

热能动力系统节能技术研究现状与发展趋势

徐荣徽

中电建新能源集团股份有限公司山东分公司 250000

DOI:10.32629/ems.v8i5.20195

[摘要] 研究聚焦系统能效提升的核心需求,梳理了当前系统优化与新型节能两大领域的研究现状,包括热力系统参数优化、运行工况调控、高效换热及余热回收利用等关键技术的应用逻辑与实践成效。研究通过三大维度开展技术创新,基于焓分析理论实现源头能效提升,依托能级匹配理论推进过程能量梯级利用,借助数字孪生与深度学习技术构建全生命周期智能管控体系。该研究突破传统节能技术局限,完善了热能动力系统节能的理论与技术体系,为工业能源系统低碳转型提供了可行路径与技术支撑。

[关键词] 热能动力系统; 节能技术; 现状; 发展

引言:

当前行业内已形成系统优化与新型技术研发并行的节能研究格局,但传统参数控制粗放、工况适配性不足、余能利用不充分等问题仍未彻底解决,现有技术难以满足全工况高效节能与零碳转型的双重需求。基于此,研究立足前沿热力学理论与数字智能技术,聚焦能量转化源头、过程利用与全生命周期管控,开展节能技术创新,旨在突破现有能效瓶颈,完善技术应用体系,为行业节能降碳提供全新解决方案。

一、热能动力系统节能技术研究现状

(一) 系统优化节能技术研究现状

1. 热力系统参数优化技术

热力系统参数优化技术是热能动力系统节能的基础,其核心逻辑在于通过精准调控系统关键参数,最大限度降低能量传递过程中的损耗,提升系统能量利用效率。该技术以热力学第一、第二定律为理论支撑,聚焦于系统内压力、温度、流量等核心参数的最优匹配,打破传统参数设定的经验化局限,实现参数配置的科学化与精细化。不同于传统粗放式参数控制,参数优化技术通过建立多目标优化模型,综合考量系统能耗、运行稳定性与设备寿命等多重因素,筛选出最优参数组合,既能避免因参数过高导致的能量浪费,也能防止因参数过低引发的系统效率下降。同时,该技术注重参数的动态调整,可根据系统负荷变化、环境条件波动等实时因素,动态适配参数设置,确保系统在全工况下均能维持高效运行状态,为热能动力系统节能奠定坚实的参数基础。

2. 系统运行工况调控技术

系统运行工况调控技术聚焦于热能动力系统的动态运行过程,通过优化工况切换策略、平衡各子系统运行状态,实现系统整体节能目标。该技术核心在于精准识别系统运行过

程中的工况波动规律,结合系统各设备的运行特性,构建工况调控模型,实现不同工况下的平滑切换与高效适配。在实际运行中,热能动力系统常面临负荷波动、设备协同不畅等问题,极易导致局部能耗升高,而工况调控技术可通过实时监测系统运行参数,预判工况变化趋势,提前调整设备运行状态,避免因工况突变引发的能量损耗。此外,该技术还注重子系统间的协同调控,通过优化各子系统的运行节奏与负荷分配,消除子系统间的能量冗余与浪费,实现系统整体运行效率的提升,让热能动力系统在不同运行场景下均能保持最优节能水平。

(二) 新型节能技术研发与应用研究现状

1. 高效换热技术

高效换热技术是提升热能动力系统能量传递效率的关键技术,其核心在于通过优化换热元件结构、选用高效换热材料,强化系统内热量传递过程,减少换热过程中的能量损失。该技术突破传统换热结构的局限,采用紧凑型、高效化的换热设计,增大换热面积、优化流体流动路径,降低流体阻力与热量损耗,实现热量的快速、高效传递。在材料选用上,高效换热技术优先采用导热系数高、耐腐蚀、耐高温的新型换热材料,既提升了换热效率,也延长了换热设备的使用寿命,降低了设备维护成本。同时,该技术还注重换热过程的智能化调控,通过实时监测换热温差、流体流量等参数,动态调整换热工况,确保换热系统始终处于高效运行状态,为热能动力系统的节能提供重要技术支撑,推动系统能量利用效率的持续提升。

2. 余热回收利用技术

余热回收利用技术是实现热能动力系统能量梯级利用的重要路径,其核心逻辑在于将系统运行过程中产生的余热进

行回收、净化与再利用, 变废为宝, 提升系统整体能量利用率。该技术以能量梯级利用理论为指导, 根据余热的温度、压力等特性, 采用针对性的回收方式, 将不同品位的余热用于不同的用能场景, 实现余热资源的分级利用, 避免高品位余热的低水平浪费。不同于传统余热回收技术的单一化模式, 新型余热回收利用技术整合了换热、储能、转化等多项技术, 可实现余热的高效回收与稳定利用, 既能够将余热用于预热燃料、加热工质, 降低系统能耗, 也能够将余热转化为电能、热能等可直接利用的能量形式, 拓展能量利用渠道。此外, 该技术还注重回收系统的优化设计, 减少回收过程中的能量损耗, 提升余热回收效率, 为热能动力系统节能提供新的路径与思路。

