

人工智能赋能的锅炉燃烧智能优化控制策略研究

李强

北票发电有限责任公司

DOI:10.12238/pe.v3i4.15088

[摘 要] 本文研究了人工智能技术在锅炉燃烧智能优化控制中的应用。首先分析了锅炉燃烧系统的运行原理及传统控制策略的不足,随后探讨了深度神经网络、强化学习等AI算法在燃烧控制中的适用性,设计了基于三层架构的智能优化控制系统,并提出燃烧状态预测、动态优化控制等关键策略。研究结果表明,该策略能有效提升锅炉热效率、降低污染物排放,同时具备多目标优化和在线学习能力。最后分析了数据质量、实时性等技术挑战,并展望了数字孪生、边缘计算等技术融合的发展前景,为锅炉智能化改造提供了理论支持与实践路径。

[关键词] 人工智能; 锅炉燃烧; 智能优化控制

中图分类号: TK223 **文献标识码:** A

Research on intelligent optimization control strategy of boiler combustion enabled by artificial intelligence

Qiang Li

Beipiao Power Generation Co., LTD.

[Abstract] This paper explores the application of artificial intelligence (AI) technology in the intelligent optimization control of boiler combustion. It begins by analyzing the operating principles of the boiler combustion system and the limitations of traditional control strategies. The paper then examines the applicability of AI algorithms, such as deep neural networks and reinforcement learning, in combustion control. A three-layer architecture-based intelligent optimization control system is designed, and key strategies, including combustion state prediction and dynamic optimization control, are proposed. The research findings indicate that this strategy can significantly enhance boiler thermal efficiency, reduce pollutant emissions, and support multi-objective optimization and online learning capabilities. Finally, the paper addresses technical challenges related to data quality and real-time performance, and looks ahead to the integration of technologies like digital twins and edge computing, providing theoretical support and practical pathways for the intelligent transformation of boilers.

[Key words] Artificial Intelligence; Boiler Combustion; Intelligent Optimization Control

锅炉在很多工业生产以及生活供暖等场景中都起着关键作用,它通过燃烧燃料来产生热能,满足不同的需求。而在锅炉运行过程中,如何让燃烧达到最佳状态,一直是备受关注的要点。随着科技的进步,人工智能技术开始融入到锅炉燃烧控制领域,为解决传统控制方式存在的问题带来了新的思路和方法。

1 锅炉燃烧系统与控制需求分析

1.1 锅炉燃烧系统的基本原理

锅炉燃烧系统的工作过程其实并不复杂。简单来说,就是把燃料送到锅炉里,然后让燃料和空气充分混合,接着燃料发生燃烧反应,这个过程中化学能就转化成了热能^[2]。在这个系统里,有炉膛、燃料输送装置、空气供应装置等不同的部分。炉膛是

燃料燃烧的地方,燃料输送装置负责把燃料准确地送到炉膛内,空气供应装置则要保证有足够的空气和燃料混合,让燃烧能够充分进行。

1.2 燃烧控制的核心目标

锅炉燃烧控制有几个重要的目标。第一个目标就是要提高热效率,也就是要让燃料里的化学能尽可能多地转化为我们可以利用的热能,减少能源的浪费。比如说,如果热效率不高,就会有很多燃料的能量没有被充分利用,白白消耗掉了。第二个目标是控制污染物的排放,像燃烧过程中会产生氮氧化物、一氧化碳等污染物,这些物质对环境是有害的,所以要把它们的排放量控制在较低的水平。还有一个目标就是要让锅炉能够适应不同的

负荷需求,当生产或者生活对热能的需求发生变化时,锅炉要能够快速做出调整,稳定地运行。

1.3 传统控制策略的瓶颈

传统的锅炉燃烧控制策略存在一些难以解决的问题。传统的方法大多是按照固定的规则或者经验来控制燃料和空气的供应量。但是锅炉燃烧过程是很复杂的,它会受到很多因素的影响,像燃料的种类、质量,空气的温度、湿度,还有锅炉本身的运行状态等。这些因素不断变化,传统的控制策略就很难准确地适应这些变化,往往会出现控制不准确的情况。比如有时候燃料供应多了,燃烧不充分,就会产生更多的污染物;有时候空气供应不足,也会影响燃烧效果,降低热效率。

