

# 基于人工智能的循环流化床煤掺烧配比智能优化与调控

姬慧强

国能亿利能源有限责任公司电厂 内蒙古 鄂尔多斯 014300

**摘要:** 本文聚焦基于人工智能的循环流化床煤掺烧配比智能优化与调控。阐述智能优化理论基础,分析配比影响因素与传统调控局限。构建包含数据采集与预处理、多算法融合优化模型的智能优化体系,设计实时调控架构与不同工况调控策略,并实现系统硬件与软件适配。通过研究,实现循环流化床煤掺烧的精准配比与智能调控,提升燃烧效率、降低污染物排放、减少燃煤成本,推动循环流化床锅炉高效环保运行。

**关键词:** 循环流化床锅炉;煤掺烧;人工智能;配比优化

引言:循环流化床锅炉在能源领域应用广泛,煤掺烧是其提高能源利用效率、降低污染物排放的重要手段。然而,传统掺烧配比调控依赖人工经验,存在方式粗放、应对波动能力弱、优化目标单一等问题,难以满足智能高效运行需求。随着人工智能技术发展,将其应用于循环流化床煤掺烧配比优化调控成为可能。本文旨在探讨基于人工智能的煤掺烧配比智能优化与调控方法,为循环流化床锅炉运行提供理论支持与实践指导。

## 1 循环流化床煤掺烧的智能优化理论基础

### 1.1 循环流化床煤掺烧核心原理

循环流化床煤掺烧基于不同煤种理化特性互补性,通过合理配比混合燃煤,在循环流化床燃烧系统实现能量高效转化与污染物协同控制。其核心特征是气固两相流循环,燃料在炉膛流化,与空气充分接触,实现850-950℃低温燃烧,为掺烧提供适配条件。掺烧利用高发热量煤提升效率,高灰分、高硫煤固硫固氮降排放,同时参数互补避免炉膛结焦等问题。掺烧中,要控制混合煤的工业与元素分析指标,匹配循环流化床的流化风速、床温等运行参数,保证燃烧稳定高效,实现多效益统一。

### 1.2 人工智能核心技术与应用基础

人工智能核心技术是循环流化床煤掺烧智能优化的关键赋能手段,其应用基础围绕数据处理、模型构建与决策输出三大环节展开,适配掺烧过程的复杂性与动态性。核心技术主要包括机器学习、深度学习、模糊逻辑与专家系统等,其中机器学习(如支持向量机、随机森林、梯度提升树)用于挖掘煤质参数、运行参数与燃烧性能之间的非线性映射关系,实现燃烧效果的精准预测;深度学习(如神经网络、卷积神经网络)凭借强大的特征提取能力,可处理掺烧过程中多源、高维、冗余的监测数据,提升预测与优化的精度<sup>[1]</sup>。模糊逻辑与专家系统则用于融合现场运行经验,解决掺烧过程中不确定因素

(如煤质波动、工况突变)的调控问题。应用基础层面,需依托循环流化床燃烧系统的实时监测数据,构建标准化的数据体系,通过数据清洗、归一化、特征筛选等预处理,为人工智能模型提供高质量输入。

### 1.3 多目标优化理论

多目标优化理论是循环流化床煤掺烧智能优化的目标导向核心,解决多目标相互制约问题,为配比方案优选提供依据。其优化目标多元冲突,分技术、环境、经济三类。技术目标提升燃烧效率、降未燃尽碳;环境目标减少污染物排放;经济目标降成本、能耗与损耗。该理论构建优化函数,引入权重平衡优先级,用非支配排序等方法在可行域搜索帕累托最优解,避免单一目标优化弊端。应用时结合燃烧机理与运行约束,以煤质配比为决策变量,运行参数等为约束条件,通过优化算法求解,输出最优掺烧配比,为智能调控提供量化依据。

## 2 循环流化床煤掺烧配比影响因素与传统调控局限

### 2.1 关键影响因素系统分析

循环流化床煤掺烧配比的关键影响因素可系统分为煤质特性、运行参数与设备工况三大类,各类因素层层关联、相互耦合,共同决定掺烧效果的优劣。煤质特性是核心影响因素,主要包括单一煤种的工业分析指标(水分、灰分、挥发分、固定碳)、元素分析指标(硫、氮、碳等)与理化特性(灰熔点、可磨性、发热量),不同煤种的参数差异直接影响混合煤的燃烧性能,如高挥发分煤种可提升着火稳定性,高灰分煤种可抑制结焦但降低燃烧效率。运行参数是重要调控因素,包括流化风速、床温、炉膛压力、过量空气系数等,这些参数需与掺烧配比精准匹配,如床温过高易导致结焦,过低则降低燃烧效率与脱硫效果。设备工况是约束因素,包括锅炉容量、循环倍率、分离器效率等,设备结构与运行状态的差异,会导致相同掺烧配比下的燃烧效果存在显著差异<sup>[2]</sup>。

