

# 火电厂锅炉燃烧自动控制系统优化

李江川

新疆能源(集团)有限责任公司 新疆 阿拉尔 843300

**摘要:** 锅炉燃烧过程作为火电厂能量转换的核心环节,其控制水平直接决定了机组的整体性能。传统的燃烧自动控制系统虽已广泛应用,但在应对煤质多变、负荷频繁波动等复杂工况时,常显现出控制精度不足、经济性与环保性难以协同、系统鲁棒性欠佳等问题。本文旨在系统性地探讨火电厂锅炉燃烧自动控制系统的优化路径。首先,深入剖析了燃烧自动控制系统的基本构成、工作原理及其在协调控制框架下的核心作用;其次,指出了传统控制方法(如PID)在面对高度非线性、强耦合、大时滞的燃烧过程时所面临的固有局限;进而,重点论述了以智能算法(包括模糊控制、神经网络、遗传算法等)为核心的先进控制策略;最后,展望了该领域未来的发展趋势,即深度融合人工智能、大数据、数字孪生等前沿技术,迈向智慧化、自适应化的全新阶段。本研究为提升火电机组的综合竞争力、实现高效清洁低碳运行提供了理论参考和技术方向。

**关键词:** 火电厂; 锅炉燃烧; 自动控制; 智能优化; 多目标优化; 数字孪生

## 引言

电力是现代社会的运转关键,火力发电因技术成熟、规模效应强、调峰能力佳,在全球能源格局中长期占主导。虽可再生能源发展快,但火电在保障能源安全、支撑电网稳定上短期内无可替代。不过,传统火电高能耗、高排放,在环保法规趋严和“双碳”战略下,面临巨大转型压力。火电厂能量转换效率和污染物排放水平,核心取决于锅炉燃烧过程。理想燃烧要充分稳定释放化学能并高效转化为热能,同时最小化有害物质生成,这依赖精准高效的自动控制系统。早期锅炉控制靠人工手动调节,劳动强度大且效果受主观因素影响,难以保证最优工况。随着自动化发展,分散控制系统(DCS)成为火电厂标配,燃烧自动控制系统是其核心子系统,负责调节关键参数以维持稳定燃烧。但现代大型火电机组锅炉系统复杂,是典型的多输入多输出、强耦合等非线性对象,传统基于线性模型和固定参数的控制策略,面对实际工况时难以兼顾多方面要求,导致系统性能下降。因此,深度优化火电厂锅炉燃烧自动控制系统,既能提升电厂经济效益、降低运营成本,也是履行社会责任、实现绿色发展的必然。本文将从多维度对这一课题展开系统性研究探讨。

## 1 火电厂锅炉燃烧自动控制系统的构成与原理

### 1.1 基本构成

火电厂锅炉燃烧自动控制系统并非一个孤立的单元,而是嵌入在整个机组协调控制系统(CCS)中的关键执行部分。其主要任务是根据主控系统发出的负荷指令,精确、快速、稳定地调整进入炉膛的燃料与空气,

以维持主蒸汽压力的稳定,并确保燃烧过程的安全与高效。该系统通常由以下几个核心子系统协同构成:(1)燃料控制系统:这是燃烧控制的基础。对于直吹式制粉系统的锅炉,该系统通过调节给煤机的转速来控制进入磨煤机的原煤量,进而控制送往炉膛的煤粉量。其核心目标是使燃料供给能够快速、准确地响应负荷需求的变化。(2)风量控制系统:风量控制又可细分为总风量控制和二次风配比控制。总风量控制的目标是维持合适的过量空气系数,这是保证燃料完全燃烧、提高燃烧效率的关键。过少会导致燃烧不完全,增加机械不完全燃烧损失;过多则会增加排烟热损失,并可能加剧NO<sub>x</sub>的生成。二次风配比控制则更为精细,通过调节各层燃烧器的辅助风(周界风)和燃尽风门开度,优化炉内空气动力场,改善火焰形状和充满度,从而强化燃烧并抑制污染物生成<sup>[1]</sup>。(3)炉膛压力控制系统:该系统通过调节引风机的导叶或转速,维持炉膛压力在一个微负压的设定值。稳定的炉膛负压是保证燃烧安全的前提,既能防止炉膛向外喷火,又能避免大量冷空气被吸入炉膛,影响燃烧效率和排烟温度。(4)一次风系统:对于直吹式制粉系统,一次风不仅用于输送煤粉,还承担着干燥原煤的任务。因此,一次风压力和温度的控制也至关重要,它们直接影响磨煤机的出力和煤粉细度。这些子系统并非独立运作,而是通过复杂的耦合关系相互影响。例如,燃料量的增加会要求相应增加送风量,否则会导致缺氧燃烧;送风量的大幅变化又会引起炉膛压力的波动。因此,燃烧控制系统的设计必须充分考虑这种强耦合特性,采用解耦或前馈补偿等策略,以实现各子系统

