

热能动力联产系统节能技术

武学治

宁夏弘德包装材料有限公司 宁夏 吴忠 751100

摘要：热能动力联产系统通过多级能量转换实现能源高效利用，其节能技术聚焦余热回收与系统优化。核心手段包括：锅炉排烟余热回收技术（如低压省煤器串联、烟气-水换热器协同脱硫塔），蒸汽凝结水背压/加压组合回收技术，以及工艺余热梯级利用技术。设备层面采用高效燃烧器、背压式汽轮机提升转化效率，智能控制系统依托数字孪生、AI负荷预测实现动态优化。该技术可降低煤耗、提升综合能效，助力碳中和目标实现。

关键词：热能动力；联产系统；节能技术

引言：在全球能源危机加剧与碳中和目标驱动下，提升能源综合利用效率已成为工业领域可持续发展的关键。热能动力联产系统通过整合热、电、冷等多能输出，突破传统能源转换单一模式，实现能源梯级利用与污染物协同控制。然而，系统运行中仍存在余热资源浪费、设备能效瓶颈、智能调控不足等问题。本文聚焦余热深度回收、设备能效提升、智能控制优化三大技术路径，系统阐述其原理、应用案例与推广策略，为推动能源结构转型提供技术参考。

1 热能动力联产系统节能技术理论基础

1.1 能源梯级利用原理

（1）热力学第一定律与第二定律在系统中的应用：热力学第一定律明确能量守恒特性，为联产系统能量核算提供依据，确保系统内能量输入与输出、损失的平衡核算精准性；热力学第二定律揭示能量品质衰减规律，指导系统规避无效能量转换，明确能量利用的核心方向是减少不可逆损失，二者共同构成梯级利用的理论基石。（2）能量品质匹配原则：高温热能用于发电，中低温热能用于供热/制冷。该原则依据能量品质高低匹配对应利用场景，高温热能具备高做功能力，优先用于发电实现能量高效转化；发电后产生的中低温余热则用于供热或驱动制冷设备，避免高品质能量低品位利用的浪费，最大化提升全流程能量利用率。

1.2 多能互补系统模型

（1）热-电-冷三联产系统结构：核心由能源转换单元、负荷输出单元及储能调节单元构成。能源转换单元含燃气轮机、余热锅炉等设备，实现一次能源向电、热的转化；负荷单元根据需求分配电、热、冷能；储能单元通过蓄热、蓄冷设备平抑负荷波动，保障系统稳定运行，形成“能源输入-多元转换-精准供能”的闭环结构。

（2）数学模型构建：以质量平衡、能量平衡、火用分析

为核心。质量平衡确保系统内工质（如蒸汽、冷水）流量收支均衡；能量平衡量化各环节能量传递与损失；火用分析聚焦能量品质变化，精准定位节能潜力点，三者结合实现系统运行状态的定量描述与优化方向判断。

1.3 节能技术分类框架

（1）余热回收类（锅炉排烟、蒸汽凝结水、工艺余热）：针对系统各环节余热资源，采用烟气余热换热器、凝结水回收装置、工艺余热回收系统等设备，将散失的热能回收再利用，降低一次能源消耗，是联产系统节能的基础手段。（2）设备优化类（高效燃烧器、背压式汽轮机、变频泵）：通过升级核心设备提升能源转化效率。高效燃烧器强化燃料燃烧充分性，减少化学不完全燃烧损失；背压式汽轮机适配联产工况，提升热电转化效率；变频泵根据负荷动态调节流量，降低动力设备能耗。（3）系统控制类（智能负荷预测、AI优化调度）：依托智能算法实现系统精细化管控。智能负荷预测精准预判电、热、冷需求变化；AI优化调度根据预测结果动态调整设备运行参数与能源分配方案，保障系统在全负荷区间均处于最优节能运行状态^[1]。

2 热能动力联产系统核心节能技术

2.1 余热深度回收技术

2.1.1 锅炉排烟余热回收

（1）低压省煤器串联技术：在热能动力联产系统中，锅炉排烟是主要的余热损失来源之一，低压省煤器串联技术通过将低压省煤器合理串联接入系统，充分利用排烟余热加热锅炉给水。实际应用案例显示，该技术可有效降低排烟温度20-24℃，减少排烟热损失，进而使锅炉效率提升2-3%，显著提升了系统的能源利用效率，降低了单位产品的能耗成本。（2）烟气-水换热器与脱硫塔协同优化：传统烟气处理过程中，烟气-水换热器与脱硫塔往往独立运行，存在能源浪费和处理效率不足的问题。

