

热能动力视角下电厂设备管理与技术管理的协同发展

杨尚霖

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025110052

摘要：本文从热能动力视角探讨电厂设备与技术管理的协同发展，重点围绕锅炉、汽轮机、燃气轮机等核心热力设备的优化运行与技术改造展开分析。文中涉及锅炉燃烧调整、汽轮机滑压运行、燃机联合循环效率提升等多方面内容，提出基于大数据与智能算法的设备能效评估系统、多能互补调度系统及全厂热平衡优化等技术方案。这些措施覆盖设备日常管理、运行优化及节能改造等多个环节，并通过碳热足迹分析与多目标协同优化算法，为提升机组效率、降低碳排放、实现节能减排与运行效益最大化提供系统性的理论依据与实践路径。

关键词：电厂设备管理；技术管理；热能动力

The Synergistic Development of Equipment Management and Technical Management in Power Plants from the Perspective of Thermal Energy Power

Yang Shanglin

Foshan, Guangdong 528000

Abstract : This article explores the coordinated development of power plant equipment and technical management from the perspective of thermal power, with a focus on analyzing the optimized operation and technological transformation of core thermal equipment such as boilers, steam turbines, and gas turbines. The article covers various aspects such as boiler combustion adjustment, turbine sliding pressure operation, and efficiency improvement of gas turbine combined cycle. It proposes technical solutions based on big data and intelligent algorithms for equipment energy efficiency evaluation system, multi energy complementary scheduling system, and plant wide thermal balance optimization. These measures cover multiple aspects such as daily equipment management, operation optimization, and energy-saving transformation. Through carbon thermal footprint analysis and multi-objective collaborative optimization algorithms, they provide a systematic theoretical basis and practical path for improving unit efficiency, reducing carbon emissions, achieving energy conservation, emission reduction, and maximizing operational benefits.

Keywords : power plant equipment management; technical management; thermal power

引言

《“十四五”节能减排综合工作方案》(2021年)提出推动工业领域节能减排，电厂余热利用及相关技术优化对实现此目标意义重大。锅炉、汽轮机及燃气轮机等热力系统的余热梯级利用，可有效提升机组整体热效率，降低单位发电煤耗与碳排放。通过优化燃烧控制、调整主汽参数、实施滑压运行及燃机温控等手段，建立设备热效率与全厂生产流程的紧密关联，是实现节能运行的关键。热电联产模式下热力设备协同调度、多能互补系统集成及基于智能算法的能效优化等技术开发与应用，推动着电厂设备管理与技术管理的深度融合，符合国家政策导向，有助于系统性提升能源利用效率、降低碳足迹，为实现电厂绿色、低碳与可持续发展提供有力支撑。

一、热能动力系统生产的协同基础

(一) 热工参数性能的影响机制

电厂热力设备运行参数的优化对机组效率提升与碳排放控制意义重大。锅炉、汽轮机、燃气轮机等热力设备在运行过程中涉及复杂的热功转换，其参数设置直接影响机组整体热效率与排放水平。通过

精细调整锅炉燃烧参数、汽轮机进汽温度与压力、燃机温比等关键运行变量，可显著改善热力循环效率，降低供电煤耗。同时，各设备间存在强烈的热力学耦合关系。例如，锅炉主蒸汽参数的提升需与汽轮机通流部分的设计相匹配，而燃机排气热量回收则可用于联合循环或供热，实现能量梯级利用。这种参数间的量化协同关系，为机组整体运行优化、实现节能减排提供了重要依据^[1]。

(二) 设备热效率与生产流程关联性

在热力发电系统中，主要设备（锅炉、汽机、燃机）的热效率与电厂整体运行流程紧密关联。机组热平衡与辅机系统能耗之间存在显著的耦合关系。通过优化锅炉燃烧效率、提高汽轮机内效率、合理利用燃机排气余热，可提升整个动力循环的热效率，从而降低单位发电的燃料消耗与碳排放。例如，采用锅炉低氮燃烧调整、汽轮机滑压运行优化、燃机进气冷却等措施，能够改善机组变工况性能，减少能量损失。同时，辅机系统的运行方式（如风机、水泵的变频调节）也会反向影响主机设备的运行效率与能耗水平。建立热力设备与电厂运行流程的能耗关联模型^[2]，能够系统分析设备效率提升对全厂能耗与碳排放的影响机制，为实现机组协同优化与经济环保运行提供关键支撑。

