

热集成卡诺电池性能优化：面向工业综合能源系统的余热利用

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41023.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

热集成卡诺电池性能优化：面向工业综合能源系统的余热利用。在双碳目标引领下，工业能源结构转型进入关键阶段，工业余热作为优质可再生能源资源，其高效回收利用成为降低碳排放、提升能源利用效率的核心路径。浙江大学、浙大城市学院等单位的研究团队针对热集成卡诺电池（TI-CB）在工业余热回收中的性能优化难题取得进展，相关成果发表于ENGINEERING Energy 2026年第20卷第1期，为工业综合能源系统的高效运行提供了全新技术支撑。

论文导读

工业综合能源系统占全球电力需求增长的近40%，但传统能量转换与存储系统依赖化石能源，在多能流耦合和高效储能方面存在显著局限。卡诺电池作为新兴的热能存储技术，凭借选址灵活、能量密度高、循环寿命长等优势，成为工业余热回收的理想选择，尤其适用于60-90℃中低温工业废水余热场景。然而，实际工业工况中边界参数持续波动，TI-CB常处于非设计工况运行，现有研究存在三大核心痛点：静态评估框架无法捕捉动态工况特性、建模方法缺乏全面的非设计工况分析能力、关键设计参数的影响机制尚不明确。针对这些问题，研究团队创新性地提出准动态数学模型与动态评估框架，系统破解了TI-CB在复杂工况下的性能优化难题，为其工程化应用奠定了坚实基础。

论文概要

本研究聚焦60-90℃工业余热回收场景，构建了覆盖设计与非设计工况的TI-CB性能优化体系，通过准动态建模、多变量采样构建多工况集合、系统分析关键参数与工质影响，取得了一系列突破性成果。

核心研究亮点

亮点一：建立卡诺电池动态性能指标体系，精准量化全周期性能

针对卡诺电池电-热-电双向转换的核心特性，突破传统静态指标局限，构建了基于时间积分的动态评估框架。该体系涵盖电能-热能效率（ η_{E2H} ）、储热效率（ η_{sto} ）、热能-电能效率（ η_{H2E} ）、往返效率（ η_{rt} ）及（火用）效率（ η_{ex} ）等关键指标，不仅考虑能量数量，更重视能量品质，有效解决了能量存储与释放过程中的时间失配问题，能更真实反映工业动态工况下的系统运行特性。

亮点二：开展关键设计参数敏感性分析，锁定优化核心参数

采用傅里叶幅值敏感性测试（FAST），在95%置信区间下系统分析8项核心设计参数对COP、 η_{orc} 、 η_{rt} 、 η_{ex} 的影响规律。研究明确热源利用参数（入口温度 T_{hsin} 、温差 ΔT_{hs} ）和热泵温升（ ΔT_{hp2} ）是主导性能的关键因子，其中 ΔT_{hs} 对往返效率的一阶与总敏感性指数最高，为后续系统优化提供了方向。

亮点三：通过多变量采样构建多工况集合，实现全场景覆盖分析

采用周期曲线均匀采样与逆变换法，结合热力学约束验证，构建了全面的多工况集合。初始生成8000组样本，经可行性筛选与区间优化后，最终获得7605组热力学一致的可行样本，既包含设计工况的额定运行状态，也涵盖非设计工况的外部扰动场景，为系统性能的全面分析提供数据支撑。

亮点四：系统解析设计参数与 ORC 工质影响，为工程化应用提供参考

系统探究了设计参数（热源温度、温差、热泵温升）、非设计参数（工质质量流量）及4种典型ORC工质（R1336mzz (Z)、R1233zd (E)、R1234ze (E)、R1224yd (Z)）对TI-CB性能的耦合影响。明确了各参数的作用机制与性能权衡关系，筛选出适配不同场景的最优工质，为实际工程中的系统设计、参数调试与工质选型提供支撑。

关键研究发现

参数敏感性规律：热源利用参数（入口温度 T_{hsin} 、温差 ΔT_{hs} ）和热泵温升（ ΔT_{hp2} ）是影响TI-CB性能的主导因素。其中 ΔT_{hs} 对往返效率影响最显著，一阶与总敏感性指数最高，而储热阶段参数 ΔT_{sto} 因受热力学约束，影响相对有限。