题。通过协同优化设计,将烟气-水换热器的余热回收与脱硫塔的工况调节相结合,利用回收的烟气余热预热脱硫塔入口烟气或脱硫剂,不仅提升了脱硫反应效率,降低了脱硫能耗,还进一步强化了余热回收效果,实现了烟气处理与节能的双重效益。

2.1.2 蒸汽凝结水回收

(1) 背压回水与加压回水组合方案:蒸汽凝结水中蕴含大量的显热和优质水资源,传统回收方式回收率较低,造成能源和水资源的双重浪费。背压回水与加压回水组合方案根据系统不同工况下凝结水的压力和流量特性,合理匹配背压回水系统和加压回水系统。该方案可有效克服单一回水方式的局限性,将凝结水回收率提升至95%以上,回收的凝结水重新用于锅炉给水或其他工艺环节,大幅降低了新水补给量和能源消耗。(2) 疏水器动态压力控制技术:疏水器是蒸汽系统中控制凝结水排放、防止蒸汽泄漏的关键设备,其运行稳定性直接影响系统节能效果。疏水器动态压力控制技术通过安装智能压力传感器和调节装置,实时监测疏水器前后的压力变化,动态调整疏水器的开启度和排放频率。该技术可有效避免疏水器因固定工况运行导致的蒸汽泄漏或凝结水滞留问题,提升疏水效率,减少能源损失,保障系统稳定运行^[2]。

2.1.3 工艺余热梯级利用

工艺余热梯级利用基于能量品位匹配原则,根据不同工艺环节的温度需求,将余热按品位高低进行分级利用,最大化提升余热利用效率。在纺织印染行业,该技术得到了广泛应用,典型案例显示,通过引入热泵技术,将印染废水蕴含的余热进行提升后,直接用于染色工艺的加热环节,替代了传统的蒸汽加热方式,不仅有效回收了废水余热,还使生产过程的节能率达30%,同时降低了废水排放的温度,减少了对环境的热污染。

2.2 设备能效提升技术

2.2.1 高效燃烧技术

(1) 分级燃烧与富氧燃烧组合应用:传统燃烧方式存在燃烧不充分、污染物排放高、能源利用率低等问题。分级燃烧与富氧燃烧组合应用技术,通过将燃烧过程分为多个阶段,合理分配空气和燃料的供给比例,同时引入富氧空气替代部分空气参与燃烧。某电厂应用该技术后,不仅使NO_x排放降低60%,减少了环境污染,还优化了燃烧工况,使煤耗减少5g/kWh,显著提升了锅炉的燃烧效率和能源利用效率^[3]。(2) 生物质混烧技术:在传统燃煤机组中引入生物质混烧技术,将秸秆、木屑等生物质燃料与煤炭按一定比例混合燃烧,不仅可以降

低煤炭的消耗量,还能利用生物质燃料的可再生特性,减少碳排放。实际应用数据显示,当秸秆掺烧比例达20%时,机组的碳排放强度下降18%,同时兼顾了能源供应的稳定性和环保效益,为能源结构转型提供了有效路径。

2.2.2 汽轮机优化

(1) 背压式汽轮机替代凝汽式机组:凝汽式汽轮机在运行过程中,大量蒸汽在凝汽器中凝结,造成巨大的冷源损失,能源利用率较低。采用背压式汽轮机替代凝汽式机组,可将汽轮机排出的蒸汽直接用于供热或其他工艺环节,彻底消除冷源损失。改造后,系统热电比从0.8提升至1.5,能源利用率提高40%,实现了电能和热能的高效协同供应,特别适用于热电联产需求旺盛的园区和工业企业。(2) 汽轮机通流部分改造:汽轮机通流部分的气动性能直接影响机组的发电效率,长期运行后,通流部件易出现磨损、腐蚀等问题,导致通流效率下降。通过对汽轮机通流部分进行优化改造,包括采用新型气动叶片、优化流道设计、修复受损部件等措施,可有效降低蒸汽在通流过程中的能量损失。某电厂实施通流部分改造后,供电煤耗下降8g/kWh,机组运行效率显著提升,延长了设备使用寿命,降低了运维成本。