二、热电联产系统协同运行优化

(一) 多热源互补与梯级利用优化

在热能动力视角下，热电联产系统的多热源互补与梯级利用是实现设备管理与技术管理协同发展的关键环节。研究锅炉、汽轮机与燃气轮机等不同热源之间的热力学匹配与负荷分配特性，能够深入理解全厂热能综合利用率提升的机理。不同的热源组合与运行方式，如锅炉主蒸汽参数匹配、汽轮机抽汽供热与燃机排气余热回收的协同，会显著改变系统整体能效与供热经济性。基于此，提出基于全厂热平衡与烟分析的梯级利用优化方法具有重要意义。通过优化热资源配置与运行策略，调整不同品质热能的分配比例，可有效改善热电联产系统的热力学性能，使热能在发电与供热环节得到高效、合理的利用，从而提升电厂综合能源效率，为电厂在热能动力过程中的经济环保运行提供系统性的优化基础^[3]。

(二) 智能调控与系统响应协同

在热电联产系统运行优化中，智能调控技术与系统快速响应能力的协同至关重要。通过构建涵盖锅炉燃烧、汽轮机调节与热网负荷预测的智能化模型，能够精准剖析各设备在不同运行工况与外部需求下的动态响应特性^[4]。基于此模型，进一步开发适应电网调峰与热负荷波动的协同调控技术。因电力与热力需求变化频繁，会显著影响机组运行工况与经济性。该调控技术可依据实时负荷与市场信号，动态调整各主辅设备的运行状态与出力分配，使整个热电联产系统的热力响应与电力输出处于协同最优状态，确保电厂在不同边界条件下均能保持高效率、低排放运行，实现系统运行的经济性与可靠性协同优化，满足新型电力系统对电厂灵活、清洁运行的特殊需求。

三、热电联产模式下系统运行与负荷协同优化

(一) 多热源梯级利用与系统集成

1. 锅炉 - 汽轮机 - 燃机多源余热协同回收方案
在热电联产模式下，为实现热能的最大化利用，锅炉 - 汽轮

机 - 燃气轮机多源余热协同回收方案至关重要。该方案旨在构建集成多种热源余热的综合回收系统。通过系统设计，将锅炉排烟余热、汽轮机抽汽与乏汽余热、以及燃气轮机排气余热进行统一收集与梯级利用。根据不同温度层级的热能品质，合理规划其利用途径，例如高温余热用于驱动吸收式制冷或发电，中低温余热用于供热、除氧器加热或燃料预热等，从而显著提升全厂综合热效率。同时，需对各余热回收子系统进行热力与工况匹配优化，确保主辅设备运行稳定与安全。此类协同回收方案不仅大幅提升了能源利用效率，还降低了燃料消耗与碳排放，有力推动热电联产系统在设备与运行层面的协同优化与集成管理^[5]。

2. 基于负荷预测的智能供热调控系统开发

在热电联产模式下，开发基于负荷预测的智能供热调控系统是实现机组灵活经济运行与供需协同的关键环节。该系统通过引入大数据与机器学习算法，实时采集并分析气象、热网、用户等多维数据，实现对未来短期与中长期热、电负荷的精准预测^[6]。基于预测结果，系统可动态优化锅炉、汽轮机、热泵等主要产热设备的运行策略与出力分配，提前调整供热参数。当热、电负荷发生波动或存在峰谷差异时，系统能快速响应，智能协调发电与供热模式，在保障供热品质的同时，优先满足电网调峰需求，提高机组运行经济性。该系统的应用不仅提升了热电联产系统对复杂工况的适应性与调控精度，还通过源 - 网协同优化减少了能源浪费，为实现设备高效运行与节能减排目标提供了重要的技术支撑。

(二) 热力管网与运输路线协同规划

1. 基于热惯性的热网储能调峰技术

在热电联产模式下，充分利用热力管网的热惯性进行储能调峰，是提升系统灵活性与经济性的重要技术手段。通过优化热网设计与运行策略，将供热管网本身作为分布式热储能单元。在电力负荷低谷或供热需求较低时段，可利用锅炉或电热泵等设备向管网中存储多余热能；而在电力负荷高峰或供热需求骤增时，则优先释放管网中储存的热能，从而减少机组为满足瞬时高峰负荷而进行的快速启停或偏离高效区的运行，提高设备运行稳定性与寿命。为此，需采用高性能保温材料与优化管道结构，以降低管网储热过程中的热损失^[7]。同时，结合智能调控系统，对管网的热惯性进行精准建模与实时调度，实现热源侧、管网侧与用户侧的高效协同，有效平抑负荷波动，助力热电联产系统实现安全、经济、低碳运行。

