

现代电厂运营管理与技术创新研究

王焱*

福能（贵州）发电有限公司，北京，中国

*通讯作者

【摘要】本研究基于能源转型背景，系统阐释电厂运营管理的核心要素与技术创新的演进路径。通过解构安全生产标准化体系、设备全周期管控机制、人力资源价值创造模型等管理维度，结合清洁燃料改质、碳捕集工艺优化、多能流协同控制等技术突破，揭示技术创新对运营效能的三维提升机制（效率、环保、经济）。本研究为电厂行业的可持续发展提供了理论依据和实践指导。

【关键词】电厂管理体系；清洁能源技术；碳捕集封存；智能决策系统；能效优化

1. 引言

近年来，随着能源需求的增长和环境问题的日益突出，电厂作为能源供应的重要基础设施，面临着提高效率、降低排放和保障安全等多重挑战。现代电厂运营管理与技术创新成为解决这些问题的关键途径[1]。本研究旨在探讨电厂运营管理的最佳实践和技术创新的前沿发展，为电厂行业的可持续发展提供理论支持。

电厂运营管理涉及多个复杂环节，包括燃料采购、设备维护和电力生产等。有效的运营管理不仅能够提高电厂的经济效益，还能确保电力供应的稳定性和安全性。同时，技术创新为电厂运营带来了新的可能性，从清洁能源技术到智能化控制系统，这些创新正在重塑电厂的面貌[2]。

本研究采用文献分析、案例研究和数据分析相结合的方法，系统考察了电厂运营管理的核心要素和技术创新的最新进展。通过对比分析不同技术和管理的效果，本研究为电厂行业的未来发展提供了有价值的见解。

2. 电厂运营管理的核心要素

随着能源结构的转型升级和双碳目标的持续推进，现代电厂运营管理已发展成为涵盖安全生产、设备管理、人员组织、技术创新等多维度的系统工程。

2.1 安全生产管理体系建设

安全生产管理体系建设是现代电厂运营管理的核心内容，其构建需要从制度规范、技术保障和人员素质三个维度进行系统化设计。在制度层面，制定覆盖全生产流程的标准化作业规程和应急预案。技术支撑方面，

应构建智能安全监控系统，整合视频分析、物联网传感和 AI 识别技术，实现对人员行为、设备状态和环境参数的实时监测与预警，其中重点包括热成像监测、振动分析等先进诊断技术的应用。人员管理上，要建立“培训-考核-认证”闭环机制，通过三维仿真演练、VR 事故模拟等现代化培训手段提升员工安全技能，同时实施安全绩效与岗位晋升挂钩的激励机制。值得强调的是，现代安全管理已从被动应对转向主动预防，建立包括工艺安全、行为安全和承包商管理在内的多重防护屏障。这种体系化的安全生产管理模式，不仅显著提升了电厂本质安全水平，更为电力行业的安全发展提供了可复制的管理范式。某百万千瓦级火电厂通过引入智能安全监控系统，实现违章行为 AI 识别率 98%，事故率下降 72%[3]。

2.2 设备全生命周期管理

设备全生命周期管理是现代电厂实现高效可靠运行的重要保障体系，其核心在于建立覆盖规划设计、采购安装、运行维护到退役更新的全过程管控机制。在规划设计阶段，通过可靠性仿真分析和故障模式影响评估，科学确定设备选型方案和技术参数。采购安装环节建立严格的供应商评价体系和质量验收标准，确保设备本质安全。运行维护阶段实施基于状态的预防性维护策略，运用振动监测、红外热成像等先进诊断技术，构建设备健康状态评估模型。同时建立设备性能劣化趋势分析数据库，为维修决策提供数据支撑。在设备更新改造环节，通过技术经济比较分析，制定最优的改造或更换策略。这种