设计工况性能特征：热源温度从60℃升至90℃时，ORC效率（ η_{orc} ）从6.8%提升至10.1%，往返效率（ η_{rt} ）从34.3%提升至67.9%，（火用）效率（ η_{ex} ）从25.3%提升至35.4%；热源温差增大导致不可逆热损失增加， η_{rt} 从62.6%降至45.8%；热泵温升升高时，COP从7.6降至4.8，但 η_{orc} 从7.0%升至10.2%，呈现显著的性能权衡关系。

非设计工况影响机制：ORC工质质量流量波动对 η_{rt} 和 η_{ex} 的影响远大于热泵侧， η_{rt} 受ORC流量波动的变化量（0.0582）是热泵流量波动（0.0138）的4倍以上，这源于ORC膨胀机特性曲线对流量变化更敏感。

工质选型优化：R1336mzz (Z) 热力学性能最优，但存在非线性波动；R1233zd (E) 在全运行范围内稳定性最佳，性能曲线平滑，更适合实际工程应用；R1234ze (E) 低温稳定性突出，R1224yd (Z) 高温性能更优，但存在热滑移特性，需平衡设计复杂度与性能收益。

图文解读

图1完整展示了TI-CB的核心组成与能量流动路径：系统包含热泵（HP）、有机朗肯循环（ORC）、双罐储热系统及四大逆流换热器，工业余热经蒸发器进入系统，通过HP循环提升热能品质后存储于高温罐，放电阶段通过ORC循环实现热能向电能的转换。

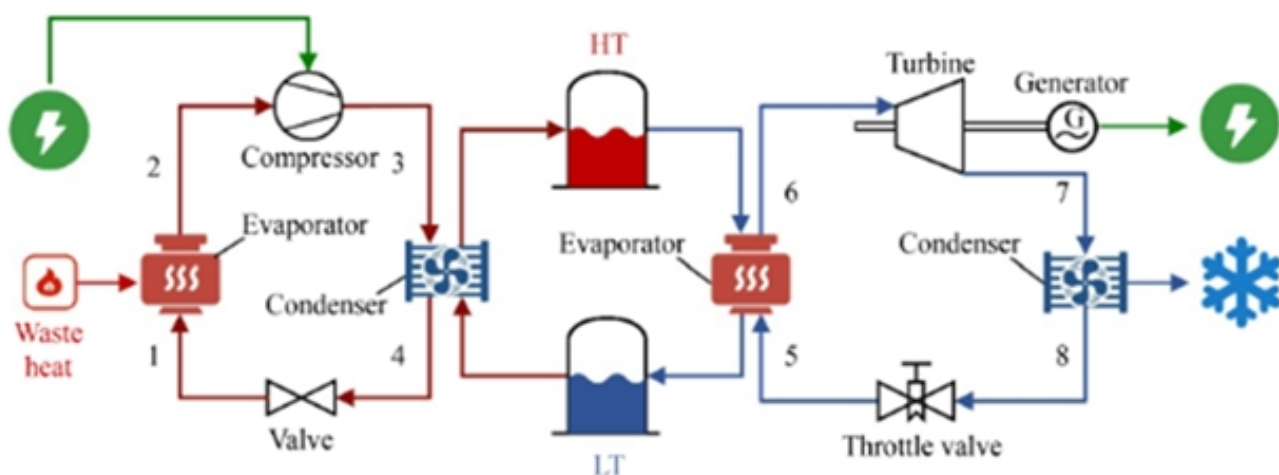


图1.TI-CB系统结构

图2中 (a) 热泵循环和 (b) ORC循环的T-s曲线，清晰呈现了工质在不同状态点的热力学变化：HP循环通过等压蒸发、非等熵压缩、等压冷凝、等焓节流四个过程完成能量充电；ORC循环通过等压吸热、非等熵膨胀、等压冷凝、等熵泵送实现能量放电。曲线形态直观反映了各过程的能量转换效率，为系统热力学建模提供了可视化基础。

