

[超临界机组]

基于改进贪心算法的超超临界机组对冲燃烧锅炉低氮燃烧优化

文/王洪波
国能寿光发电有限责任公司

针对超超临界机组对冲燃烧锅炉在运行过程中NO_x排放高、排烟温度高的问题，开展基于改进贪心算法的低氮燃烧优化研究。通过建立包含质量守恒、能量守恒和动量守恒的燃烧模型，描述燃烧过程中的燃料燃烧、热量传递及污染物生成特性，为优化提供理论基础。研究表明，该方法在超超临界机组低氮燃烧优化中具有较高的工程应用价值。

随着全球能源需求的不断增长和环境保护意识的日益增强，提高燃煤锅炉的燃烧效率并降低氮氧化物（NO_x）排放已成为电力行业的重要研究课题。超超临界机组作为当前最先进的燃煤发电技术之一，其对冲燃烧锅炉在高效发电的同时，也面临着如何进一步降低NO_x排放的挑战。传统的低氮燃烧技术，如空气分级燃烧、燃料分级燃烧以及低NO_x燃烧器的应用，虽然在一定程度上降低了NO_x排放，但仍存在燃烧效率低、调节灵活性不足等问题^[1]。因此，探索新的优化方法，以实现超超临界机组对冲燃烧锅炉的低氮高效燃烧，具有重要的理论和现实意义。

近年来，随着计算机技术和优化算法的不断发展，基于数据驱动的智能优化方法逐渐应用于燃煤锅炉的燃烧优化中。其中，贪心算法作为一种简单有效的启发式搜索算法，在解决复杂优化问题时展现出良好的性能^[2]。然而，传统的贪心算法在处理多目标优化问题时，往往容易陷入局部最优解，难以满足实际应用的需求。因此，对贪心算法进行改进，以适用于超超临界机组对冲燃烧锅炉的低氮燃烧优化，成为本研究的核心内容。

本研究旨在通过引入改进贪心算法，实现超超临界机组对冲燃烧锅炉低氮燃烧优化。

建立超超临界机组对冲燃烧锅炉燃烧模型

超超临界机组对冲燃烧锅炉的燃烧过程是一个复杂的物理化学过程，涉及燃料燃烧、热量传递、流体动力学以及污染物生成等多个方面^[3]。为了准确描述这一过程，需要建立包含质量守恒、能量守恒和动量守恒的燃烧模型。燃料燃烧过程中，质量守恒方程描述了燃料、空气和燃烧产物之间的质量平衡关系。对于燃烧区域内的任意控制体积，质量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中， ρ 为气体密度； $\mathbf{u}$ 为速度矢量； t 为时间。

该方程表明，控制体积内质量的变化率等于流入与流出控制体积的质量流率之差。能量守恒方程描述了燃烧过程中热量的产生与传递。对于燃烧区域内的控制体积，能量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h \quad (2)$$

式中， h 为比焓； λ 为热导率； T 为温度； S_h 为热源项，即燃烧释放的热量。

该方程表明，控制体积内能量的变化率等于热量传导与燃烧释放热量的总和^[4]。动量守恒方程描述了燃烧过程中气体的流动特性。对于燃烧区域内

的控制体积，动量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (3)$$

式中， p 为压力； τ 为应力张量； g 为重力加速度。

该方程表明，控制体积内动量的变化率等于压力梯度、黏性力和重力的总和。NO_x的生成主要与燃烧温度、氧气浓度和燃料氮含量有关^[5]。NO_x生成速率可通过扩展的Zeldovich机制描述

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = k_1[\text{N}_2][\text{O}] + k_2[\text{N}_2][\text{O}_2] - k_3[\text{NO}][\text{N}] \quad (4)$$

式中， k_1 ， k_2 ， k_3 为反应速率常数； $[\text{N}_2]$ ， $[\text{O}]$ ， $[\text{N}_2]$ ， $[\text{O}_2]$ ， $[\text{NO}]$ ， $[\text{N}]$ 分别为各组分的摩尔浓度。该模型为后续低氮燃烧优化提供了理论基础。通过上述方程，可以建立超超临界机组对冲燃烧锅炉的燃烧模型，为后续优化提供理论支持。