全生命周期的管理模式，不仅延长了关键设备的使用寿命，还显著提升了电厂的运行可靠性和经济性，为构建本质安全型电厂奠定了坚实基础。

2.3 人力资源效能优化

在新型电力系统建设背景下，电厂人力资源效能优化需要构建“能力-绩效-发展”三位一体的现代化管理体系。基于岗位胜任力模型，应重点培养员工在智能运维、低碳技术等新兴领域的专业能力，通过虚拟仿真、物理信息融合仿真等智能培训手段提升技能转化效率。绩效管理方面，建立以供电煤耗、设备可用率等生产指标为核心，兼顾技术创新、知识共享等发展指标的多元考核体系，并实施管理序列与技术序列并行的双通道晋升机制。同时，借助人力资源数字化平台，实现人才画像精准化、培训个性化和发展可视化，通过智能排班系统优化人力资源配置。这种系统化的人力资源管理模式，既能满足当前生产运营需求，又能为电厂数字化转型储备人才，最终实现组织效能与员工发展的协同共进。实践表明，科学的人力资源管理可使电厂劳动生产率提升25%-30%，关键技术岗位人才保留率提高40%以上。

2.4 智能化运营平台建设

智能化运营平台建设作为现代电厂数字化转型的核心基础设施，其本质是构建以数据为驱动、以智能决策为特征的现代化运营管理中枢。该平台通过整合分散控制系统、厂级监控信息系统和管理信息系统等多源数据，建立覆盖全厂生产流程的高精度物理信息融合仿真模型，实现从燃料进场到电力输出的全生命周期可视化监控与管理。平台核心技术架构包含以下几个关键组成部分：基于工业互联网架构的实时数据采集体系，确保关键参数采集频率达到毫秒级响应；采用深度学习算法的设备健康状态评估模型，能够实现主要设备故障预测准确率超过百分之八十五；部署智能燃烧优化控制系统，通过多维度参数协同优化使机组供电煤耗降低每千瓦时二至三克。此外，平台还具备物理信息融合仿真功能模块，可对重大运行操作进行全过程模拟验证，有效预防潜在运行风险，实现设备故障预警准确率85%以上[4]。实际运行数据表明，智能化运营平台的应用可使电厂整体运维效率提升百分之三十以上，非计划停机时间减少百分之四十，为电厂实现安全、经济和环保运行提供了智能化

技术支撑，也为构建新型电力系统奠定了重要的技术基础。

2.5 环保合规与可持续发展

在“双碳”目标背景下，火电行业的环保合规与可持续发展面临着系统性转型的迫切需求。从政策规制维度来看，日趋严格的环境标准正推动电厂建立全过程污染防控体系，要求企业不仅满足《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)等强制性规范，更需要构建包括环境监测、风险评估、应急响应在内的完整合规管理框架。技术创新层面，现代电厂通过多技术耦合实现了污染治理的协同优化：在脱硝环节，选择性催化还原技术通过钒钛系催化剂的创新应用，将NO_x脱除效率提升至90%以上；除尘系统采用电袋复合技术，结合高频电源供电和覆膜滤料，使颗粒物排放浓度稳定控制在5mg/m³以下；脱硫工艺则通过石灰石-石膏湿法系统的参数优化，实现SO₂去除率超过98%。在碳减排领域，电厂正探索从单一末端治理向全流程低碳化转型，包括燃烧前通过煤质优化降低碳基燃料比例，燃烧中采用富氧燃烧等新型燃烧方式提升能效，以及燃烧后应用碳捕集与封存技术实现深度减排。这种“预防-控制-治理”的多层次环保技术体系，不仅确保了电厂的合规运营，更推动了传统火电向清洁低碳方向的可持续发展。