2.3 智能控制系统技术

2.3.1 数字孪生技术

(1) 构建系统虚拟模型,实现运行参数实时优化:数字孪生技术通过采集热能动力联产系统的设备参数、运行数据、环境数据等,构建与物理系统完全映射的虚拟模型。基于虚拟模型,可对系统运行状态进行实时监测、模拟分析和故障预警,同时根据负荷变化和能源需求,动态优化系统的运行参数,如锅炉燃烧负荷、汽轮机转速、余热回收量等,确保系统始终运行在最优工况。(2) 案例:某化工园区依托数字孪生技术构建了热能动力联产数字孪生平台,整合了园区内的锅炉、汽轮机、余热回收设备、供热管网等所有能源设施。通过该平台,实现了对园区能源生产、传输、消耗全流程的智能化管控,精准匹配能源供需平衡,最终将园区综合能效提升7%,同时降低了设备故障停机率,提升了能源供应的可靠性^[4]。

2.3.2 AI负荷预测

采用LSTM神经网络预测模型,针对热能动力联产系统的电力负荷和热力负荷进行精准预测。LSTM神经网络具有强大的时序数据处理能力,可充分挖掘历史负荷数据、气象数据、生产计划等因素与负荷需求之间的关联规律,有效提升预测精度。实际应用中,该模型的电力需求预测误差小于3%,基于精准的负荷预测结果,可提

前优化热网调度方案，合理分配能源资源，避免能源过度生产或供应不足的问题，使热网调度效率提升25%，降低了能源浪费和系统运行成本。

2.3.3 区块链能源管理

基于区块链技术构建分布式能源交易平台，打破传统能源管理的集中式模式，实现园区内余热、余压等分布式能源的市场化调配。区块链技术的去中心化、不可篡改特性，确保了能源交易数据的真实性和安全性，为园区内的能源生产方、消耗方提供了透明、高效的交易渠道。通过该平台，可将各企业产生的余热余压进行集中整合和优化分配，实现能源资源的跨企业、跨环节高效利用，提升了园区整体的能源配置效率，推动了分布式能源的规模化应用。

3 热动力联产系统推广应用的挑战与对策

3.1 技术瓶颈

(1) 余热回收设备腐蚀问题：在余热回收过程中，烟气、凝结水等介质常含酸性成分，易导致设备腐蚀，缩短使用寿命并影响运行稳定性。对此，提出采用纳米涂层防腐技术，通过在设备表面制备高性能纳米陶瓷或金属涂层，增强设备耐腐蚀性，降低腐蚀损耗，保障余热回收系统长期稳定运行。(2) 智能控制系统数据安全：智能控制系统依赖大量运行数据传输与存储，易面临数据泄露、篡改等安全风险。建议采用边缘计算架构，将数据处理环节下沉至边缘终端，减少核心数据远程传输，降低安全隐患，同时提升数据处理实时性，保障系统智能调控功能安全可靠。

3.2 经济性障碍

(1) 初期投资成本高：热动力联产系统涉及设备改造、智能管控系统搭建等，初期投资规模较大，制约中小企业推广。提出采用合同能源管理（EPC）模式，由节能服务公司承担前期投资与改造任务，企业按节能收益分期支付费用，降低初始资金压力。(2) 节能收益分配机制不完善：多方参与的联产项目中，节能收益分配

缺乏统一标准，易引发利益纠纷。建议建立碳交易衔接机制，将节能降碳产生的碳资产纳入分配体系，明确各参与方收益占比，依托碳交易市场提升节能收益，调动各方参与积极性。

3.3 政策与标准缺失

(1) 呼吁出台《热动力联产系统能效限定值》强制性标准：当前行业缺乏统一的能效约束标准，部分低能效设备仍在运行。亟需出台强制性标准，明确系统能效底线，淘汰落后产能，推动行业技术升级与能效提升。(2) 推动将余热利用纳入可再生能源配额制（RPS）：余热利用尚未被充分纳入能源激励政策体系，政策支持力度不足。应推动将其纳入可再生能源配额制，赋予余热利用对应的能源配额指标，通过政策引导提升企业开展余热利用的主动性，扩大联产系统推广范围。

结束语

热动力联产系统节能技术作为能源高效利用的核心路径，通过余热深度回收、设备能效升级与智能控制优化，显著提升了能源综合利用率，降低了碳排放与运行成本。未来需进一步突破设备防腐、数据安全等技术瓶颈，完善碳交易衔接机制与能效标准体系，加速技术产业化应用。随着政策支持与技术创新双轮驱动，该技术将为工业领域实现“双碳”目标提供关键支撑，推动能源系统向绿色低碳方向转型。

参考文献

- [1]王联盟.火电厂热动力工程中的节能技术研究[J].中国战略新兴产业,2024,(36):113-115.
- [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.
- [3]杜希林.热动力联产系统的节能优化设计探析[J].工程建设与设计,2021,(01):120-121.
- [4]张恒超,徐晓妮.热能与动力工程中的节能技术研究[J].中国设备工程,2025,(05):227-229.