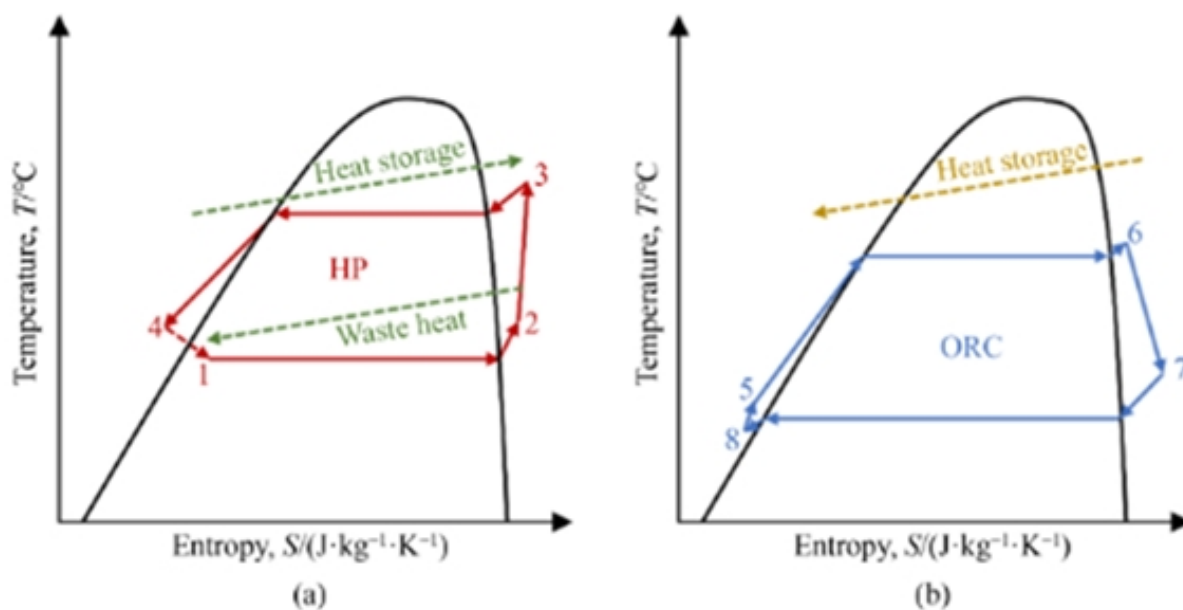


图2.HP与ORC的T-s图

图3详细展示了准动态模型的求解流程：输入边界条件与组件热力学特性后，基于守恒定律构建组件模型，设计工况下直接通过牛顿-拉夫逊算法求解非线性方程组；非设计工况下引入组件特性曲线，动态更新压降、等熵效率等参数后迭代求解，最终输出多维性能评估指标。