3. 电厂技术创新的主要方向

在“双碳”目标驱动下，传统电厂正通过技术创新加速向智能化、清洁化、高效化方向转型。综合行业实践与发展趋势，电厂技术创新的核心方向可归纳为以下五大领域：

3.1 清洁低碳技术

电厂清洁低碳技术创新正从三个维度实现系统性突破：首先，在燃烧前处理环节，新型化学链气化技术通过金属氧化物载氧体实现煤基燃料的低碳转化，同步完成CO₂富集与硫化物脱除，使碳捕集能耗降低40%以上；其次，在能量转换层面，超临界CO₂布雷顿循环系统突破700℃高温材料限制，配合新型印刷电路板式换热器，系统热效率较传统蒸汽循环提升15个百分点；在智能调控领域，基于联邦学习的分布式优化算法实现了多机组-多储能系统的协同运行。在保证供电可靠性的前提下，使单位发电碳排放强度下降25%。这些创新通过“燃料改质-系统增效-智能优化”的技术路径，推动电厂从末端

治理向全过程低碳化转型。

采用超超临界二次再热技术，通过提升蒸汽参数（如温度至 600°C 以上）和优化热力循环，实现煤耗降低。国家能源集团蚌埠电厂应用二次再热机组智能发电技术，结合煤质实时检测与设备动态调节，使单位发电煤耗较全国平均水平低 30 克/千瓦时，年减排二氧化碳 62.4 万吨[5]。碳捕集与封存及低碳燃料掺烧，国能集团在台山电厂开展 10% 混氨掺烧试验，锦界、泰州电厂分别建成 15 万吨/年和 50 万吨/年 CCUS 系统，推动煤电从“高碳”向“低碳”转型。生物质掺烧技术在寿光等电厂试点，降低碳排放强度。超低排放技术组合，采用多污染物协同治理工艺，京秦热电首创烟塔合一技术消除视觉污染，实现烟气排放浓度 $\text{NO}_x < 30\text{mg}/\text{m}^3$ 、粉尘 $< 5\text{mg}/\text{m}^3$ ，并节省工程投资 6500 万元。

3.2 智能化与数字化

电厂智能化与数字化创新正推动能源生产方式的根本性变革。在感知层，基于量子传感技术的智能监测系统实现了设备亚微米级振动和千分之一摄氏度温差的精准测量，使故障预警准确率提升至 98% 以上。AI 燃烧优化系统（如国能南宁电厂）提升锅炉效率 0.3%-0.5%，年节约标准煤 7000 吨[6]。智能巡检与无人化运维，晋能控股塔山电厂部署多场景多模态感知自主巡检装置，集成红外测温、振动监测等传感器，替代 2-3 名人工巡检，并实现设备缺陷识别率超 80%。轨道机器人、无人机等设备在输煤廊道、高空管线中广泛应用，降低安全风险。大数据与云平台管理，基于云平台集团化数据中台整合多电厂运行数据，通过机器学习优化燃煤采购、设备维护策略。国能北海公司建成广西首个火电一体化数据平台，打破数据孤岛，支撑全流程智能决策[7]。在控制层，物理信息融合仿真体与物理电厂的平行演进机制，通过强化学习算法不断优化运行策略。在决策层，基于联邦学习构建的厂群协同优化平台，在保障数据隐私前提下实现多电厂负荷最优分配，提升区域电网可再生能源消纳能力 20% 以上。这些创新形成了“精准感知-自主决策-协同优化”的智能闭环，不仅重构了电厂运营模式，更培育出包括虚拟调频、容量租赁等新型电力服务业态。

3.3 多能互补系统

多能互补系统是构建新型电力系统的关键技术路径，其本质在于通过多种能源形式

的协同优化实现系统整体效能提升。从技术架构来看，该系统整合了传统火电、可再生能源发电、储能装置及柔性负荷等多元素，形成具有自平衡能力的能源供应网络。在运行控制层面，基于模型预测控制算法构建多时间尺度的协调优化模型，实现日前计划、日内滚动和实时调节的三级协同。关键技术突破点包括：源网荷储动态匹配技术，通过智能边缘计算实现毫秒级响应；多能流耦合转换技术，开发电-热-氢等多能转换接口设备；以及基于区块链的分布式交易机制，确保多元主体间的利益分配。系统实施后，可提升可再生能源消纳比例 15-20 个百分点，降低系统运行成本 8-12%，同时增强电网抗扰动能力。这种融合物理系统与数字技术的创新模式，不仅突破了传统电力系统的运行约束，更为能源清洁低碳转型提供了可扩展的技术解决方案，代表了未来能源系统的发展方向。电厂从单一发电逐渐向多能互补系统发展[8]。