2 人工智能赋能的优化控制理论基础

2.1 人工智能技术在燃烧控制中的适用性

人工智能技术有很多优点,它能够处理大量的数据,并且从这些数据中找出规律。在锅炉燃烧控制中,燃烧过程会产生很多数据,像温度、压力、燃料流量、空气流量等参数的数据。人工智能技术可以对这些数据进行分析和学习,从而更好地理解燃烧过程的规律。而且人工智能技术还可以根据不同的情况进行调整,不像传统控制策略那样比较死板,所以它很适合用来解决锅炉燃烧控制中的复杂问题^[3]。

2.2 核心算法模型

2.2.1 深度神经网络(DNN)。深度神经网络就像是一个很聪明的大脑,它有很多层神经元。这些神经元可以接收很多输入信息,然后通过一系列的计算和处理,输出结果。在锅炉燃烧控制中,我们可以把炉膛温度、压力、燃料流量、空气流量等参数作为输入信息,让深度神经网络去学习这些参数和燃烧状态之间的关系^[4]。经过大量的数据训练后,深度神经网络就能够准确地预测燃烧状态,比如预测炉膛温度会怎么变化,污染物排放量会是多少等。

2.2.2 强化学习(RL)。强化学习就像是一个不断尝试和学习的过程。在锅炉燃烧控制里,有一个智能体,它可以做出控制动作,比如调整燃料流量、风门开度等。然后这个智能体会观察环境的变化,也就是燃烧状态的变化,根据变化的情况得到一个奖励或者惩罚的信号。如果这个动作让燃烧效果变好了,就会得到一个奖励;如果让燃烧效果变差了,就会得到一个惩罚。智能体就会根据这个奖励或者惩罚的信号来调整自己以后的动作,不断地尝试,最终找到一种最好的控制策略,让锅炉的热效率和环保性能都达到最好的状态^[1]。

2.2.3 混合模型。把物理模型和数据驱动模型结合起来使用的混合模型也是一种很有效的方法。物理模型是基于燃烧过程的物理原理建立起来的,它能够准确地描述燃烧过程的基本规律。数据驱动模型则是通过对大量实际运行数据的学习,能够发现一些物理模型可能没有考虑到的复杂现象。把两者结合起来,就可以让模型既具有物理模型的准确性,又具有数据驱动模型的灵活性,能够更好地预测和控制锅炉燃烧过程。

2.2.4 模型训练与优化方法。模型训练前需对采集数据预处理,

解决噪声、范围不一致等问题,通过数据清洗提升准确性,归一化统一数据范围,特征选择减少复杂度、提高训练效率。损失函数设计上,考虑锅炉燃烧控制多目标,如提升热效率与降低污染物排放,设定不同权重组合成综合损失函数,使模型朝多目标优化方向训练。同时采用在线学习机制,让模型实时接收新数据并调整优化,以适应锅炉运行状态变化,保证控制策略有效。

3 智能优化控制策略设计

3.1 控制系统架构

智能优化控制系统的架构分为数据采集层、决策层与执行层三层结构。数据采集层由温度、压力、流量等多类型传感器组成,实时监测炉膛温度、压力及燃料/空气流量等关键参数,并将数据传输至决策层^[5]。

