Evaluation of solar source and ground cooling performance in three different organic rankine cycle (ORC) configurations[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 148(10): 4401-4425.

- [23] FENG Y, WANG X, NIAZ H, et al. Experimental comparison of the performance of basic and regenerative organic Rankine cycles[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 223: 113459.
- [24] HU S, YANG Z, LI J, et al. Thermo-economic analysis of the pumped thermal energy storage with thermal integration in different application scenarios[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 236: 114072.
- [25] FRATE G F, ANTONELLI M, DESIDERI U. A novel pumped thermal electricity storage (PTES) system with thermal integration[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 1051-1058.
- [26] JOCKENHÖFER H, STEINMANN W D, BAUER D. Detailed numerical investigation of a pumped thermal energy storage with low temperature heat integration[J]. Energy, 2018, 145: 665-676.
- [27] EPPINGER B, STEGER D, REGENSBURGER C, et al. Carnot battery: simulation and design of a reversible heat pump-organic Rankine cycle pilot plant[J]. Applied Energy, 2021, 288: 116650.
- [28] FAN R, XI H. Energy, exergy, economic (3E) analysis, optimization and comparison of different Carnot battery systems for energy storage[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 252: 115037.

(责任编辑 邓玲惠)