

# 基于动态标杆值的电站锅炉燃烧控制优化

廖彭伟

(中国大唐集团科学技术研究院有限公司中南电力试验研究院,河南 郑州 450000)

**摘要:**目前锅炉燃烧控制主要依靠人工手动调整,为解决运行经验差异导致锅炉燃烧性能差异的问题,提出了一种基于动态标杆值的电站锅炉燃烧控制优化方法。在建立燃烧模型的基础上,以归一化经济与环保指标得到综合效益因子作为寻优判据,对历史工况进行数据挖掘,实现全工况下基于动态标杆值的运行参数自主寻优和更新,使锅炉燃烧、污染物排放相互协调。该方法已于某燃煤电站成功实践,结果表明:在应用案例中,寻优推送后综合效益因子提高了4.34%,使得锅炉热效率和 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度相互协调更优。

**关键词:**动态标杆值;燃烧优化;锅炉热效率; $\text{NO}_x$ 排放质量浓度

中图分类号:M621.2 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.05.014

[引用本文格式]廖彭伟.基于动态标杆值的电站锅炉燃烧控制优化[J].热能动力工程,2023,38(5):111-116. LIAO Peng-wei. Combustion control optimization of power plant boiler based on dynamic benchmark values[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5):111-116.

## Combustion Control Optimization of Power Plant Boiler based on Dynamic Benchmark Values

LIAO Peng-wei

(Datang Central South Electric Power Test Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou, China, Post Code:450000)

**Abstract:** At present, boiler combustion control mainly relies on manual adjustment by personnel. In order to solve the problem of differences in boiler combustion performance caused by differences in operating experience, a combustion control optimization method of power plant boiler based on dynamic benchmark values is proposed. On the basis of establishing the combustion model, the comprehensive benefit factor is obtained by normalizing the economic and environmental targets as the optimization criterion. Data mining is carried out on historical working conditions, and the operation parameters based on dynamic benchmark values can be optimized and updated independently under all working conditions, so that boiler combustion and pollutant emission are coordinated mutually. The method has been successfully practiced in a coal-fired power station. The results show that in the application case, the comprehensive benefit factor has increased by 4.34% after the optimization push, which makes the thermal efficiency of the boiler and the mass concentration of  $\text{NO}_x$  emission more coordinated with each other.

**Key words:** dynamic benchmark values, combustion optimization, boiler thermal efficiency, mass concentration of  $\text{NO}_x$  emission

# 引 言

近几年,在碳达峰、碳中和目标背景下,我国大力推动煤炭、煤电节能降碳改造、灵活性改造、供热改造“三改联动”,煤电面临清洁低碳化、深调灵活化、功能多元化和智慧能源化改造技术的挑战<sup>[1]</sup>。提高机组效率、寻求最佳经济运行方式已迫在眉睫。此外,火力发电过程中大量煤炭的燃烧会产生大气污染物,主要包括烟尘、SO<sub>2</sub>和 NO<sub>x</sub> 等,有效地降低污染物排放也是火电厂必须要解决的问题<sup>[2]</sup>。

火电企业生产过程中会产生海量的运行数据,包括机组运行调整参数、工质参数和设备状态参数等信息,但尚未得到有效利用。为提高锅炉热效率、降低污染物排放,多年来有许多学者进行了燃烧智能优化相关研究。张国斌等人<sup>[3]</sup>和郑伟等人<sup>[4]</sup>设计了一种基于数据挖掘案例推理的电站锅炉燃烧优化系统,采用改进的模糊减法聚类算法确定分类数,以模糊 C 均值算法建立初始案例库,通过目标寻优约简案例库。牛培峰等人<sup>[5]</sup>提出了样本增量量子神经网络和改进型量子蜂群算法,建立燃煤锅炉的 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度和锅炉煤耗的综合模型,优化一/二次风量、燃煤量和各二次风门开度。刘瑞东等人<sup>[6]</sup>在以负荷、气温划分二维区间的基础上,进一步根据

锅炉热效率较高和 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度较低的相对优化的气温区间的运行特性构造了 3 种锅炉燃烧优化控制规律。文献[7-9]基于神经网络模型、约束支持向量回归算法和遗传算法等建立锅炉热效率和 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度预测模型,指导锅炉燃烧优化。