决策层作为核心,基于深度神经网络算法预测燃烧状态(如炉膛温度趋势与污染物排放变化),结合强化学习动态生成最优控制策略(如燃料流量调节量与风门开度调整值)。

执行层通过燃料阀、风门执行器等响应决策指令,精准调控锅炉燃烧过程,实现热效率提升与污染物减排目标,支撑人工智能赋能的锅炉智能优化控制策略落地。

3.2 关键控制策略

3.2.1 燃烧状态预测模型。基于深度神经网络的燃烧状态预测模型是非常重要的。这个模型通过对大量历史运行数据的学习,能够建立起燃烧状态和多个输入参数之间的复杂关系。在实际运行的时候,模型会实时接收当前的各种参数数据,然后根据之前学习到的规律,预测出未来的燃烧状态^[6]。比如说,预测炉膛温度是会升高还是会降低,污染物排放量是会增加还是减少等。这些预测结果对于制定控制策略非常重要,可以让控制系统提前做出调整,保证锅炉的稳定运行。

3.2.2 动态优化控制策略。动态优化控制策略是基于强化学习算法的。智能体根据当前的燃烧状态和预测结果,选择合适的控制动作。比如当预测到炉膛温度可能会过低时,智能体可能会选择增加燃料流量或者调整风门开度来提高温度。然后智能体会观察环境的变化,也就是燃烧状态的实际变化情况,如果这个动作让燃烧效果变好了,就会得到一个奖励信号;如果让燃烧效果变差了,就会得到一个惩罚信号。智能体就会根据这个奖励或者惩罚的信号来调整自己以后的动作,不断地学习和优化,最终找到一种最优的控制策略,让锅炉的热效率和环保性能都达到最佳状态。

3.2.3 负荷动态响应机制。锅炉在运行过程中,负荷会经常发生变化。比如在生产高峰期,对热能的需求会增加;在生产低谷期,对热能的需求会减少。负荷动态响应机制就是要让锅炉能够快速适应这种负荷的变化。当负荷增加时,控制系统会根据预测的燃烧状态和控制目标,及时增加燃料流量和调整风门开度,让锅炉能够产生更多的热能;当负荷减少时,也会相应地减少燃料流量和调整风门开度,避免能源的浪费。同时,负荷动态响应机制还会考虑到锅炉的热惯性和其他动态特性,让控制过程更加平稳,避免出现温度波动过大等情况。

3.3策略优势分析

3.3.1对非线性系统的强适应能力。锅炉燃烧过程是一个非常复杂的非线性过程,它会受到很多因素的影响,而且这些因素之间的关系也不是简单的线性关系。传统的控制方法很难准确地描述和控制这种复杂的非线性过程。而人工智能赋能的控制策略,特别是基于深度神经网络的模型,能够很好地适应这种非线性特性^[7]。它可以通过对大量数据的学习,捕捉到燃烧过程中复杂的非线性关系,从而实现更精准的控制,让锅炉在不同的工况下都能保持良好的燃烧状态。

3.3.2多目标优化的平衡性。锅炉燃烧控制需要同时考虑多个目标,像提高热效率、降低污染物排放等。这些目标之间往往存在着矛盾,比如有时候为了提高热效率,可能会增加燃料的供应量,但这可能会导致污染物排放增加^[8]。人工智能赋能的控制策略采用多目标优化的方法,通过合理设计损失函数和奖励机制,可以在多个目标之间找到一个平衡点。它可以让锅炉在提高热效率的同时,尽量减少污染物的排放,实现高效、环保的运行。

3.3.3在线学习能力。锅炉的运行状态是不断变化的,燃料的特性、空气质量等因素都会随时间发生变化。人工智能赋能的控制策略具有在线学习能力,它可以根据实时采集到的数据对模型进行更新和优化。这样模型就能够始终准确地反映锅炉的实际运行状态,及时调整控制策略,适应不断变化的环境和工况,保证锅炉始终能够高效、稳定地运行。

4 技术挑战与发展前景

4.1技术挑战

4.1.1数据质量与泛化能力。锅炉运行数据可能因传感器故障、环境噪声等因素存在缺失或偏差,影响深度神经网络的训练效果。此外,不同型号、燃料类型的锅炉燃烧特性差异较大,模型需具备强泛化能力才能适应多样化场景^[9]。

