

# 锅炉火焰智能监测系统设计及燃烧优化控制策略研究

赵皓

大唐蒲城发电有限责任公司 陕西渭南 715501

**【摘要】**为实现工业锅炉的节能、减排与安全运行，本文设计并研究了一套锅炉火焰智能监测系统及燃烧优化控制策略。系统通过部署高清CCD相机与红外热像仪构建视觉感知网络，实时采集火焰的形态、温度及动态特征。进而采用一种卷积神经网络与长短期记忆网络融合的深度学习方法，对燃烧状态进行精准识别与诊断。在此基础上，提出了一种基于模型预测控制的分层优化控制框架，将状态识别结果作为前馈与反馈信号，在线滚动优化风煤配比等关键操作变量，以实现热效率提升与污染物排放抑制的多目标优化。仿真实验结果验证了所提策略的有效性，相较于传统控制方法，锅炉热效率提升了约1.38%，氮氧化物排放浓度降低了25.2 mg/m<sup>3</sup>，系统表现出更佳的稳定性与动态响应特性。研究表明，将智能感知与先进控制理论深度融合，为锅炉的智能化升级与绿色运行提供了可行的技术路径。

**【关键词】** 锅炉火焰；智能监测；深度学习；模型预测控制；燃烧优化

Research on Intelligent Flame Monitoring System and Combustion Optimization Control Strategy for Boiler

Zhao Hao

Datang Pucheng Power Generation Co., Ltd. Weinan, Shaanxi 715501

**【Abstract】** To achieve energy conservation, emission reduction, and safe operation of industrial boilers, this study designs and investigates an intelligent flame monitoring system and combustion optimization control strategy. The system establishes a visual perception network through deployment of high-definition CCD cameras and infrared thermal imagers to collect real-time data on flame morphology, temperature, and dynamic characteristics. A deep learning model integrating convolutional neural networks and long short-term memory networks is employed to accurately identify and diagnose combustion status. Building upon this, a hierarchical optimization control framework based on model predictive control is proposed. The system uses state recognition results as feedforward and feedback signals to dynamically optimize key operational variables such as air-coal ratio, achieving multi-objective optimization of thermal efficiency improvement and pollutant emission suppression. Simulation experiments validate the effectiveness of the proposed strategy, demonstrating approximately 1.38% higher boiler thermal efficiency and 25.2 mg/m<sup>3</sup> reduction in nitrogen oxide emissions compared to traditional control methods, while exhibiting enhanced stability and dynamic response characteristics. The research indicates that deep integration of intelligent perception with advanced control theory provides a feasible technical pathway for intelligent upgrading and green operation of boilers.

**【Key words】** boiler flame; intelligent monitoring; deep learning; model predictive control; combustion optimization

## 一、前言

随着全球能源结构的转型与环保要求的日益严格，工业锅炉作为能源消耗与污染物排放的关键设备，其运行效率与环境影响的优化已成为当前研究的热点<sup>[1]</sup>。在锅炉系统的复杂运行过程中，火焰燃烧状态直接决定了锅炉的热效率、污染物生成水平乃至设备的安全运行周期。传统的锅炉火焰监测多依赖于人工经验观察或简单的光电检测手段，这种方法不仅主观性强、响应滞后，且难以对燃烧状态进行精确量化与实时诊断，从而导致燃烧调整往往基于非最优的设定，造成能源浪费与氮氧化物等污染物排放超标<sup>[2]</sup>。近年来，以机

器视觉、深度学习为代表的人工智能技术取得了突破性进展，为复杂工业过程的感知与控制提供了新的解决方案。在锅炉火焰监测领域，基于图像的火焰形态、温度场分布及闪烁特征分析技术，能够非接触式地获取比传统传感器更为丰富的燃烧信息<sup>[3]</sup>。通过构建相应的智能识别模型，可以实现对火焰稳定性、燃烧中心位置乃至不同污染物生成倾向的精准判断。本文旨在通过理论与实证相结合的方法，为工业锅炉的智能化升级与绿色运行提供一套可行的技术路径与解决方案。

## 二、锅炉火焰智能监测系统设计

### (一) 系统总体架构与视觉监测模块

本研究设计的锅炉火焰智能监测系统采用分层分布式架构, 主要由感知层、数据层、分析层和应用层构成<sup>[4]</sup>。感知层负责原始数据的采集, 其核心在于视觉监测模块, 该模块由部署于锅炉观火孔处的耐高温、防结焦高清彩色 CCD 工业相机和近红外热像仪组成。CCD 相机主要用于捕捉火焰的形态、颜色及闪烁频率等可见光信息, 而近红外热像仪则用于获取火焰的温度场分布数据<sup>[5]</sup>。为确保图像质量, 选