本文提出将归一化经济与环保指标得到的综合效益因子作为寻优判据,挖掘海量历史运行数据,建立包含不同工况最优运行方式的标杆库,实时采集机组运行参数,进行数据清洗、稳态判定和约束判定等处理,基于动态标杆值实现在线自主寻优和更新,得到最佳操作量,如锅炉氧量、二次风门开度、一次风压等,用于指导机组运行人员进行燃烧调整。设计的标杆值寻优推送与标杆值更新的闭环逻辑可以实现新成果固化,做到持续优化和完善标杆库,使锅炉燃烧、污染物排放相互协调。

## 1 系统构成

### 1.1 数据架构

锅炉燃烧优化算法已于某燃煤电站成功实践,作为外部第三方模块部署在机组智能控制平台(Intelligent Control System, ICS)上,与集控室分散控制系统(Distributed Control System, DCS)通过时序数据库与关系数据库进行数据交互。燃烧控制优化数据架构如图 1 所示。

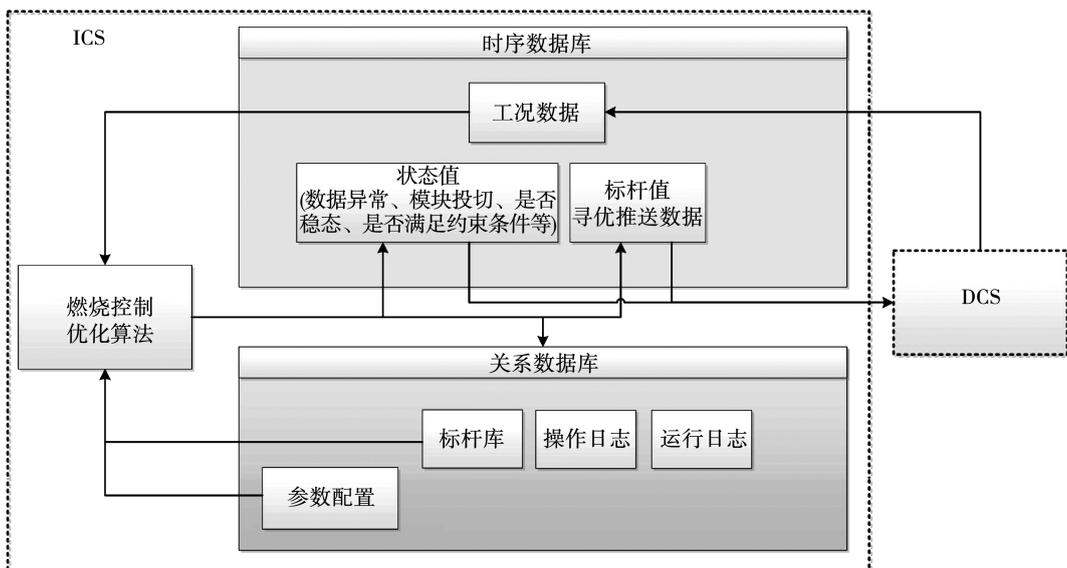


图 1 燃烧控制优化数据架构

Fig. 1 Data framework of combustion control optimization

由图1可知,DCS向时序数据库传送工况数据,ICS上部署的燃烧控制优化算法从时序数据库中获取工况数据、从关系数据库中获取参数配置及标杆库等信息,经过运算后向时序数据库中写入状态值、标杆值寻优推送数据等计算结果供DCS调取展示,同时在关系数据库中写入操作日志、运行日志或更新标杆库。

## 1.2 功能组成

燃烧控制优化数据架构以燃烧控制优化算法为核心,具有标杆库初始化、基于动态标杆值的寻优推送与更新等功能,配套搭建相关数据库。主要内容如下:

(1) 标杆库初始化:建立空白标杆库以及历史数据挖掘。

(2) 基于动态标杆值的寻优推送与更新:实时采集锅炉运行数据进行计算,根据燃煤发热量、机组负荷、环境温度和磨煤机运行组合方式等边界条件找出近似工况并推送动态标杆值。不断通过寻优判据对锅炉燃烧的经济性与环保性等进行在线综合评价,若对比后评价更优,则将此工况认定为新的标杆值并更新至标杆库。

(3) 相关数据库:存储工况数据、标杆库、运行/操作日志以及参数配置等信息,允许增、删、改、查。

## 2 计算模型

### 2.1 简化燃烧模型

电站锅炉的燃烧过程是一个复杂的化学反应过程,具有多输入、多输出、强耦合、多干扰、大滞后等特点,针对燃烧控制优化建立下述简化模型,包括:燃烧工况划分方式、寻优操作量和寻优判据。

