

基于智能控制的电厂锅炉经济性及可靠性提升策略

吕振刚

国能双鸭山发电有限公司 黑龙江双鸭山 155136

摘要: 在对能源需求量不断增加和环境保护要求日趋严格的情况下,发电企业锅炉运行在多变煤种、多变工况状态下,提高电厂锅炉的运行经济性及可靠性是当前电力企业迫切需要解决的重要问题。近年来,智能控制的出现为该问题的解决带来了新的思路。本文从智能控制的角度出发,对在电厂锅炉中智能控制技术的应用现状进行深入分析,探讨了基于智能控制提升电厂锅炉运行效率的策略,以期达到提高运行可靠性周期、提高锅炉运行能效,实现安全可靠、节能减排的目的,为我国电厂的可持续高效发展提供助力。

关键词: 智能控制; 电厂锅炉; 可靠性; 运行效率; 提升策略

电厂是能源转化的关键节点,其运行可靠性及运行效率对电厂运行安全及提高能源利用率和环境可持续发展具有重要意义。作为发电厂的核心装置,锅炉担负着将燃煤化学能转换成热能的重任。传统的火力发电厂锅炉依靠人工经验和传统控制手段,控制精度不高、能源消耗大,已不能适应现代清洁生产要求。智能控制技术综合了计算机、自动控制 and 人工智能的交叉学科,可以实现对复杂系统的高精度自适应控制。

一、建立智能控制系统

(一) 系统架构设计

智能控制系统架构由数据获取层、控制决策层及执行层等组成。在数据采集层中,各种高精度的传感器构成整个锅炉运行过程中所需的综合数据;数据处理和传输层利用大数据处理和高速通讯网络,对所收集到的数据进行净化、分析,并将其快速传送到调度决策层;基于智能算法和模型预测控制的新方法。执行层按照控制命令来驱动各执行器,从而精确地调整锅炉的操作参数。

例如,山东某百万千瓦火电锅炉利用先进工艺控制系统(APC),建立了智能控制体系结构,使其运行控制能力得到明显提高。采用200多套高精度传感器,实现温度、流量等多个关键参量的在线监控,实现对炉内温度、流量等关键参数的实时监控,对炉内温度和压力进行精确测量。在5 G+工业以太网的基础上,构建5 G+工业以太网的融合通讯网络,在保证数据质量的前提下,利用边缘计算节点对数据进行预处理,提高40%的数据传输效率,减少30%的存储压力。将深度神经网络和模型预测控制相结合,建立基于历史数据的燃烧优化模型,

实现对锅炉运行状态变化的预测。控制器采用智能化的执行器,实现对送煤量等参数的动态调整,使其响应速度不超过1.5秒。在投入运行后,锅炉主蒸汽温控差由 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 降到 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,再热蒸汽温降幅度小于 $\pm 3^{\circ}\text{C}$,自动发电控制的响应速度提高50%,负载调整精度提高30%。通过多层次的协同优化,使锅炉热效率提高2.8%,节煤量达到12000吨左右,为先进控制体系的实际应用提供有力支撑^[1]。

(二) 控制算法选择和优化

针对电厂锅炉的特点,选择适当的智能控制算法,对其进行优化设计。针对燃烧控制问题,采取基于模型预测控制的方法,通过对锅炉燃烧过程进行动力学建模,对未来一时期的发电出力进行预测,并以热效率最大化、污染物排放量最小化为目标,对其进行在线滚动优化。采用深度学习和预测方法,充分发挥深度学习在数据分析和特征抽取优势,深入挖掘锅炉工况信息,实现模型参数的在线更新,提升预测控制的准确性和适应性。

例如,江苏660 MW燃煤电厂采用深度神经网络和模型预测控制相结合的方法,构建了3000组工况的数据库,采用卷积神经网络(CNN)方法,对20多个参数(如温度场分布等)进行特征提取,实现燃料燃烧过程动力学模型参数的实时更新,以解决传统预测控制模型存在的时滞问题。在实际操作过程中,MPC算法以提高热效率和降低NO_x排放量为目标,采用滚动优化方法,实现对负荷波动对燃烧工况的影响提前20分钟进行预报。该装置投入运行后,锅炉的热效率从91.2%提高到94.5%,提高3.3个百分点;氮氧化物排放量从320mg/