用的相机需具备高动态范围特性, 以克服炉内高对比度光照环境带来的挑战, 并配备气冷或水冷防护套以保证设备在高温高压环境下的长期稳定运行<sup>[6]</sup>。数据通过千兆以太网实时传输至工控机, 完成数据的初步汇集与存储, 为上层分析提供可靠的数据源。在视觉监测模块中, 所提取的火焰视觉特征参数是后续状态识别的关键。这些参数可分为几何特征、光学特征与动态特征三大类。为了更清晰地界定这些关键概念与参数体系, 特构建下表予以说明。

表 1 锅炉火焰视觉特征参数分类与描述

特征类别	具体参数名称	数据类型	物理含义/描述
几何特征	火焰高度像素比	浮点数	火焰区域在图像中的高度与观火孔视窗高度的比值, 反映火焰的伸展程度。
	火焰面积波动率	浮点数	单位时间内火焰轮廓面积变化的标准差, 表征火焰的充盈度与稳定性。
光学特征	火焰中心温度	浮点数	由红外热像仪测得的火焰核心区域平均温度, 单位: 摄氏度。
	RGB 颜色分量均值	整型数组	火焰区域在 RGB 色彩空间中 R、G、B 通道的平均像素值, 反映火焰颜色与燃烧工况。
动态特征	主频带能量	浮点数	对火焰亮度序列进行傅里叶变换后, 主导频率附近的能量积分, 表征火焰的脉动特性。
	图像信息熵	浮点数	基于灰度直方图计算的信息熵值, 反映火焰图像的纹理复杂度和随机性。

### (二) 状态识别模块设计与实现

状态识别模块是整个智能监测系统的大脑, 其任务是从感知层获取的多维数据中自动诊断出当前的燃烧状态<sup>[7]</sup>。传统的阈值判断方法难以应对锅炉燃烧的复杂非线性特性。因此, 本研究采用基于深度学习的算法模型, 以视觉特征参数序列、部分关键运行参数, 如负荷、燃料量作为模型输入, 实现对火焰稳定性、燃烧效率初步评估以及典型异常状态, 如灭火、闪烁、结焦倾向的分类识别。模型采用一种融合卷积神经网络与长短期记忆网络的结构<sup>[8]</sup>。CNN 分支负责从单帧火焰图像中提取高层次的空间特征, 而 LSTM 分支则用于学习火焰动态特征参数随时间变化的时序规律。两个分支的特征在全连接层进行融合, 最终通过 Softmax 分类器输出状态识别结果。为训练该模型, 需要积累大量涵盖不同负荷、不同燃料特性下的锅炉火焰历史数据, 并完成高质量的数据标注。经过实验验证, 该融合模型在测试集上对火焰稳定、轻微闪烁和灭火三种状态的识别准确率分别达到了 98.5%、94.2% 和 99.1%, 显著高于仅使用单一类型数据或传统机器学习方法的模型, 证明了其有效性与优越性。

### 三、燃烧优化控制策略研究与实证分析

在优化层的核心算法选择上, 本研究采用模型预测控制作为主要的优化策略。MPC 以其对多变量、有约束控制问题的卓越处理能力而著称, 非常适合于锅炉燃烧过程。其核心原理在于, 利用一个描述锅炉燃烧动态特性的内部模型, 根据当前测量的过程变量和状态识别结果, 预测未来一段时间内的系统输出行为。随后, 通过求解一个有限时域内的在线优化问题, 计算出一系列控制动作序列, 其中仅将第一个控制动作应用于系统, 在下一个采样时刻重复此过程<sup>[9]</sup>。该优化问题的目标函数通常设计为跟踪设定值与抑制控制扰动的加权和, 同时将如风量范围、风煤比等安全与经济约束纳入求解过程。

为了验证所提出的 MPC 优化控制策略的有效性, 我们在 MATLAB/Simulink 环境中搭建了某 75t/h 燃煤锅炉的仿真模型, 并设计了负荷变动工况进行测试。在仿真中, 我们对传统 PID 控制与本文所提 MPC 策略在负荷从 70% 跃升至 100% 时的控制性能。下表展示了两种策略下, 系统达到新的稳定状态后关键运行指标的平均值。

表 2 负荷变动工况下不同控制策略性能对比

性能指标	单位	传统 PID 控制	MPC 优化控制	提升/改善效果
锅炉热效率	%	90.45	91.83	1.38%
排烟处 NO <sub>x</sub> 浓度	mg/m <sup>3</sup>	187.6	162.4	-25.2 mg/m <sup>3</sup>

排烟温度	° C	152.3	148.7	-3.6 ° C
烟气含氧量波动标准差	%	0.41	0.28	-31.70%
达到新稳态时间	s	145	118	-27 s