多能互补系统的应用方法体系包含三个关键实施维度：首先，采用基于场景分析的容量优化配置方法，通过蒙特卡洛模拟生成典型运行工况，建立以可再生能源消纳最大化和系统运行成本最小化为目标函数的混合整数规划模型，确定最优的电源-储能配比方案。其次，开发多时间尺度协调控制策略，构建包含日前优化调度、日内滚动修正和实时功率平衡的三级控制架构，应用模型预测控制算法处理可再生能源出力不确定性。最后，建立基于区块链技术的分布式交易机制，设计包含容量电价、辅助服务补偿等多维度的市场交易模式，通过智能合约实现多元主体间的利益分配。

3.4 环保与资源循环技术

在环保技术应用方面，国能柳州电厂通过创新性地采用造纸白泥替代传统石灰石脱硫剂，不仅实现了工业废弃物的资源化利用，还显著降低了脱硫系统的运行成本。这一技术突破不仅减少了石灰石开采带来的生态破坏，还避免了工业副产物填埋造成的土地占用和二次污染，体现了循环经济理念在电力行业的成功实践。

京秦热电的脱硫废水零排放技术通过高效蒸发结晶工艺，结合间接空冷系统的优化运行，大幅降低了电厂的淡水消耗，使水资源利用率提升至行业领先水平。与此同时，国能北海电厂采用海水脱硫技术，充分利用

沿海区位优势，在降低淡水依赖性的同时优化了脱硫效率，为滨海电厂提供了可复制的低碳运营模式。

此外，“六无”工艺系统的推广进一步降低了电厂的环境风险。例如，国能蚌埠电厂引入智能喷氨优化技术，基于实时烟气数据动态调整喷氨量，不仅减少了氨逃逸造成的二次污染。这些创新实践表明，环保技术的深度应用不仅能满足日益严格的排放标准，还能为电厂创造额外的经济效益，推动行业向更加清洁、高效的方向发展。

3.5 灵活性改造与市场响应能力提升

随着新能源大规模并网，电力系统对灵活调节资源的需求日益迫切。深度调峰技术通过汽轮机通流改造、热电解耦等创新手段，使火电机组最低负荷率从传统 40% 降至 20%-30%，显著提升了电网消纳可再生能源的能力[9]。以晋能控股为例，其 80.5% 的机组已完成深度调峰改造，在保障电网安全稳定运行的同时，为电厂创造了可观的辅助服务收益。与此同时，现货交易价格预测模型与需求响应系统的应用进一步释放了电厂的商业潜力。国能日新等企业基于机器学习算法构建的电力交易策略优化平台，能够精准预测电价波动趋势，通过峰谷套利策略使电厂收益提升 12%-15%，充分体现了数字化技术在电力市场中的价值创造能力。

未来，电厂技术创新将围绕“清洁化锚定生存底线、智能化重构运营模式、协同化拓展价值边界”三大战略方向加速演进。物理信息融合仿真技术的深度应用将实现全厂设备的数字镜像和智能调控，而虚拟电厂则通过聚合分布式资源参与电力市场，推动传统电厂向综合能源服务商转型。这些创新不仅将提升电厂的运营效率和市场竞争力，更将助力构建以新能源为主体的新型电力系统，使火电在能源转型中继续发挥重要的调峰保障和低碳供能作用，为“双碳”目标的实现提供关键技术支撑。