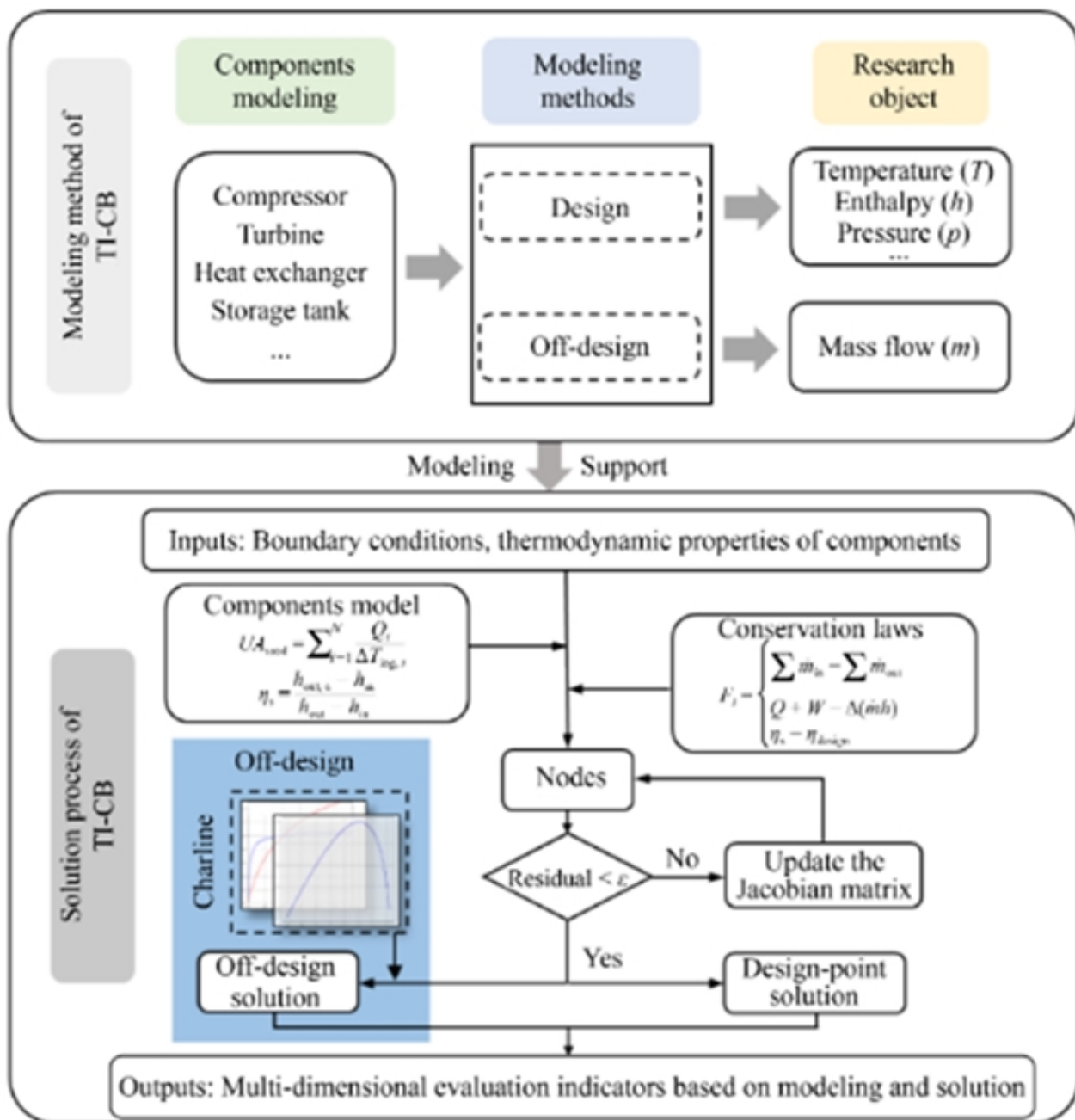


图3.TI-CB系统建模与求解方法

通过傅里叶幅值敏感性测试（FAST），以柱状图形式呈现了各设计变量对COP、 η_{orc} 、 η_{rt} 、 η_{ex} 的一阶与总阶敏感性指数。从图中可直接观察到 $\Delta Thp2$ 对COP、 Th_{sin} 与 ΔThs 对 η_{orc} 和 η_{ex} 的显著影响，为后续系统参数优化指明了方向，避免了盲目调整参数的问题。