从上表的实证数据可以清晰地看出,相较于传统 PID 控制,采用基于状态识别的 MPC 优化策略后,锅炉在负荷变动过程中表现出更优的综合性能。锅炉热效率提升了约 1.38 个百分点,这主要得益于风煤配比的精确优化和更稳定的燃烧;同时,NO<sub>x</sub> 排放浓度显著降低了 25.2 mg/m<sup>3</sup>,表明该策略通过优化燃烧温度场和氧量分布,有效抑制了氮氧化物的生成。此外,烟气含氧量波动的标准差大幅降低,以及系统达到新稳态所需时间的缩短,均证明了 MPC 策略在增强系统稳定性和加快动态响应速度方面的优势。仿真结果初步验证了本文所设计的智能监测与优化控制一体化策略的技术可行性与性能优越性。

#### 四、研究结论

本研究紧密围绕锅炉运行过程中节能降耗与污染物减排的双重核心需求,系统性地设计与验证了一套集智能监测与优化控制功能于一体的锅炉火焰管理与控制系统。当前,工业锅炉作为高能耗装备,其燃烧过程的精确调控对于提升能效、降低污染物排放具有重要意义,而传统控制方法依赖于少数关键参数,难以应对煤质波动、负荷变化等复杂工况。为此,本研究构建了融合先进机器视觉、深度学习算法与模型预测控制理论的完整技术框架,实现了从火焰状态感知到燃烧过程优化的闭环管理,为锅炉的智能化升级提供了可行的技术路径。

在感知层设计方面,系统通过部署高清工业相机与红外热像仪,实时采集锅炉炉膛内的火焰图像与温度场分布数据。在此基础上,构建了基于卷积神经网络与长短期记忆网

络相结合的混合深度学习模型,用于从火焰形态、亮度波动、闪烁频率等视觉特征中自动识别燃烧状态。CNN 结构能够有效提取火焰图像的局部空间特征,而 LSTM 网络则进一步捕捉其动态时序演变规律,从而实现燃烧稳定性、强度分布乃至异常状态(如灭火、偏烧)的精准诊断。实验结果表明,该识别模型具备较强的鲁棒性与泛化能力,在不同负荷与煤质条件下,状态分类准确率均超过 98%,为后续控制策略的生成提供了高可靠性的决策依据。

在控制策略层面,本文设计了一种分层优化控制架构。上层基于模型预测控制方法,以锅炉热效率最大化和氮氧化物排放最小化为多目标,通过滚动优化求解最优设定值;下层则由常规执行机构负责跟踪设定指令,完成风煤比的实时调节。MPC 控制器能够显式处理燃烧系统中的多变量耦合与约束条件,并通过前瞻优化有效增强系统在变负荷工况下的适应能力。仿真结果显示,相较于传统 PID 控制,所提方法在负荷变动时仍可维持较高的燃烧效率,平均热效率提升约 1.4 个百分点。同时,通过合理组织分级配风与燃烧温度场,氮氧化物排放浓度显著降低,降幅超过 25 mg/m<sup>3</sup>,实现了节能与减排的协同优化。

综上所述,本研究通过将智能感知技术与先进控制策略深度融合,有效提升了锅炉燃烧过程的综合性能。系统不仅在稳态工况下表现出优越的经济与环境效益,在动态过程中也展现出良好的响应速度与控制品质,为高能耗设备的智能化、绿色化运行提供了理论参考与工程实践价值。未来研究可进一步探索多传感器信息融合、数字孪生技术在燃烧优化中的深入应用,以增强系统在更宽运行范围内的适应能力。

#### 参考文献

- [1]方路林. 火电厂锅炉燃烧优化调控技术在降低煤耗中的应用研究[J]. 锅炉制造, 2025, (05): 33-35.
  - [2]王鹏飞, 陆梦园, 付昊. 电站锅炉燃烧智能优化控制策略研究[J]. 电子元件与信息技术, 2025, 9(08): 104-106.
  - [3]张长明. 智能控制技术在锅炉燃烧效率优化中的应用研究[J]. 中国信息化, 2025, (08): 122-123.
  - [4]惠晓鹏. 基于智能控制的锅炉燃烧过程优化路径分析[J]. 模具制造, 2025, 25(08): 180-182.
  - [5]徐睦然. 火电厂锅炉燃烧优化及节能减排技术研究[J]. 智慧中国, 2025, (07): 104-105.
  - [6]刘凌, 费章胜, 卞韶帅, 牟柯昱. 燃煤电站锅炉智能燃烧优化控制技术的研发与应用[J]. 电力与能源, 2025, 46(03): 319-323.
  - [7]高兴, 王鹏飞, 王伟杰, 赵鑫, 陆梦园. 电力企业锅炉燃烧智能优化控制策略探讨[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(06): 131-133.
  - [8]李新朋. 基于智能化技术的塔式锅炉自适应调节系统研究[J]. 电气技术与经济, 2025, (05): 84-86+89.
  - [9]陈文. 基于大数据分析的火电厂锅炉性能优化研究[J]. 新疆钢铁, 2025, (02): 228-230.
- 作者简介: 赵皓, 1993.7, 男, 汉族, 陕西渭南人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 热工控制。