以燃煤发热量  $Q_{\text{net}}$ 、机组负荷  $L$ 、环境温度  $t_a$  和磨煤机运行组合方式  $[m_A, m_B, m_C, m_D, m_E, m_F]$  (1表示磨煤机运行,0表示磨煤机停运)等表征锅炉燃烧状态的关键参数作为边界条件,用以区分锅炉不同燃烧工况。影响锅炉热效率  $\eta$  和  $\text{NO}_x$  排放质量浓度  $\beta$  的主要调整变量有锅炉氧量  $\text{O}_2$ 、一次风压  $p$ 、二次风门开度  $\theta_{\text{sec},i}$  (表示燃烧器第  $i$  层二次风门开度) 和二次风角风箱开度  $\theta_{\text{cor},j}$  (表示二次风角风箱  $j$  挡板开度),作为寻优操作量。归一化经济与环保指标得到的综合效益因子  $\varphi$  作为寻优判据。

### 2.2 控制优化模型

#### 2.2.1 标杆库结构

考虑不同机组负荷下磨煤机运行组合方式不同,划分超低负荷、低负荷、中负荷和高负荷工况不

同负荷段,分级建立锅炉不同燃烧工况标杆库网络。设定燃煤发热量、机组负荷和环境温度的起始值/步长/区间序号分别为  $Q_0/\Delta Q/N_1, L_0/\Delta L/N_2$  和  $t_{a,0}/\Delta t_a/N_3$ ,则不同燃烧工况可划分为  $\{[Q_0 + (N_1 - 1) \cdot \Delta Q, Q_0 + N_1 \cdot \Delta Q], [L_0 + (N_2 - 1) \cdot \Delta L, L_0 + N_2 \cdot \Delta L], [t_{a,0} + (N_3 - 1) \cdot \Delta t_a, t_{a,0} + N_3 \cdot \Delta t_a], [0/1, 0/1, 0/1, 0/1, 0/1, 0/1], N_1, N_2, N_3, = 1, 2, 3, \dots\}$ ,对应锅炉氧量、一次风压、各层二次风门开度和二次风角风箱开度标杆值为  $\{[\text{O}_2, p, \theta_{\text{sec},i}, \theta_{\text{cor},j}], i, j = 1, 2, 3, \dots\}$ 。

#### 2.2.2 数据清洗

电站锅炉配置有众多测点,这些测点分布在锅炉系统的不同位置,用以测量锅炉各项运行参数的在线值。当测点出现非正常干扰、损坏等异常情况时,数据所记录的内容将不能正常反映机组当前的工作情况,比如出现缺失值、不合理的负值、噪声值等,利用电站锅炉数据具有时间连续性的特点可以较好地处理离散分布<sup>[10]</sup>,对获取到的工况数据进行校验、修正,清洗后得到符合质量要求的数据。

#### 2.2.3 稳态判定

在机组升/降负荷、汽水参数调整、风门调整和煤质变化等非稳态过程中往往伴随着锅炉热效率及  $\text{NO}_x$  排放质量浓度等参数的大幅波动,不能准确反映机组的真实特性,因此需要区分稳态与非稳态工况,采用不同的算法流程。

选取燃煤发热量  $Q_{\text{net}}$ 、机组负荷  $L$ 、主汽压力  $p_{\text{mstm}}$ 、主汽温度  $t_{\text{mstm}}$ 、再热汽温  $t_{\text{rstm}}$ 、锅炉氧量  $\text{O}_2$ 、二次风门开度  $\theta_{\text{sec},i}$ 、炉膛负压  $p_{\text{th}}$  等可以表征锅炉稳态运行的参数作为稳态因子。采用式(1)对各稳态因子分别进行判定,当所有稳态因子均满足判断条件时,认为工况稳态。

$$\sigma_t = \left| x_t - \frac{1}{T} \sum_{\tau=t-T+1}^t x_\tau \right| < \sigma_x \quad (1)$$

式中: $t, \tau$ —当前时刻、选取历史区间内的某一时刻; $s; x_t, x_\tau$ —燃煤发热量在  $t, \tau$  时刻的值,  $\text{kJ/kg}$ ;  $T$ —稳态判断选取的历史时间长度,  $s$ ;  $\sigma_t$ —燃煤发热量在  $t$  时刻与近一段时间的偏差,  $\text{kJ/kg}$ ;  $\sigma_x$ —燃煤发热量稳态判定阈值,  $\text{kJ/kg}$ 。