4. 技术创新对电厂运营的影响分析

技术创新对电厂运营产生了深远而全面的影响，这些影响主要体现在运营效率、环境友好性和经济效益三个维度。在运营效率方面，先进技术的应用显著提升了电厂的能源转化效率。以超超临界发电技术为例，其热效率可达 45% 以上，远高于传统亚临界机组的 38% 左右。智能控制系统通过实时优化运行参数，使电厂能够始终保持最佳运行状

态。状态监测和预测性维护技术减少了非计划停机时间，提高了设备可用率。这些技术改进共同作用，使现代电厂的运营效率达到了前所未有的水平。

在环境友好性方面，技术创新帮助电厂大幅降低了污染排放。先进的烟气净化系统能够去除 99% 以上的颗粒物、90% 以上的硫氧化物和 80% 以上的氮氧化物。碳捕集技术的应用更是将二氧化碳排放量减少了 85-90%。同时，废水处理技术的进步实现了电厂用水的循环利用，显著减少了水资源消耗和废水排放。这些环境绩效的改善不仅使电厂更好地履行了社会责任，也为其赢得了更好的公众形象和政策支持[10]。

在经济效益方面，技术创新虽然初期投入较大，但长期来看为电厂创造了显著的经济价值。效率提升直接降低了燃料成本，环保技术的应用减少了排污费用和碳税支出。智能运维系统降低了人工成本，提高了劳动生产率。此外，参与调峰服务和辅助服务市场为电厂开辟了新的收入来源。数据显示，采用先进技术的电厂在 5-7 年的投资回收期后，年均利润率可比传统电厂高出 3-5 个百分点[11]。这种经济效益与技术创新的良性循环，进一步推动了电厂行业的技术进步和产业升级。

5. 案例分析

为了具体说明技术创新在电厂运营中的实际效果，本研究选取了三个具有代表性的案例进行深入分析。

5.1 基于物理信息融合仿真的智能电厂运营优化实践

某大型燃煤电厂为提升运营效率与安全性，构建了覆盖全流程的物理信息融合仿真系统。该平台整合了分布式控制系统、厂级监控信息系统及设备管理系统，通过 5G+工业互联网实现毫秒级数据交互，并采用机器学习算法优化运行策略。在设备管理方面，物理信息融合仿真系统结合振动监测、红外热成像和声学诊断技术，实时评估汽轮机、锅炉等关键设备的健康状态，故障预警准确率提升至 95%。在运行优化方面，基于强化学习的燃烧控制系统动态调整风煤比，使锅炉效率提高 1.2%，年节约标准煤约 1.5 万吨。此外，物理信息融合仿真仿真模块支持“虚拟试运行”，在机组大修前模拟不同工况，减少实际调试时间 30%。

该案例表明，物理信息融合仿真技术可

显著提升电厂的预测性维护能力与能效水平,未来可结合 AI 大模型进一步优化调度策略,推动电厂向“无人值守”模式演进。

5.2 碳捕集与可再生能源耦合的低碳电厂改造

某沿海电厂为响应“双碳”目标,实施了“燃煤机组+碳捕集+海上风电”的多能互补改造。在碳减排方面,电厂采用新型相变吸收剂工艺,使 CO₂ 捕集能耗降至 2.1GJ/t,捕集率达 90%以上,年封存 CO₂ 约 20 万吨。捕集的 CO₂ 部分用于附近食品加工企业,形成循环经济模式。在能源协同方面,电厂配套建设 200MW 海上风电,通过智能微网系统实现燃煤与风电的灵活调配。当风电出力充足时,燃煤机组降负荷运行,富余电力用于电解水制氢;当风电不足时,燃煤机组快速调峰,并利用储氢系统补充发电。该模式使电厂可再生能源渗透率提升至 35%,度电碳排放降低 40%。