二、热能动力系统节能技术创新

(一) 基于焓分析理论的热能动力系统源头能效提升技术创新

本维度聚焦热能动力系统能量输入与转化的源头环节, 以不可逆损失最小化为核心目标, 通过前沿热力学理论指导, 实现化学能-热能-机械能转化环节的原生节能。

1. 基于全工况焓损最小化的贫氧梯度燃烧技术创新

燃烧系统作为热能动力系统化学能-热能转化的核心单元, 其节能技术创新的核心路径, 是基于全工况焓损最小化理论, 构建贫氧梯度燃烧技术体系, 实现燃烧过程不可逆损失的全维度管控。首先需构建全工况下的燃烧焓损量化计算模型, 完整拆解燃烧过程中混合焓损、反应焓损、传热焓损的占比权重与空间分布特征, 明确不同负荷工况下焓损的核心贡献项与管控优先级。随后基于非平衡态热力学理论, 优化燃烧反应的动力学路径, 通过燃料与氧化剂的梯度配比、湍流流场的精细化调控, 降低反应过程的不可逆熵产。同步搭建燃烧场与温度场的耦合调控机制, 抑制局部高温区的生成, 减少辐射传热过程的能级失配损失。最终通过多物理场的协同优化, 实现燃烧过程全工况焓效率的持续提升。

2. 基于有限时间热力学的梯级相变混合工质循环技术创新

工质循环系统是热能动力系统热能-机械能转化的载体, 其节能技术创新的核心方向, 是基于有限时间热力学理论, 研发梯级相变混合工质循环技术, 突破传统朗肯循环的能效上限。需先基于相变热力学基本原理, 构建梯级相变工质的物性筛选与匹配模型, 针对不同温区的热能品位, 筛选具有匹配相变温度与高相变焓值的非共沸混合工质体系。随后重构工质循环的热力流程, 通过梯级蒸发与梯级冷凝的流程设

计, 大幅缩小工质与热源、冷源之间的传热端差, 降低传热过程的不可逆损失。还要基于有限时间热力学的最优循环路径准则, 优化循环的关键运行参数, 精准匹配工质的压力、温度与流量特性, 实现循环热效率与焓效率的协同提升。同时规避工质相变过程中的两相流不稳定问题, 保障循环系统在宽工况范围内的稳定高效运行。

(二) 基于能级匹配理论的热能动力系统过程能量梯级利用技术创新

1. 全温区余压余热的能级匹配式全链条回收技术创新

余压余热回收系统是挖掘热能动力系统过程节能潜力的核心环节, 其节能技术创新的核心准则, 是基于能级匹配理论, 开发全温区余能梯级回收技术, 实现不同品位余能的全量高效利用。立足于热力学第二定律的能级适配原则, 先建立余能资源的温区、压区与品位分级体系, 精准划定不同余能的能级区间与可利用边界。经由不可逆传热损失的量化分析模型, 匹配对应温区的能量回收环节, 设计“高品位余能优先做功、中品位余能梯级换热、低品位余能深度提效”的全链条回收流程。依托相变换热与功热转换技术的深度耦合, 搭建余压能与余热能的协同回收路径, 彻底避免高品位能降级使用的不可逆损失。进而通过全流程的能级匹配优化, 消除余能回收过程中的能级失配问题, 最终实现系统过程能量利用效率的最大化。

2. 全局能量优化导向的跨系统能量网络协同技术创新

跨系统能量耦合网络是打破单一热能动力系统能效瓶颈的基础架构, 其节能技术创新的核心逻辑, 是基于全局能量优化理论, 构建跨系统能量网络协同技术, 实现区域能源利用效率的系统性提升。以能级匹配与梯级利用为核心准则, 先构建多系统能量供需的动态匹配模型, 完整厘清不同系统的能量输出特性、用能需求特征与负荷波动规律。通过能量品位的精准划分, 制定高品位电能联动、中品位热能互补、低品位余能互通的多维度耦合机制。优化多系统间的能量传输路径与动态调度策略, 最大限度降低能量传输过程中的压降损失与散热损失。同步建立耦合网络的动态平衡调控体系, 精准适配不同系统的负荷波动特性, 彻底规避供需错配带来的能量浪费。最终通过多系统的深度耦合与协同优化, 实现全网络能量利用效率的系统性跃升。