Nm³下降到260mg/Nm³，降低了18.75%。同时，将主蒸汽温度控制精度由±4℃降低到±2℃，再热蒸汽降低3℃，使整个系统的运行更加稳定。另外，在50%~100%负荷范围内，该算法可以提高40%锅炉的反应时间，从而减少由于燃烧调整滞后而造成的能源浪费（如表1）。

表1 应用前后指标对比

指标	应用前	应用后	提升幅度
锅炉热效率	91.2%	94.5%	3.3%
NO _x 排放浓度 (mg/Nm ³)	320	260	18.75%
主蒸汽温度控制精度	±4℃	±2℃	50%

二、燃烧过程优化

(一) 智能配风控制

通过对锅炉负荷和燃烧状况的监控，对一二次风的配比进行动态调节。采用人工神经网络方法，构建风煤比与锅炉操作参数的非线性关联模型，结合实际负荷和燃油信息，准确地计算出最优风煤比，实现对风机和给煤机的操作参数的自动调整。

例如，山西300 MW CFB电厂采用智能配风控制系统，使其燃烧效率得到明显提高。该系统配置了20多套风速和煤质在线测试设备，实现了对锅炉负荷、灰分等12个重要指标的实时监测。构建长短时记忆网络(LSTM)模型，构建风煤比例与操作参数之间的动态映射关系，实现对最优风煤比调控策略的实时更新。该装置投入运行后，在30%~100%的负荷范围内，额外空气系数的控制精度提高了60%，并基本保持在1.15~1.25的范围。结果表明，该方法可以使排烟温度由原来的155℃降低到142℃，同时使排烟热量降低2.3%；锅炉的热效率提高2.6个百分点，从89.5%提高到92.1%^[2]。同时，NO_x的排放量由280 mg/m³下降到220 mg/m³，减少21.4%，实现了大气污染物的减排。同时，减少了人工调试的次数，使日平均作业次数由20余次降为5余次，大大减轻了操作人员的劳动强度（如表2）。

表2 应用前后指标对比

指标	应用前	应用后	提升幅度
排烟温度 (℃)	155	142	↓ 8.4%
锅炉热效率	89.5%	92.1%	↑ 2.6%
NO _x 排放浓度 (mg/Nm ³)	280	220	↓ 21.4%
日均人工调整次数	20次	5次以内	↓ 75%

(二) 燃烧器优化控制

利用先进的燃烧管理系统(BMS)和智能控制算法来实现燃烧过程的精细化控制。BMS主要负责燃烧器的安全启停、监控和保护，并通过智能控制算法实现对燃

烧器喷射角度和燃烧器的复合操作。在小负荷工况下，利用智能控制算法，对燃烧器的运行方式进行优化，实现部分燃烧器的高效率燃烧，从而避免单一燃烧器完全投入所带来的燃烧不充分和能源消耗的问题。

例如，广东600 MW燃煤发电锅炉将燃烧器管理系统(BMS)和微粒群(PSO)算法相结合，对其进行精细调控。某发电厂采用8个旋流燃烧器，在小负荷下(40%)工况下，原有的燃烧不稳定且热效率较低。通过对炉膛内温度场等10个参数的实时监测，对燃烧器的组合形式和喷油参数进行动态优化。在系统运行过程中，该算法在锅炉负荷为40%的情况下，自动调节4个燃烧器同时运行，精确地控制每个燃烧器的喷油量和旋转强度。改进后的锅炉在小负荷运行时，热效率由原来的86.2%提高到91.5%，增加了5.3个百分点；结果表明，炉膛出口烟气温度偏差从±80℃降到±30℃，温度场均匀度明显提高；氮氧化物排放量由300毫克/米³下降到240毫克/米³，降低20%^[3]。同时，该系统可以使燃烧器的频繁启停次数降低70%，设备维修费用下降25%，使锅炉在低负荷下的经济和稳定运行得到了有效提高（如表3）。

表3 应用前后指标对比

指标	应用前 (40% 负荷)	应用后 (40% 负荷)	提升 幅度	指标
锅炉热效率	86.2%	91.5%	5.3%	锅炉热效率
炉膛出口 烟温偏差	±80℃	±30℃	62.5%	炉膛出口 烟温偏差
NO _x 排放浓度 (mg/Nm ³)	300	240	20%	NO _x 排放浓度 (mg/Nm ³)
燃烧器启停次数	10次/月	3次/月	70%	燃烧器启停次数