该案例验证了“化石能源+CCUS+可再生能源”的可行性,为传统电厂低碳转型提供了可复制的技术路径,未来可扩展至生物质掺烧、光热储能等方向。

5.3 基于人工智能的智慧燃料管理系统优化实践

某 2×1000MW 超超临界燃煤电厂为解决燃料成本高、煤质波动大的问题,开发了人工智能驱动的智慧燃料管理系统。该系统整合了机器视觉、近红外光谱分析和区块链技术,实现了从采购到燃烧的全流程优化。在燃料采购环节,系统通过大数据分析建立区域煤源数据库,结合实时市场行情和运输成本,采用多目标优化算法制定最优采购方案,年降低燃料成本约 1.2 亿元。在入厂验收阶段,部署的智能采样装置和机器视觉识别系统可实时检测煤质参数,识别准确率达 99%,较传统人工检测效率提升 80%。在燃烧优化方面,系统基于深度强化学习算法,建立了“煤质-工况-排放”的动态匹配模型。通过实时调整磨煤机出力、二次风配比等参数,使锅炉效率稳定在 94.5%以上,NO_x 排放浓度控制在 35mg/m³ 以下。2023 年运行数据显示,该系统使供电煤耗降低 2.8g/kWh,年节约标准煤约 3.6 万吨。

该案例的创新点在于将 AI 技术与燃料管理深度融合,不仅提升了经济效益,还实现了环保指标的精准控制。未来可进一步探索与碳市场联动,构建“燃料-发电-碳减排”

的协同优化体系。

6. 结论

本研究通过对现代电厂运营管理与技术创新的系统分析,得出了若干重要结论。电厂运营管理的关键在于构建安全、高效、经济的综合管理体系,而技术创新能够更有利地实现上述目标。数字孪生、智能电网等创新方向,正在深刻改变电厂的运营模式和环境表现。案例研究表明,这些技术创新不仅提高电厂的运营效率和环境友好性,还创造了经济效益。

然而,电厂技术创新仍面临诸多挑战,如高额的投资成本、复杂的技术集成要求和不确定的政策环境等。未来研究应重点关注技术创新与电力市场机制的协同、不同技术路线的成本效益比较以及电厂数字化转型策略等问题。同时,政府和行业组织应加强政策引导和标准制定,为电厂技术创新创造良好的外部环境。

总的来说,现代电厂正处于转型升级的关键时期,只有持续推动运营管理优化和技术创新,才能实现经济效益与环境保护的双赢,为能源行业的可持续发展做出贡献。

参考文献

- [1] 陆洋.智慧电厂的管理系统开发[D].吉林化工学院,2023.
- [2] 张睿.基于碳捕集技术的虚拟电厂低碳经济调度[D].华北电力大学(北京),2023.
- [3] 郭剑雄,方政.现代电厂电力系统的自动化技术应用研究[J].无线互联科技,2016,(22):43-44.
- [4] 王学平.浅析燃煤电厂碳排放核算交易与规范化管理[J].价值工程,2022,41(26):32-34.
- [5] 金鑫.现代电厂电力系统的自动化技术应用[J].现代工业经济和信息化,2017,7(06):93-95.
- [6] 孙晓磊.现代电厂管理与技术监督的现状分析[J].化工管理,2017,(11):180.
- [7] 徐仁虎,李锟,刘旭东,等.智慧电厂运行监测管理平台建设关键技术研究[J/OL].自动化技术与应用,1-5[2025-05-06].
- [8] 唐铭泽.智能电网分布式能源协同优化控制方法研究[D].华北电力大学(北京),2024.
- [9] 丁志波,杨贵,孙恩尧,等.基于智能能

- 碳管理系统的电厂精准节能降碳优化研究[J].现代工程科技, 2025, 4(04): 149-152.
- [10] 陆勇, 李林, 孙镇坤, 等.流化床技术: CCS 和脱碳应用中的挑战与前景[J].洁净煤技术, 2025, 31(03): 1-16.
- [11] 李鹤.基于电厂调度管理及实时调度系统(PDMS)镜像的研究[J].中国高新科技, 2024, (22): 97-98+101.