的协调动作。

### 1.2 工作原理

其基本工作原理遵循经典的反馈控制思想：系统通过遍布锅炉各处的传感器（如压力变送器、氧量分析仪、温度热电偶等）实时采集关键运行参数，并将其与设定值进行比较，得到偏差信号。控制器（如PID控制器）根据偏差的大小、累积量和变化率，计算出相应的控制指令，驱动执行机构（如电动/气动调节阀、变频器等）动作，从而调整燃料、风量等输入，最终使被控参数回归到设定值附近，形成一个闭环的自动调节回路。

## 2 传统控制方法的局限性分析

以PID（比例-积分-微分）控制为代表的经典控制理论，在火电厂自动化进程中发挥了历史性的作用，至今仍仍是许多基础回路的首选方案。其结构简单、物理意义明确、工程实现方便，对于线性、定常且动态特性相对简单的对象具有良好的控制效果。然而，当应用于锅炉燃烧这一极端复杂的工业过程时，传统PID控制的局限性便暴露无遗：

### 2.1 对非线性与时变性的适应能力差

锅炉燃烧过程本质上是非线性的。例如，燃料发热量的变化、受热面结焦积灰导致的传热效率改变、以及不同负荷段下设备特性的差异，都使得系统的动态模型参数随时间不断变化。固定的PID参数无法适应这种时变特性，在一种工况下调校出的最优参数，在另一种工况下可能变得极不稳定或响应迟缓。

### 2.2 难以处理强耦合问题

如前所述，燃料、风量、炉膛压力等变量之间存在强烈的相互影响。传统的单回路PID控制无法有效解决这种耦合，常常导致系统振荡或调节过程缓慢。虽然可以采用串级、前馈等复杂回路结构进行一定程度的解耦，但这极大地增加了系统设计的复杂性和调试难度，且效果有限。

### 2.3 缺乏对多目标的协同优化能力

运行人员追求的目标是多元的：既要高的锅炉效率（低煤耗），又要低的污染物排放（尤其是NO<sub>x</sub>），还要保证汽温、汽压等参数的稳定。这些目标之间往往存在矛盾。例如，为了降低NO<sub>x</sub>排放，通常需要采用分级燃烧或烟气再循环等技术，但这可能会牺牲一部分燃烧效率<sup>[2]</sup>。传统的PID控制仅针对单一被控变量进行调节，无法在多个相互冲突的目标之间进行权衡和优化，只能依靠运行人员凭经验进行手动干预，难以实现全局最优。

### 2.4 对大时滞和大惯性的挑战

从燃料投入炉膛到其燃烧放热、再到热量传递给工

质、最终反映在主蒸汽压力上，整个过程存在显著的时间延迟和惯性。PID控制器中的微分作用虽然能预测趋势，但对于过大的时滞，其预测能力有限，容易导致系统超调或振荡。

## 3 基于智能算法的燃烧控制优化策略

为克服传统控制方法的不足，学术界和工业界将目光投向了人工智能领域，涌现出一系列基于智能算法的先进控制策略。这些方法不依赖于被控对象的精确数学模型，而是通过模拟人类的思维、学习和决策过程，来处理不确定性、非线性和复杂性问题。

### 3.1 模糊控制（Fuzzy Control）

模糊控制的核心思想是将专家的操作经验和语言规则（如“如果氧量偏高且负荷上升，则大幅增加送风量”）形式化为模糊规则库。它通过模糊化、模糊推理和解模糊化三个步骤，将精确的输入量转化为模糊语言变量，依据规则库进行推理，再将模糊输出转化为精确的控制量。模糊控制特别适用于那些难以建立精确数学模型、但有丰富操作经验的场合。它可以有效地处理燃烧过程中的不确定性和非线性，并能将运行人员的经验融入自动控制逻辑中，显著提升系统的鲁棒性和适应性。

### 3.2 神经网络控制（Neural Network Control）

人工神经网络（ANN）是一种强大的非线性映射工具，具有极强的学习、记忆和泛化能力。在燃烧优化中，神经网络主要有两种应用模式：（1）作为辨识器/预测器：利用历史运行数据训练一个神经网络模型，使其能够准确预测在给定输入（如燃料量、风量、负荷）下，锅炉的关键输出（如主汽压力、排烟温度、NO<sub>x</sub>浓度、锅炉效率）将会是多少。这个预测模型可以为后续的优化决策提供依据。（2）作为控制器：直接训练一个神经网络，使其能够根据当前的系统状态（误差、误差变化率等）输出最优的控制指令<sup>[3]</sup>。或者，将神经网络与PID结合，构成神经网络PID控制器，利用神经网络在线学习和调整PID参数，实现自适应控制。