三、加强对设备检测和故障分析

(一) 设备状态监测

采用物联网技术建立电厂锅炉设备状态监控网络，将风机、燃烧器等重要设备接入监控系统，并借助设备上安装的各种传感器对设备进行实时测量。通过大数据分析，获取振动幅值等特征参量，实现对装备运行状况的诊断。

例如，内蒙古某大型发电厂为利用物联网技术建立设备运行状态监控系统，对其进行精确的故障预警。本项目拟在每个引风机轴承座等关键位置布设4套振动和2套温度传感器，实现对风机振动加速度等数据的实时采集，并通过5 G网络进行数据处理。以大数据为基础，

结合机器学习的方法，构建完整的引风机健康评价模型。在2023年8月，监控设备检测到一台锅炉的振动谱中，1次频幅度由原来的2.3 mm/s逐渐增加到5.8 mm/s，而其表面的温度则比平时高8℃。并将其与历史数据和故障特点相结合，实现对叶片失衡的72小时预警。维修人员对此进行了及时的检测，结果表明，由于叶片的局部磨损，造成叶片的质量分配不均匀，并对其进行了更换，从而避免由于叶片折断而造成的设备停摆。这预警使电厂的非计划停工36个小时，为企业挽回280万元的经济损失。该系统投入使用后，可以使引风机的故障报警率达到95%以上，使锅炉的故障率下降40%，维护费用下降35%，使锅炉的可靠性和运行经济性得到明显提高。

（二）故障诊断技术

深度学习和SVM的故障诊断等人工智能的故障诊断技术，通过历史故障数据和正常运行数据故障诊断模型，建立设备故障和运行参数之间的联系。该模型可以在设备运行过程中，迅速确定故障的种类和发生的地点，并提出相应的解决方案。

例如，安徽350 MW热电厂用卷积神经网络（CNN）进行故障诊断，通过采集5年来典型工况和32种典型故障情况下的运行数据，建立包含12万个样本的CNN模型，并对其进行优化。通过对锅炉给水泵等重要设备的8种工况进行实时监测，并利用特征抽取的方法对其进行建模。在2023年11月，在某台给水泵的振动谱中发现异常的高频成分，并于2个小时内轴承温度由65℃升高到78℃。该网络模型能够在1分钟之内对轴承的润滑状况进行快速的诊断，同时给出故障可信度97.3%的判断结果。通过对故障的分析，维修人员对润滑油进行加注，清洗润滑道，从而防止因轴承烧坏而造成的停车事故。自投入运行以来，锅炉设备的故障诊断正确率从原来的手工诊断（78%）提高到96.2%，平均单个故障的诊断时间从30 min降低到12 min，累计降低52 h/年，每年为电厂节约400多万元的经济损失，极大地提高了设备的可靠性和运行效率。

四、能源管理系统整合

为使电厂锅炉和其他有关设备的能源信息得到充分地收集和分析，建立完备的能源管理体系。该系统对锅炉一般操作参数进行提取，同时也对燃料消耗、蒸汽量等进行分析。采用大数据分析技术，深入挖掘锅炉能耗分布规律及其与锅炉操作参数的相关性。通过对能耗数据的分析，可以找出能耗存在的弱点和潜力，从而有针

对性地采取节能措施。

例如，河北某家大型综合发电厂采用能源管理系统对其能耗进行精细收集和深入分析。将整厂300多台智能计量设备进行整合，可以对锅炉油耗、用电速率等20重要能耗数据进行实时采集，并采用边缘计算对数据进行预处理和存储。基于大数据分析平台，各发电企业对过去一年内的能耗数据进行深层次挖掘，发现#3锅炉在晚上23:00到第二天5点的低谷负荷阶段，其平均蒸汽输出量为420 t/h，而实际需要的蒸汽只有280 t/h，存在明显的蒸汽生产能力过剩问题。另外，在此期间，锅炉的热效率比日间正常运行时降低了3.2%左右，每天增加18吨标煤。对#3锅炉在低谷期进行了降载，并对供暖网络的调度进行调整，使一部分用水被分流到其他锅炉。该项目的实施，使#3锅炉在低谷期的汽耗量下降到比较合理的范围内，使锅炉的热效率恢复到了原来的水平，平均每天可以节省15吨标准煤，每年节省燃油费用800多万元。