基于改进贪心算法的机组运行关键参数调优

在超超临界机组对冲燃烧锅炉的运行过程中，关键参数的调优对于提高锅炉效率和降低NO_x排放至关重要。贪心算法作为一种局部最优选择策略，可以应用于机组运行参数的调优^[6]。但传统的贪心算法会陷入局部最优解，因此需要对贪心算法进行改进，以寻求全局最优解。

改进贪心算法的思路是：在每一步选择时，不仅考虑当前步骤的局部最优解，还要考虑对后续步骤的影响。具体来说，可以引入一个评价函数，用于评估每一步选择对后续步骤的潜在影响^[7]。评价函数可以基于NO_x排放、锅炉效率和排烟温度等多个指标进行综合评估。其核心思想是在每一步选择当前最优的局部解，逐步逼近全局最优解^[8]。优化目标为在保证锅炉效率的前提下，降低NO_x排放。目标函数可定义为

$$f(x) = w_1 \cdot \text{NO}_x(x) + w_2 \cdot (1 - \eta(x)) \quad (5)$$

式中， x 表示优化变量（如燃烧器旋流强度、分级送风比例、燃尽风量等）； $\text{NO}_x(x)$ 表示NO_x排放浓度； $\eta(x)$ 为锅炉效率； w_1 、 w_2 为权重系数，满足 $w_1 + w_2 = 1$ 。改进贪心算法通过邻域搜索策略寻找局部最优解。对于当前解 x_k ，其邻域解 x_{k+1} 可表示为

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x \quad (6)$$

式中， Δx 为优化变量的调整量。通过评估邻域解的目标函数值，选择使目标函数最小的解作为下一步

的当前解。优化过程通过迭代逐步逼近最优解。在第 k 次迭代中，优化变量的更新规则为

$$x_{k+1} = \arg \min_{x \in N(x_k)} f(x) \quad (7)$$

式中， $N(x_k)$ 为当前解的邻域集合。

迭代过程直至满足收敛条件（如目标函数变化量小于阈值或达到最大迭代次数）。通过改进贪心算法，可以有效调优机组运行关键参数，为低氮燃烧优化提供基础。

锅炉低氮燃烧优化

基于改进贪心算法的优化结果，进一步针对锅炉的低氮燃烧开展优化工作，重点在于确保降低NO_x排放的同时维持锅炉效率。

1) 燃烧器旋流强度优化。燃烧器旋流强度直接影响燃烧区域的湍流混合程度和燃烧温度^[9]。旋流强度 S 与NO_x生成的关系可表示为

$$\text{NO}_x \propto S^\alpha \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

式中， α 为经验系数； E_a 为活化能； R 为气体常数； T 为燃烧温度。

通过调整旋流强度，可以控制燃烧温度，从而降低NO_x生成。

2) 分级送风比例优化：分级送风比例 r 影响燃烧区域的氧气浓度分布。分级送风比例与NO_x生成的关系可表示为

$$\text{NO}_x \propto \frac{1}{1 + r^\beta} \quad (9)$$

式中， β 为经验系数。

通过优化分级送风比例，可以降低燃烧区域的氧气浓度，从而抑制NO_x生成。

3) 燃尽风量优化。燃尽风量 Q 影响燃烧后期的氧气补充和燃烧完全性。燃尽风量与NO_x生成的关系可表示为

$$\text{NO}_x \propto Q^\gamma \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (10)$$