另外,煤质波动、负荷变化等随机因素,进一步增加了配比调控的复杂性,需通过系统分析实现因素的精准识别与量化。

## 2.2 传统掺烧配比调控的局限性

传统循环流化床煤掺烧配比调控模式以人工经验为核心,缺乏科学的理论支撑与精准的技术手段,在复杂工况下存在诸多局限性,难以满足智能、高效、环保的运行需求。首先,调控方式粗放,传统调控主要依赖操作人员根据现场燃烧现象(如床温、烟气颜色)与经验判断,手动调整掺烧配比,缺乏对煤质特性、运行参数等多因素的系统分析,配比调整具有滞后性与主观性,无法实现精准调控。其次,应对波动能力弱,当出现煤质波动、负荷变化、设备故障等突发情况时,人工调整难以快速响应,易导致燃烧不稳定、污染物排放超标、未燃尽碳含量升高等问题,影响机组安全稳定运行。再次,优化目标单一,传统调控多侧重单一目标(如降低燃煤成本或提升燃烧效率),忽视了多目标的协同优化,易出现顾此失彼的情况。最后,效率低下且依赖人员素质,人工调控需投入大量人力成本,且调控效果受操作人员经验、技能水平影响较大,存在调控偏差大、一致性差等问题,无法适配大规模、高参数循环流化床机组的运行需求。

## 3 基于人工智能的掺烧配比智能优化模型构建

### 3.1 数据采集与预处理体系

数据采集与预处理体系是掺烧配比智能优化模型构建的基础,核心是实现掺烧全流程多源数据的精准采集、规范整理与质量提升,为模型提供高质量、高可靠性的输入数据。数据采集环节,搭建多源数据采集系统,涵盖煤质数据采集、运行参数采集与排放数据采集三部分:煤质数据通过离线检测与在线监测相结合的方式获取,包括单一煤种与混合煤的工业分析、元素分析等参数;运行参数通过锅炉控制系统、传感器等设备实时采集,包括床温、流化风速、炉膛压力等关键参数;排放数据通过环保监测设备采集,包括SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、粉尘等污染物浓度。预处理环节,针对采集数据中存在的缺失值、异常值、冗余数据等问题,采用相应的处理方法:通过插值法、回归法补充缺失值,通过3 $\sigma$ 原则、箱型图法剔除异常值,通过特征筛选、归一化处理减少冗余数据、统一数据尺度,同时通过数据融合技术整合多源数据,挖掘数据间的关联关系,最终形成标准化、高质量的数据集,确保模型构建的准确性与可靠性。

### 3.2 多算法融合优化模型设计

多算法融合优化模型设计是智能优化模型的核心,

结合人工智能算法与多目标优化算法的优势,构建适配循环流化床煤掺烧复杂性的融合模型,实现掺烧配比的精准预测与多目标优化<sup>[3]</sup>。模型整体采用“预测-优化”二级架构:一级为燃烧效果预测模型,基于深度学习算法(如BP神经网络、LSTM神经网络)构建,以预处理后的煤质参数、运行参数为输入,以燃烧效率、污染物排放浓度、未燃尽碳含量等为输出,精准预测不同掺烧配比下的燃烧效果;二级为多目标优化模型,融合遗传算法、粒子群优化算法等智能优化算法,以掺烧配比为决策变量,以燃烧效率最大化、污染物排放最小化、燃煤成本最小化为优化目标,结合燃烧机理约束与设备运行约束,求解帕累托最优解集。通过算法融合,弥补单一算法的局限性,提升模型的预测精度与优化效率,同时引入注意力机制优化特征提取过程,增强模型对关键参数的敏感度,确保优化方案的科学性与工程可行性。

### 3.3 模型验证与优化

模型验证与优化作为保障智能优化模型实用性与可靠性的核心环节,其重要性不言而喻。通过多场景、多维度的严谨验证测试,能够精准识别模型存在的不足,进而开展针对性的参数优化,确保模型可有效适配现场复杂多变的工况。模型验证采用“离线验证+在线测试”相结合的综合方式。离线验证阶段,精心选取历史运行数据作为测试集,将模型输出的掺烧配比方案与历史最优方案、实际运行数据进行细致对比。重点聚焦燃烧效率、污染物排放、燃煤成本等核心指标的偏差情况,严格控制模型预测误差,确保其控制在合理范围之内,以此验证模型的预测精度与优化效果。在线测试则更具挑战性与实际意义,将模型部署到现场控制系统,选取满负荷、部分负荷、煤质波动工况等不同工况进行实地测试。密切观察锅炉运行状态、燃烧效果的变化,全面检验模型输出方案的可行性与稳定性,判断其是否切实满足现场运行要求。针对验证过程中暴露的问题,采取一系列有效措施进行优化。通过调整模型参数,如合理设置神经网络层数、优化算法迭代次数;优化特征筛选方法,精准提取关键特征;补充训练数据,增强模型的泛化能力等方式,全方位提升模型的鲁棒性与适配性,最终形成能够稳定、精准运行的掺烧配比智能优化模型,为实际生产提供有力支持。