2. 多热源协同调度系统构建

在热电联产模式下，多热源协同调度系统构建至关重要。系统需综合考虑各热源的特性，如发电功率、供热能力、能源类型等^[8]。通过实时监测热源的运行状态、热力管网的温度和压力，以及用户端的热需求变化，运用智能算法进行优化调度。确保不同热源能依据实际需求，合理分配供热任务，提高能源利用效

率。与此同时，与热力管网和运输路线协同规划相呼应，系统要能够依据运输路线的动态变化，灵活调整热源输出，避免因运输环节的变动影响供热稳定性。该系统需具备高度的自动化与智能化，能快速响应各种复杂情况，实现生产运输的高效协同，助力电厂在热能动力视角下达成设备与技术管理的协同发展。

四、电厂设备热力系统智能运维与能效评估

(一) 关键设备状态智能监测与诊断系统

1. 基于光纤传感的热力参数分布式监测技术

为实现电厂锅炉、汽轮机、燃气轮机等关键热力设备运行状态的精细化监控，基于分布式光纤传感的温度与应变监测技术得到重要应用。该技术将传感光纤集成于设备关键部位或管道保温层内，形成覆盖广泛、响应灵敏的感知网络。凭借其分布式、长距离、抗电磁干扰等特性，可连续、实时地获取设备表面及内部不同位置的温度与应变场分布信息。该技术能够精准监测锅炉水冷壁、汽轮机转子、燃机燃烧室等部位在启停、变负荷等复杂工况下的热状态变化，及时发现局部过热、热应力集中等异常现象，为设备安全运行、寿命预测与预防性维护提供关键数据支撑，从而有效避免非计划停运，提升机组运行可靠性^[9]。

2. 设备热应力与寿命损耗在线预警算法

在电厂设备智能运维体系中，开发基于实时数据的热应力与寿命损耗在线预警算法至关重要。通过建立融合热力学、流体力学与结构力学的多物理场耦合模型，能够高精度模拟关键设备在动态负荷下的温度场、应力场及蠕变-疲劳损伤演化过程^[10]。在此基础上，集成实时监测数据，构建在线预警算法。该算法通过持续分析关键部位的温度与应变趋势，结合材料损伤累积模型，动态评估设备剩余寿命与损伤风险。当预测的热应力或寿命损耗接近安全阈值时，系统可提前发出分级预警，指导运行人员调整操作参数或安排检修，实现从“定期检修”到“状态检修”和“预测性维护”的转变，有效保障设备长周期安全经济运行，优化维护成本。

(二) 基于数字孪生的运行优化与调控创新

1. 全流程数字孪生模型构建与废热资源化模拟

在电厂设备与技术管理协同框架下，构建覆盖锅炉、汽机、燃机及辅机系统的全流程数字孪生模型具有重要意义。该模型通过集成设备机理模型、历史运行数据与实时传感器信息，在虚拟空间高保真映射物理电厂的动态运行状态。基于此模型，可深度模拟分析各类废热资源（如锅炉排烟、汽机乏汽、循环水余热）的回收潜力与利用路径。系统能够对不同余热回收改造方案（如低温省煤器、吸收式热泵、ORC发电等）进行全工况仿真与经济技术评估，优化回收系统的设计与运行策略，从而最大化能源利用效率，降低燃料消耗与冷端损失，为废热资源的深度回收与价

值化利用提供科学的决策支持。

2. 基于模型预测控制（MPC）的协同优化系统

开发基于模型预测控制（MPC）的机组协同优化系统，是提升电厂整体能效与灵活性的关键技术。该系统以全流程数字孪生模型为核预测引擎，综合考虑电网调度指令、燃料特性、环境条件、设备状态等多重约束。在每个控制周期内，系统滚动优化锅炉燃烧设定值、汽轮机调节阀开度、燃机负荷分配以及主要辅机运行方式，以实现供电煤耗最低、碳排放最少、或综合运行成本最优等多目标动态平衡。与传统的单回路控制相比，MPC系统能够前瞻性地处理多变量强耦合问题，显著提升机组在变负荷、快速启停等复杂工况下的控制品质与经济性，是实现设备运行与技术管理深度协同的先进手段。