#### 2.2.4 约束判定

机组运行过程中,在考虑经济性、环保性和安全性的同时,其各项运行参数指标应满足设计要求,保障机组处于良好状态。燃烧控制优化约束判定条件如表1所示。当约束参数不满足约束判据的时候,应当及时进行运行调整,使参数回归正常。

表 1 约束判定条件  
Tab. 1 Judgment conditions of restrictions

参数	约束判据
各段水冷壁、各级过热器和各级再热器的壁温 $t_{\text{pipe}}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{pipe}} < t_{\text{alarm}}$ , $t_{\text{alarm}}$ 为各换热器壁温报警值
主汽压力 $p_{\text{mstm}}/\text{MPa}$	与设计滑压曲线的差值在 $\pm \Delta p_{\text{mstm}}$ 之间
主汽温度 $t_{\text{mstm}}/^\circ\text{C}$	与设计主汽温度差值在 $\pm \Delta t_{\text{mstm}}$ 之间
再热汽温 $t_{\text{rstm}}/^\circ\text{C}$	与设计再热汽温差值在 $\pm \Delta t_{\text{rstm}}$ 之间
$\text{NO}_x$ 排放质量浓度 $\beta/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\beta < \beta_{\text{alarm}}$ , $\beta_{\text{alarm}}$ 为 $\text{NO}_x$ 排放质量浓度高限值
再热器减温水流量 $Q_{\text{DH}}/\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	与设计再热器减温水流量差值在 $\pm \Delta Q_{\text{DH}}$ 之间
给水温度 $t_{\text{rW}}/^\circ\text{C}$	与设计给水温度差值在 $\pm \Delta t_{\text{rW}}$ 之间

2.2.5 寻优推送

由于锅炉燃烧热效率和  $\text{NO}_x$  排放质量浓度之间存在强耦合性,因此在锅炉燃烧优化过程中同时得到很高的锅炉热效率和很低的  $\text{NO}_x$  排放质量浓度较为困难。采用由归一化经济与环保指标得到的综合效益因子作为寻优判据,对锅炉热效率和  $\text{NO}_x$  排放质量浓度同时进行优化,用以评价锅炉燃烧优劣:

$$\varphi = \left[ \frac{\lambda(\beta_{\text{max}} - \beta)}{\beta_{\text{max}} - \beta_{\text{min}}} + \frac{(1 - \lambda)(\eta - \eta_{\text{min}})}{\eta_{\text{max}} - \eta_{\text{min}}} \right] \times 100 \quad (2)$$

式中: $\varphi$ —综合效益因子,% ; $\lambda$ —技术指标权值, $0 < \lambda < 1$ ;  $\beta_{\text{max}}, \beta_{\text{min}}$ —历史稳态工况下  $\text{NO}_x$  排放质量浓度的最大值和最小值,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $\eta_{\text{max}}, \eta_{\text{min}}$ —历史稳态工况下锅炉热效率的最大值和最小值,%。