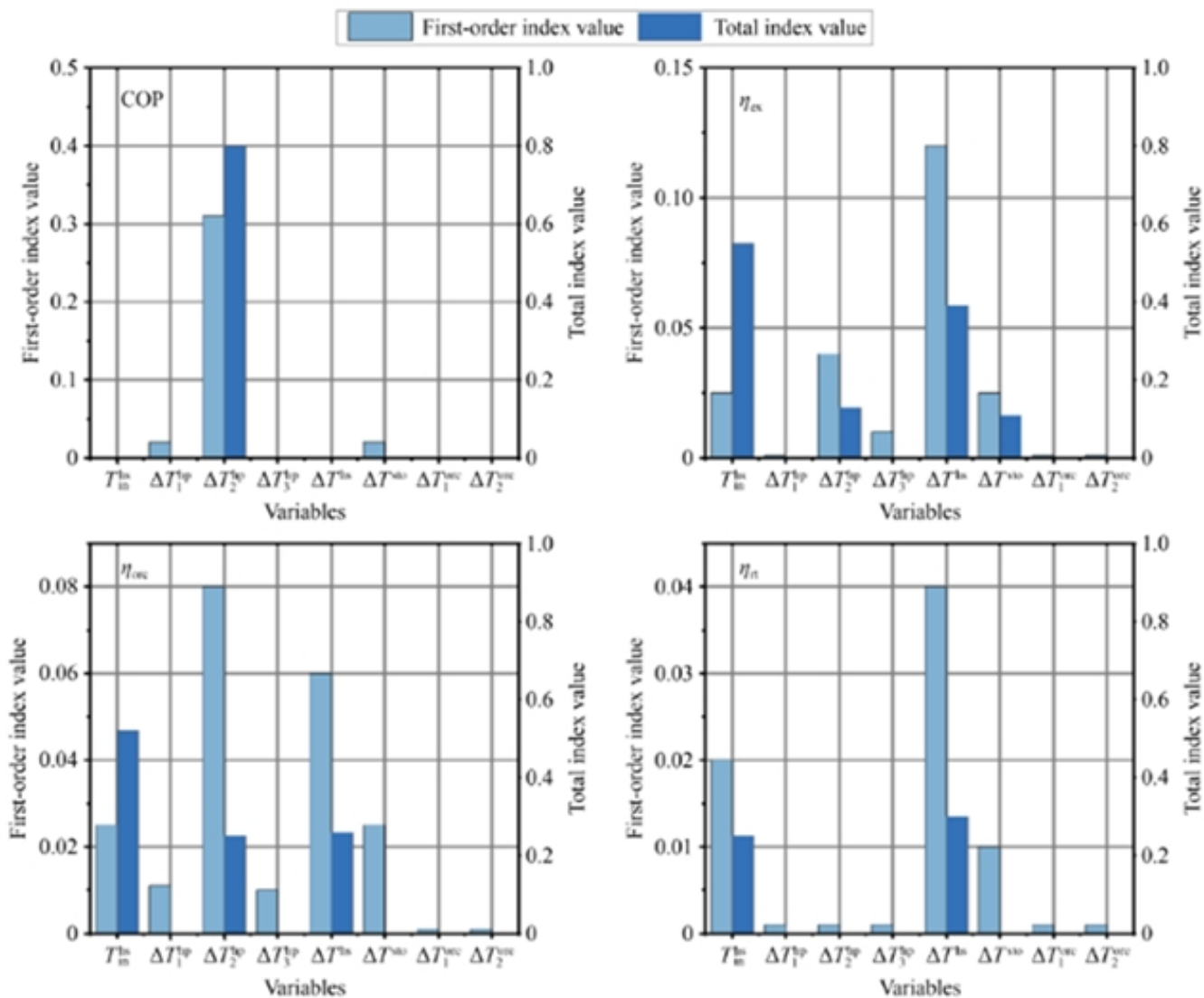


图4.设计变量对性能指标的敏感性分析

图5通过多组子图对比了R1233zd (E)、R1336mzz (Z)等四种工质在不同热源温度、温差条件下的COP、 η_{orc} 、 η_{ex} 变化趋势。直观展示了R1336mzz (Z)的高性能与非线性特征，以及 R1233zd (E)的稳定特性，为不同工程场景下的工质选型提供了直接的可视化参考。