式中， γ 为经验系数。

通过优化燃尽风量，可以进一步降低NO_x排放。通过改进贪心算法的优化，锅炉的NO_x排放浓度显著降低，锅炉效率有所提高。

除此之外，还可引入烟气再循环（FGR）技术，进一步提高优化效果，降低NO_x的排放。烟

气再循环技术通过将锅炉尾部的一部分低温烟气重新引入燃烧区,降低燃烧区的温度和氧浓度,从而减少热力型NO_x的生成。在锅炉尾部烟道设置烟气抽取口,通过风机将一定比例的低温烟气抽出。抽取的烟气量应根据锅炉负荷和NO_x排放目标进行调节^[10]。设计不锈钢材质的烟气再循环管道,确保烟气在输送过程中不凝结、不腐蚀。管道应设置必要的保温措施,以减少热量损失。在燃烧器入口前设置烟气混合装置,将再循环烟气与助燃空气充分混合,确保烟气均匀分布进入燃烧区。在锅炉启动和负荷变化时,应适时调整烟气再循环量,以维持稳定的燃烧和NO_x排放水平。在实际应用中,应当定期检查烟气再循环系统的运行状态,包括风机、管道、混合装置等,确保其正常工作。

优化对比实验

1. 实验环境

实验在某一大型火力发电厂的超超临界机组上进行,该机组的锅炉为对冲燃烧锅炉,额定蒸发量为2 650 t/h,主蒸汽压力为27.46 MPa,主蒸汽温度为605 ℃,再热蒸汽温度为603 ℃。锅炉采用低氮燃烧技术,配备有分级送风系统和燃尽风系统。图1为该超超临界机组及所处运行环境。



图1 超超临界机组及所处运行环境

实验对象为锅炉的燃烧系统,包括燃烧器、分级送风系统和燃尽风系统。燃烧器采用旋流燃烧器,分级送风系统将二次风分为内二次风和外二次风,燃尽风系统将部分二次风从燃烧器上部喷入炉膛。

2. 实验数据

实验过程中,通过调整燃烧器的旋流强度、分级送风比例和燃尽风量,优化锅炉的燃烧工况,

降低NO_x排放。在该运行环境中完成此次对比实验,实验过程中,机组的负荷保持在85%~100%之间,燃用煤种为烟煤,其工业分析和元素分析见表1。

表1 煤质分析

序号	项目	数值
(1)	收到基碳 Car	58.32%
(2)	收到基氢 Har	3.45%
(3)	收到基氧 Oar	6.78%
(4)	收到基氮 Nar	1.12%
(5)	收到基硫 Sar	0.68%
(6)	收到基灰分 Aar	19.65%
(7)	收到基水分 Mar	10.00%
(8)	干燥无灰基挥发分 Vdaf	28.50%
(9)	低位发热量 Qnet,ar	23.45 MJ/kg

实验数据采集系统包括锅炉运行参数采集系统、烟气成分分析系统和数据存储系统。锅炉运行参数采集系统实时采集锅炉的蒸汽流量、蒸汽压力、蒸汽温度、给水流量、给水温度、排烟温度和烟气氧量等参数;烟气成分分析系统采用在线烟气分析仪,实时监测烟气中的NO_x、CO、O₂等成分的浓度;数据存储系统将采集到的数据存储在数据库中,以便后续分析。

3. 实验结果

分别对比机组优化前后NO_x排放浓度和排烟温度。将优化前后各项指标记录,为方便比较,将优化前后对比结果绘制成图2。

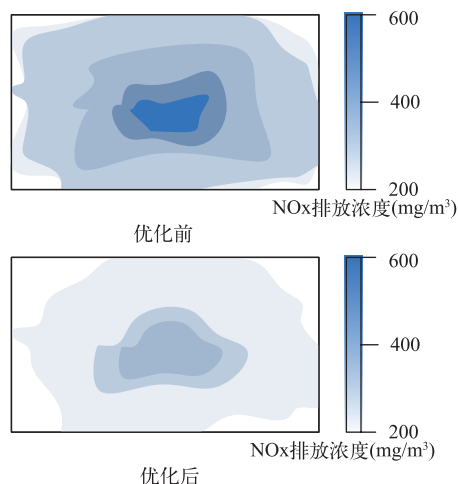


图2 优化前后NO_x排放浓度

在进行NO_x排放浓度的对比分析时,获取了在

相同水平切面上NO_x排放浓度的分布图谱，具体如图2所示。通过详尽的数据解读，可以明确观察到，在实施优化措施之前，锅炉的NO_x排放浓度维持在450 mg/m³（以标准状态、干基、且含6% O₂为基准）。而经过一系列针对性的优化调整之后，NO_x排放浓度显著降低至320 mg/m³，实现了28.9%的大幅下降。这一数据变化不仅直观地体现了优化措施的有效性，也进一步证明了所采取的策略在降低NO_x排放方面的显著成效。