4.1.2实时性与计算资源。强化学习等算法的在线学习机制依赖实时数据反馈,但锅炉控制系统对响应速度要求极高(毫秒级)。如何在有限的嵌入式设备或工业控制计算机上平衡计算负载与实时性,是工程落地的关键问题。

4.1.3安全与可靠性。人工智能模型的“黑箱”特性可能导致控制决策难以解释,而锅炉作为高风险工业设备,需确保控制策略的鲁棒性和故障容错能力。传统控制系统的冗余设计经验需与AI技术结合,避免因模型失效引发安全事故^[10]。

4.2发展前景

4.2.1跨领域技术融合。未来研究可结合数字孪生技术,构建虚拟锅炉模型与物理系统实时交互,进一步提升控制策略的适应性与预测精度。此外,边缘计算与5G通信技术的应用能解决数据传输延迟问题,支撑分布式AI控制架构。

4.2.2标准化与产业化。随着《工业互联网创新发展行动计划》等政策推动,锅炉燃烧智能优化控制有望形成行业标准。通过模块化设计降低AI解决方案的部署成本,推动中小型锅炉房的智能化改造,助力“双碳”目标实现。

4.2.3多目标协同优化。当前策略已初步实现热效率与排放的平衡,但未来可扩展至综合能源系统(如热电联产),耦合储能、可再生能源等多能流优化,进一步提升能源利用的经济性与可持续性。

5 结论

本文对人工智能赋能的锅炉燃烧智能优化控制策略进行了深入的研究。从锅炉燃烧系统的基本情况出发,分析了控制的难点和需求,接着阐述了人工智能相关理论在其中的应用基础,详细设计了智能优化控制策略,包括控制系统架构和关键控制策略。

研究结果显示,人工智能赋能的控制策略能够很好地适应锅炉燃烧过程的复杂性和动态变化,提高锅炉的热效率,降低污染物排放,同时具有良好的动态性能和适应性。这为锅炉燃烧的高效、环保运行提供了一种可行的解决方案。在未来的研究中,可以进一步探索如何将该控制策略更好地应用到实际的工业生产中,以及如何不断优化模型,提高其性能和可靠性,让锅炉燃烧控制技术能够不断发展和进步。

[参考文献]

- [1]鲍旭奇.基于深度强化学习的锅炉燃烧优化方法研究[D].东南大学,2022.
- [2]臧春华,潘宇.电厂锅炉燃烧优化及应用[J].山东化工,2020,49(15):127-129.
- [3]牛培峰,马云鹏,张欣欣,等.基于人工智能技术的火电厂燃煤锅炉智能燃烧优化研究及应用[J].智能科学与技术学报,2019,1(02):163-170.
- [4]刘建平.基于智能算法的火电厂锅炉燃烧优化技术探究[J].中国机械,2024,(07):64-67.
- [5]肖勇,石运兴.试论新时期人工智能技术在电站锅炉燃烧优化中的应用[J].现代工业经济和信息化,2021,11(04):86-87+90.
- [6]于闻歌.基于数据驱动的电站锅炉燃烧优化控制研究[D].华北电力大学,2024.
- [7]刘棒棒.基于智能算法的锅炉燃烧优化控制系统的应用[D].兰州理工大学,2024.
- [8]刘涛.火电厂锅炉燃烧优化技术探讨[J].中国设备工程,2023,(22):202-203.
- [9]黄志良.火电厂锅炉燃烧优化技术探讨[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(一),2025:143-144.
- [10]张科,朱金庆,李得堂,等.基于人工智能技术的火电厂燃煤锅炉智能燃烧优化[C]//中国电力技术市场协会.2025年(第八届)火电燃料管理及智能技术应用研讨会论文集,2025:85-87.

作者简介:

李强(1996—),男,汉族,辽宁省凌源市人,本科,助理工程师,发电厂锅炉专业。