(三) 基于数字孪生与深度学习的热能动力系统全生命周期智能管控节能技术创新

1. 多物理场双向映射的数字孪生全工况能效寻优技术创新

数字孪生能效管控系统是实现热动力系统全工况动态节能的支撑,其节能技术创新的核心手段,是基于多物理场双向映射理论,研发数字孪生全工况能效寻优技术,实现系统运行参数的全局最优调控。技术人员围绕热动力系统的全物理流程与全运行工况,借助多物理场耦合仿真技术,构建与物理实体完全映射的高精度数字孪生体。通过实时运行数据的双向交互,精准映射物理系统的实时运行状态、能效特征与损失分布规律。基于构建的虚拟仿真环境,开展全参数空间的全局寻优仿真,完整遍历不同工况下的最优运行参数组合。同步搭建实时闭环调控通道,将寻优得到的最优参数组合输出至物理系统的执行单元,实现系统运行状态的动态优化调整。最终通过全工况的持续寻优与闭环调控,彻底消除系统偏离最优工况的能效损失,实现系统运行效率的持续提升。

2. 时序数据驱动的深度学习能力衰减抑制与故障预判技术创新

依托系统全生命周期的运行数据与能效特征数据,可构建多维度、全时序的能效特征数据集,精准提取系统能效衰减的关键特征参数与演化规律。基于深度学习的时序预测算法,搭建系统能效衰减趋势与故障风险的超前预判模型,精准识别系统部件性能劣化、管路结垢、密封失效等能效衰减核心诱因。针对识别出的能效衰减风险,制定定向的预防性维护与性能恢复策略,提前消除导致系统能效下降的潜在因素。同步优化系统的运行参数,精准适配部件性能的劣化趋势,最大限度降低性能劣化带来的能效损失。最终通过全生命周期的预防性管控,维持系统长期处于高效运行区间,实现全生命周期的节能目标。

三、未来展望

热动力系统节能技术创新的未来发展,将以“逼近热力学极限、全生命周期能效最优、适配零碳能源体系”为核心主线,持续深化前沿热力学理论与新一代数字智能技术的深度融合,突破传统热力系统的能效边界与应用局限,为双碳目标下工业能源系统的低碳转型提供核心理论与技术支持。

未来源头能效提升技术,将持续拓展非平衡态热力学、有限时间热力学的理论应用边界,突破传统燃料与热力循环的固有约束,构建零碳燃料适配的低熵产梯度燃烧体系,研发跨温区、跨临界新型相变热力循环,从能量转化的热力学本质上压缩不可逆损失,持续逼近理想卡诺循环的能效上

限,实现化学能-热能-机械能转化环节的原生节能能力跃升。

过程梯级利用技术,将打破单一热力系统的物理边界,深化能级匹配理论的全域化应用,构建多能互补、跨域协同的全域能源网络,实现不同品位、不同形态能量的跨时空精准匹配与全量梯级利用,彻底消除能级失配带来的不可逆损耗,推动系统节能从单一设备优化向区域能源系统全局最优的根本性转变。

四、结束语

总体来说,热动力系统节能技术创新研究通过系统梳理现状、聚焦核心痛点、突破技术瓶颈,形成了源头减损、过程提效、全周期管控的三维创新体系。该体系实现了热力学理论与数字技术的深度融合,打破了传统节能技术的应用边界,不仅提升了热动力系统的全工况能效,更构建了从能量转化到利用的全链条节能模式。

[参考文献]

[1]李树强. 火力发电厂热动力系统优化与节能改造研究 [J]. 科技与创新, 2025, (21): 144-146. DOI:10.15913/j.cnki.kjycx.2025.21.042.

[2]武鑫. 火力发电厂热动力系统优化与节能改造研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65 (07): 233-235. DOI:10.19769/j.zdhy.2024.07.071.

[3]文重立. 热动力系统优化节能改造 [J]. 节能与环保, 2023, (08): 53-55.

[4]马金海. 热动力系统节能改造研究 [J]. 光源与照明, 2023, (04): 225-227.

[5]李坤. 发电厂热动力系统优化与节能改造 [J]. 化学工程与装备, 2022, (11): 246-247. DOI:10.19566/j.cnki.cn35-1285/tq.2022.11.010.

[6]武英杰. 对内燃机热动力优化与节能改造探寻 [J]. 内燃机与配件, 2021, (20): 100-101. DOI:10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2021.20.041.

[7]苏来友. 对内燃机热动力优化与节能改造的思考 [J]. 内燃机与配件, 2021, (06): 217-218. DOI:10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2021.06.104.

作者简介:徐荣徽,男,汉族,出生日期:1984.2,籍贯:烟台市莱阳市,研究方向:热能与动力,职称:副高级工程师,学历:本科,职务:工程建设部副主任,肥城项目经理。