五、关于电厂锅炉智能化控制策略的探索

当前投用中的电厂锅炉智能控制应用上仅在某一领域上或采用多套控制系统实现上述功能在系统间存在相互影响的情况。在智能控制领域上多项功用综合应用，实现锅炉整体协调实时智能控制，将更有效的提升电厂锅炉运行可靠性及经济性，同时减少人工参与，降低运行人员监盘强度减少误操作事件发生。整体协调实时智能控制主要应从以下几个方面入手。

（一）安全监测与预警

电厂锅炉安全运行是一切经济性的基础，隐患早发现、找处理，可有效的减少非计划停运事件的发生。当前电厂燃煤锅炉承担调峰任务，负荷多变，锅炉本体膨胀变化频次增加，变负荷过程中因燃烧工况的变化锅炉本体热应力及温度场不均匀，给锅炉带来四管漏泄的风险。

整体协调实时控制系统中应以基本风粉比为安全底线设置锅炉本体安全监控系统：

1. 锅炉壁温智能调节：通过对锅炉烟气各区域温度实时监测，自动调整配风，确保锅炉烟气流通过区域温度场均衡，防止局部过热造成四管受损。

2. 结渣状态智能监视：通过热成像技术与大数据分析技术，监测炉内易结渣部位，通过历史积累判断运行中锅炉结渣状态及发展趋势，提前安排检修计划，避免运行中四管漏泄故障发生。

3.膨胀指示智能监测：利用传感器与物联网技术，构建锅炉膨胀变化实时模型，将理论计算各类膨胀极限值做为报警点，当各点数据进入报警区域时自动报警，方便运行人员通过变负荷或通过配风、汽温调节过控制相应膨胀值，从而保障锅炉可靠运行。

另外设置辅助系统故障报警诊断系统：通过装设温度、压力、振动、电流测点监控各类辅机运转状况，形成历史数据库并进行实时诊断，当运行工况历史趋势发生变化时提前预警，更有利于设备故障的提前发现与处理。

（二）经济运行智能控制系统

当前形势下锅炉运行工况多变，特别是大型电厂锅炉，为适应电网负荷及新能源发展需求，承担电网调峰任务，在多变工况下如何能在不同负荷下最经济运行，是发电企业降低经营成本的重要手段，靠人工经验调节不但需要操作员经验丰富，而且响应速度慢，综合效益计算复杂不易实现。新的智能控制系统应该将锅炉效率计算纳入智能调控模型基本框架，通过实时效率计算来对燃烧参数进行智能监测，实时采集燃料供给量、排烟温度、风粉比、飞灰含碳量（或一氧化碳尝试）、含氧量、氮氧化物含量等数据，进行数据计算、分析优化燃烧过程调节，以保证不同负荷下锅炉运行经济性最优。

在经济控制模块中应装设煤质分析控制模块，来对锅炉燃烧控制策略进行修正，能够实现不同煤种风粉比控制策略变，以适应不同煤质下锅炉燃烧经济控制要求。同时将影响锅炉效率的辅助系统、大容量辅机电耗等纳

入大系统经济计算中，实现多变量、多目标、强耦合、大延迟系统进行有效控制，从而真正实现提高锅炉经济性的目的。

（三）集成式能源智能控制系统创建

将电网供电与发电统筹考虑，以负荷预测为基本框架，电网区域内发电企业实现联动，分阶梯实施AGC指令，启停调峰等手段，周期性调节各家发电企业调控要求，实现部分锅炉在经济负荷下运行，同时保证各家发电企业发电权完成，从而面实现能源节约的目的。

总之，依托物联网技术、大数据分析、人工智能调节等，建立综合智能控制系统，有广阔的发展空间，是提升能源利用效率保障锅炉运行安全的重要手段和必然的发展趋势。集成式能源管理系统，可以有效地提高能源的使用效率和经济的调度效率，降低成本、减轻对环境的影响，从而为燃煤火力发电厂的可持续发展提供强有力的支持。

参考文献

- [1] 燕晓龙, 贺旭杰, 付昊, 郑小乐, 郝月东. 电厂锅炉燃烧智能算法的应用实践[J]. 电工技术, 2025, (06): 78-80.
- [2] 李冰涛. 智能化发电厂锅炉运行监控系统的分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(03): 316-317.
- [3] 柳春晖, 刘刚. 锅炉燃烧智能监控平台在双辽电厂的应用[J]. 信息与电脑(理论版), 2022, 34(13): 31-33.