## 4 掺烧配比智能调控策略与系统设计

### 4.1 实时调控架构设计

掺烧配比实时调控架构采用闭环控制设计,构建“数据采集-模型优化-指令执行-反馈调整”的全流程调控体系,明确各模块的功能与协同关系,确保调控的实时性、

精准性与稳定性。架构主要分为四个核心模块：数据采集与感知模块，通过现场传感器、监测设备实时采集煤质参数、运行参数、排放参数等多源数据，经预处理后传输至核心控制模块，实现工况的实时感知；核心控制模块，集成前文构建的智能优化模型，根据实时采集的数据，快速求解最优掺烧配比方案，并结合现场运行约束，生成调控指令；指令执行模块，对接锅炉燃煤输送系统、给煤设备等，将核心控制模块输出的调控指令转化为具体的操作动作，精准调整各煤种的给煤量与配比；反馈调整模块，实时监测调控后的燃烧效果、运行参数与污染物排放数据，与优化目标进行对比，若存在偏差，及时将反馈信息传输至核心控制模块，调整优化模型参数与调控指令，形成闭环调控，确保掺烧过程始终处于最优状态，适配工况的动态变化。

#### 4.2 不同工况下的调控策略

针对循环流化床机组运行过程中工况多变的特点，结合不同工况的核心需求与约束条件，制定差异化的掺烧配比智能调控策略，确保各类工况下均能实现燃烧效果、污染物排放与经济性的协同优化。满负荷稳定工况下，调控核心是维持燃烧稳定与高效，采用固定优化权重等多目标优化策略，优先保障燃烧效率与污染物排放达标，小幅调整掺烧配比，减少工况波动；部分负荷工况下，根据负荷变化趋势，提前优化掺烧配比，调整高发热量与低发热量煤种的比例，兼顾燃烧稳定性与经济性，避免负荷波动导致的燃烧效率下降；煤质波动工况下，采用动态权重调控策略，当煤质出现突变时，快速识别煤质参数变化，重点优化掺烧配比以适应煤质波动，优先保障锅炉稳定运行，再逐步调整目标权重，实现多目标优化；故障应急工况下，简化优化流程，优先采用安全导向的调控策略，调整掺烧配比降低燃烧强度，避免故障扩大，待故障排除后，逐步恢复正常优化调控模式，确保机组安全稳定运行。

#### 4.3 系统硬件与软件适配

掺烧配比智能调控系统的硬件与软件适配，是确保系统稳定运行、实现智能调控落地的关键，核心是实现

硬件设备的兼容对接与软件系统的高效协同。硬件适配方面，结合现场锅炉设备的现有配置，优化硬件布局：新增煤质在线监测设备、高精度传感器，提升数据采集的精准度与实时性；升级给煤设备、输送系统的控制模块，实现给煤量的精准调控，确保掺烧配比指令的高效执行；搭建工业以太网与数据采集网关，实现各硬件设备、控制系统的互通，保障数据传输的稳定性与安全性，避免数据丢失或延迟<sup>[4]</sup>。软件适配方面，构建分层式软件架构，包括数据层、模型层、控制层与界面层：数据层负责数据的存储、管理与预处理，适配多源数据格式；模型层集成智能优化模型，支持模型参数的在线调整与升级；控制层对接硬件设备，实现调控指令的转化与执行；界面层设计人性化操作界面，支持操作人员实时监控工况、调整调控参数、查看优化结果。同时确保软件系统与现场原有控制系统（如DCS系统）兼容，实现无缝对接，降低系统部署成本，提升系统的实用性与可扩展性。

#### 结束语

本文围绕基于人工智能的循环流化床煤掺烧配比智能优化与调控展开研究，从理论基础、影响因素分析到智能优化模型构建，再到调控策略与系统设计，形成完整体系。研究表明，该智能优化与调控方法能有效提升循环流化床煤掺烧效果，实现多目标协同优化。未来，可进一步探索更先进的人工智能算法，优化系统性能，推动循环流化床锅炉技术向更智能、高效、环保方向发展。

#### 参考文献

- [1]张鹏新,高明明,解沛然,等.基于数据驱动的循环流化床机组深度调峰NO<sub>x</sub>预测[J].发电技术,2025,46(3):627-636.
- [2]刘念.基于贝叶斯理论优化生物质循环流化床锅炉设计论述[J].现代工业经济和信息化,2022,12(8):90-92.
- [3]闫丽,王昆,冯伟,等.应用循环流化床锅炉掺烧城市污泥的技术探索[J].清洗世界,2024,40(2):1-3.
- [4]何海军.燃煤循环流化床锅炉掺烧污泥应用研究进展[J].煤质技术,2024,39(4):24-33.