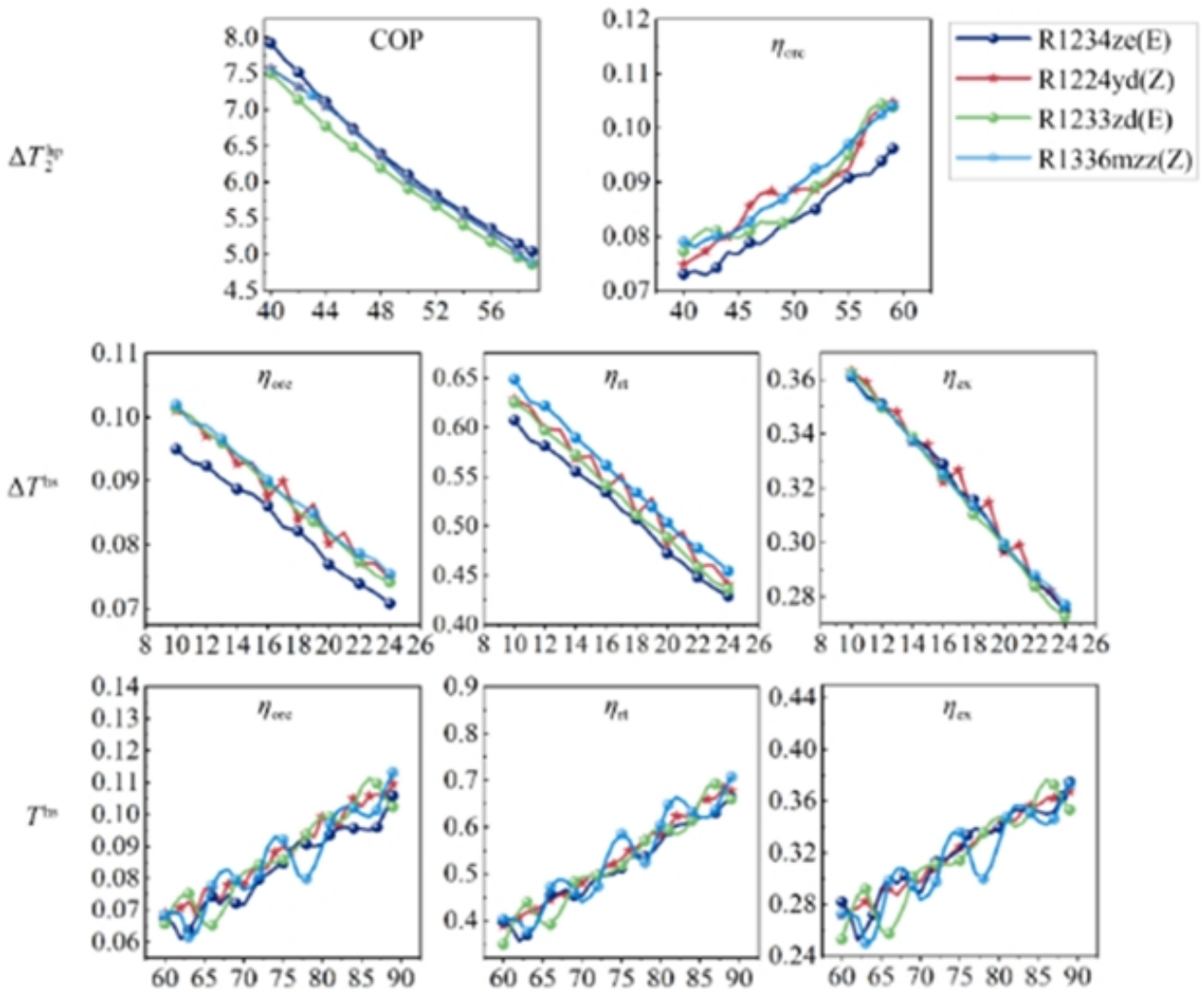


图5.多工况设计工况参数分析

总结与展望

本研究针对工业余热回收中的TI-CB性能优化难题，构建了准动态建模与动态评估体系，通过多工况集合系统揭示了关键参数、工质类型对系统性能的影响机制，核心贡献在于解决了静态模型难以适配动态工况、非设计工况分析不全面、参数优化缺乏理论依据等行业痛点，为TI-CB的工程化应用提供了精准的设计方法与优化路径。

研究团队明确了未来三大研究方向：一是引入人工智能技术训练多工况映射模型，进一步提升计算效率；二是通过增设回热器优化系统构型，改善各阶段热匹配性能；三是拓展工质选型范围，适配更广泛的工业余热温度区间，最大化余热资源利用率。

该研究不仅为热集成卡诺电池的性能优化提供了科学依据，更推动了长时储能技术在工业综合能源系统中的深度应用，对助力工业能源结构转型、实现双碳目标具有重要的理论与工程价值。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/fie/EN/10.1007/s11708-026-1055-3>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。

作者：林雪茹等 来源：《工程·能源》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发