图3 优化前后排烟温度

通过观察图3所展示的数据对比结果，可以清晰地看出，在实施优化措施之前，排烟口位置的温度高达136 °C。而经过采用本文提出的基于改进贪心算法的超超临界机组对冲燃烧锅炉低氮燃烧优化方法进行调整后，排烟口温度显著降低至125 °C，实现了11 °C的温度降幅。这一显著的温度变化不仅验证所提优化方法的有效性，而且进一步证明该方法在降低排烟温度、提升锅炉热效率以及减少氮氧化物排放方面的可行性和实用性。具体而言，优化过程中通过精细调控燃烧参数，有效改善炉膛内的燃烧状况，减少不完全燃烧损失，从而实现排烟温度的降低和锅炉整体性能的提升。因此，本研究提出的基于改进贪心算法的低氮燃烧优化方法，为超超临界机组对冲燃烧锅炉的高效、环保运行提供有力的技术支撑。

结束语

本研究通过基于改进贪心算法的超超临界机组对冲燃烧锅炉低氮燃烧优化，成功实现锅炉燃烧参数的多目标优化。通过对改进贪心算法的应用和验证，本研究进一步证明该算法在复杂燃烧系统优化中的适用性和有效性。未来，随着算法的不断优化

和完善，以及燃煤锅炉燃烧机理的深入研究，基于数据驱动的智能优化方法将在燃煤锅炉的燃烧优化中发挥更加重要的作用。同时，本研究也为其他类型的燃煤锅炉燃烧优化提供有益的参考和借鉴，为推动燃煤发电技术的持续进步和绿色发展做出积极贡献。EA

（收稿日期：2025-02-19）

参考文献

- [1] 刘晓杰，徐顺生，孔润娟，等．基于后燃烧技术的CFB锅炉低氮燃烧数值模拟[J]．过程工程学报，2024，24(8)：914-925．
- [2] 贾昕昕，刁永发．二次风平行射流参数对污泥焚烧流化床锅炉低氮燃烧特性影响研究[J]．锅炉技术，2023，54(5)：17-23．
- [3] 王宁泽，李芳芹，潘卫国，等．燃煤锅炉氨煤混燃技术的研究进展[J]．化工环保，2024，44(3)：345-352．
- [4] 张群力，周钊宇，张金亮，等．助燃空气加湿对燃气锅炉低氮燃烧性能的影响[J]．化学工程，2024，52(4)：1-6．
- [5] 崔强，张振鲁，李洪瑞．670 MW对冲旋流燃烧锅炉防高温腐蚀试验研究[J]．热能动力工程，2023，38(6)：182-188．
- [6] 田继林，朱建国，朱书骏，等．60 t/h煤粉预热燃烧锅炉宽负荷运行特性研究[J]．热力发电，2024，53(4)：133-140．
- [7] 陆婷，田鑫．武钢有限热能电站锅炉烟气净化工艺选择与应用[J]．工业安全与环保，2023，49(9)：70-73．
- [8] 丁皓轩，李松山，唐文，等．对冲燃烧锅炉两侧主蒸汽温度偏差的预测模型及问题诊断[J]．锅炉技术，2024，55(2)：32-38．
- [9] 周科，刘明显，陈胜军，等．超超临界1 000 MW机组锅炉燃尽风对炉膛内燃烧及NO_x生成特性的影响[J]．热力发电，2023，52(9)：138-146．
- [10] 马金荣，孟庆松，王建江，等．纯烧准东煤循环流化床锅炉变工况运行特性试验研究[J]．锅炉技术，2024，55(3)：36-40．