(三) 全生命周期能效与碳足迹综合评价

1. 设备级与系统级碳热足迹耦合分析方法

为推动电厂实现深度节能减排，需建立涵盖设备制造、安装、运行、维护直至退役的全生命周期碳热足迹耦合分析方法。该方法不仅量化评价锅炉、汽轮机等主要设备在运行阶段的燃料消耗与直接碳排放，还追溯其在原材料开采、制造加工等上游环节的隐含碳与隐含热消耗。同时，将辅机系统能耗、环保设施运行碳成本、以及维护活动产生的碳排放纳入统一分析框架。通过构建耦合能量流与物质流的综合评价模型，能够精准识别电厂碳热足迹的关键环节与减排潜力点，为设备选型、技术改造、运行优化及供应链管理提供量化的低碳决策依据，推动电厂向全生命周期绿色化转型。

2. 多目标协同优化算法在系统运行中的应用

在热能动力视角下，多目标协同优化算法是协调电厂经济性、环保性与可靠性的核心工具。该算法以供电效率（热效率）、碳排放强度、运行成本、设备可靠性等多个关键绩效指标为目标函数，构建高维优化模型。通过集成遗传算法、粒子群算法等智能优化方法，在复杂的运行约束空间中，自动寻优生成最佳的设备组合运行方式、负荷分配方案及维护调度计划。例如，算法可在满足电网出力要求的前提下，协同优化锅炉与燃机的负荷配比，平衡煤耗与气耗；或在设备健康状况约束下，优化启停序列以降低厂用电并减少磨损。此算法的应用，实现了从单设备优化到全厂系统协同优化的跨越，显著提升了电厂的综合运行效益与可持续性。

五、总结

在热能动力视角下，电厂设备管理与技术管理的协同发展是提升能源利用效率、降低碳排放与增强核心竞争力的关键路径。本文系统探讨了通过优化锅炉、汽轮机、燃气轮机等主设备运行参数、集成智能监测与诊断技术、应用数字孪生与先进控制策

略、以及实施全生命周期能效评估等方法，如何实现设备效能提升与技术管理创新的深度融合。基于热力学原理与智能算法提出的协同优化路径，为电厂挖掘节能潜力、实现灵活低碳运行指明了方向。展望未来，随着人工智能、物联网与先进传感技术的进

一步渗透，智慧电厂与新型电力系统将深度融合，推动电厂设备管理与技术管理向更加智能化、自适应、绿色化的方向演进。这种深层次的协同不仅将保障能源供应安全与经济性，更将有力助推能源行业的结构转型与“双碳”战略目标的实现。

参考文献

- [1] 赵华琮. 工艺装置与热电厂蒸汽动力系统协同优化 [D]. 大连理工大学, 2022.
- [2] 杜雪. 嵌入性视角下大数据与基层环境治理的协同发展研究 [D]. 山东师范大学, 2022.
- [3] 胡梦雅. 协同治理视角下“体教融合”的发展路径研究 [D]. 杭州师范大学, 2022.
- [4] 李守军. 城市再生视角下的玉门新老市区协同发展研究 [D]. 兰州交通大学, 2021.
- [5] 方蕾. 内生发展动力视角下农村返贫防范研究 [D]. 武汉大学, 2021.
- [6] 李世旺. 新形势下电厂锅炉应用在热能动力的发展与创新 [J]. 电力设备管理, 2021(9): 101–103, 183.
- [7] 李效奎. 电厂热能动力锅炉燃料及燃烧研究 [J]. 中国高新科技, 2022(1): 100–101.
- [8] 朱晴阳. 电厂热能动力锅炉燃料及燃烧研究 [J]. 低碳世界, 2021, 11(5): 205–206.
- [9] 罗林. 浅谈电厂锅炉应用在热能动力方面的发展前景 [J]. 中国设备工程, 2022(6): 123–124.
- [10] 黄磊. 火力发电厂热能动力装置的检测与维护 [J]. 新疆有色金属, 2024, 47(1): 73–74.