### 3.3 遗传算法（Genetic Algorithm, GA）及其他优化算法

遗传算法是一种模拟生物进化过程的全局优化搜索算法。在燃烧优化中，它可以被用来解决复杂的多变量、多约束优化问题。例如，可以将燃料分配、各层风门开度等作为优化变量，将锅炉效率最大化、NO<sub>x</sub>排放最小化等作为优化目标，构建一个多目标优化模型。遗传算法通过模拟“选择、交叉、变异”等遗传操作，在庞大的解空间中搜索出帕累托（Pareto）最优解集，为运行人员提供一系列在经济性与环保性之间取得不同平衡

的运行方案。

这些智能算法并非孤立使用，实践中常常将它们结合起来，形成混合智能控制策略。例如，“模糊-神经网络”控制器可以利用神经网络的学习能力来自动调整模糊规则和隶属度函数；“神经网络-遗传算法”框架则可以用神经网络作为快速的性能评估器，为遗传算法提供高效的适应度计算，从而加速优化过程。这些先进的控制策略共同构成了现代锅炉燃烧优化的技术基石。

#### 4 未来发展趋势：迈向智慧燃烧

随着新一轮科技革命和产业变革的深入推进，火电厂锅炉燃烧自动控制系统的优化正朝着更高阶的“智慧化”方向演进。未来的燃烧控制系统将不再是简单的“感知-控制”回路，而是一个集成了感知、分析、决策、执行于一体的智能体。

##### 4.1 与大数据和云计算的深度融合

现代火电厂的DCS系统每天产生海量的运行数据。通过对这些历史数据和实时数据进行深度挖掘和分析，可以更精准地刻画锅炉在全工况下的性能特征，发现隐藏的运行规律，为优化模型提供更高质量的训练样本和更可靠的预测基础。云计算平台则为复杂优化算法的在线运行提供了强大的算力支持。

##### 4.2 数字孪生（Digital Twin）技术的应用

数字孪生技术为锅炉燃烧优化开辟了全新的范式。通过构建一个与物理锅炉实时同步、动态交互的高保真虚拟模型（数字孪生体），可以在虚拟空间中对各种燃烧策略进行“预演”和“沙盘推演”，评估其对效率、排放和设备寿命的影响，而无需在真实设备上进行风险试验<sup>[4]</sup>。这极大地降低了优化试错的成本和风险，并能实现对设备状态的超前预警和健康管理。

##### 4.3 强化学习等新一代AI技术的引入

强化学习是一种让智能体通过与环境的交互来学习最优策略的机器学习方法。未来的燃烧控制系统可以被设计成一个强化学习智能体，它通过不断地尝试不同的控制动作，根据获得的“奖励”（如效率提升、排放降低）来自主学习和进化，最终掌握一套在复杂多变环境

下都能实现最优控制的策略，真正实现控制系统的自主学习、自适应和自进化。

##### 4.5 边缘计算与云边协同架构

为了满足燃烧控制对实时性的严苛要求，部分轻量级的智能算法（如快速预测模型、自适应PID参数整定）可以部署在靠近数据源的边缘计算节点上，实现毫秒级的本地闭环控制。而复杂的全局优化、模型训练等任务则可以在云端完成，形成云边协同的智能控制架构，兼顾了实时性与智能化水平。

## 5 结语

火电厂锅炉燃烧自动控制系统的优化是一项复杂的系统工程，是提升火电核心竞争力的关键所在。本文系统地梳理了从传统控制到智能优化，再到未来智慧燃烧的发展脉络。研究表明，单纯依赖传统的PID等经典控制方法已无法满足现代火电高效、清洁、灵活、智能的综合发展需求。未来的优化方向必然是以多目标协同为核心，深度融合模糊逻辑、神经网络、遗传算法等智能技术，并在此基础上，积极拥抱大数据、云计算、数字孪生和强化学习等前沿科技。通过构建一个能够自我感知、自我分析、自我决策、自我优化的智慧燃烧系统，火电厂方能在能源革命的浪潮中实现华丽转身，不仅继续扮演好“压舱石”和“稳定器”的角色，更能成为绿色低碳发展的践行者和引领者。这不仅是技术层面的升级，更是火电行业面向未来的一场深刻变革。

## 参考文献

- [1]蒋宏朝.基于自动控制的火电厂锅炉自适应燃烧控制系统优化[J].电力设备管理,2025,(18):75-77.
- [2]范雪龙,邓继军.基于自动控制的火电厂锅炉自适应燃烧控制系统优化及应用[J].大众标准化,2025,(02):136-138.
- [3]田琪.基于火电厂锅炉燃烧优化技术的关键探究[J].科技与创新,2026,(04):210-212.
- [4]胡凯鹏,刘文梅,陈广栋.火电厂锅炉燃烧优化中智能算法运用探析[J].电力设备管理,2026,(02):89-91.