燃烧控制优化简要流程如图 2 所示。

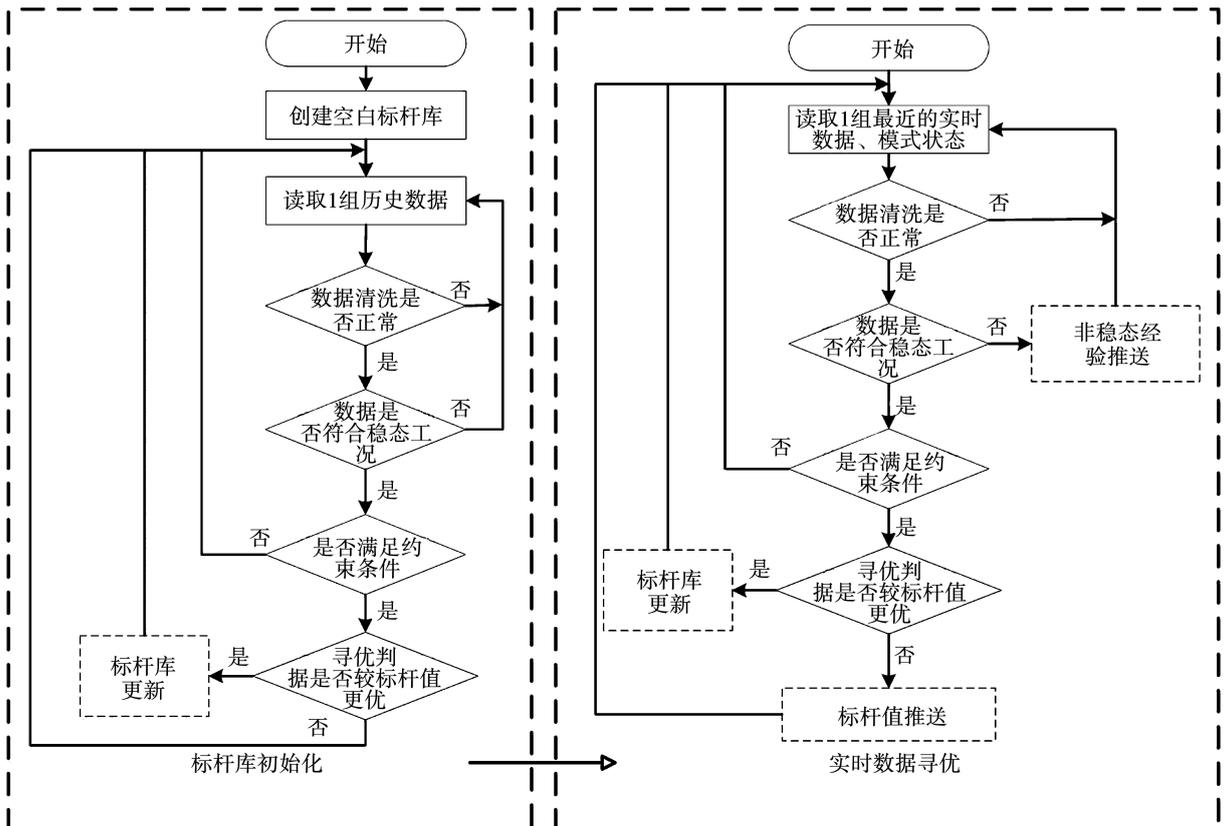


图 2 燃烧控制优化简要流程图

Fig. 2 Brief flowchart of combustion control optimization

首先建立空白标杆库,并对历史数据进行挖掘,初始化标杆库。在采用实时数据寻优时,读取锅炉燃烧的实时运行数据及模式状态,依次进行数据清洗、稳态判定、约束判定。当判定燃烧处于非稳态工况时,执行非稳态经验推送。此时调取以机组负荷和磨煤机运行组合方式为边界条件的若干标杆库网格,取其中寻优操作量的均值作为标杆值进行推送。当判定燃烧处于稳态工况且满足约束条件时,与寻优判据进行比较,若实时综合效益因子优于标杆值,执行标杆库更新,否则执行标杆值推送。此时调取以燃煤发热量、机组负荷、环境温度和磨煤机运行组合方式为边界条件的唯一标杆库网格,取寻优操作量标杆值进行推送。

通过燃烧控制优化在全工况下实现在线燃烧寻优和标杆值自主更新,动态推送标杆值得到锅炉氧量、二次风门开度、一次风压等最佳操作量,且设计

的闭环逻辑可以实现新成果固化,持续优化和完善标杆库。

### 3 应用结果与分析

#### 3.1 标杆库示例

基于动态标杆值的电站锅炉燃烧控制优化算法已应用于某燃煤机组,该锅炉配套6台中速磨煤机,引、送、一次风机各2台,燃烧器共设9层周界风、12层辅助风室和6层附加燃尽风共27层(编号1~27),8个角风箱入口调节挡板(编号1~8)用于调整运行参数。

燃烧控制优化算法的非稳态经验推送、标杆库更新和标杆值推送等主要功能运行状态良好、效果明显。在锅炉不同燃烧工况下对寻优操作量进行历史数据挖掘及采用实时数据在线寻优,部分标杆库数据如表2所示。

表2 部分标杆库数据

Tab. 2 Partial data of benchmark library

$Q_{\text{net}}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$L/\text{MW}$	$t_a/^\circ\text{C}$	$[m_A, m_B, m_C, m_D, m_E, m_F]$	$\text{O}_2/\%$	$p/\text{kPa}$	$\theta_{\text{sec},1}/\%$	$\theta_{\text{cor},1}/\%$	$\eta/\%$	$\beta/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
18 721	506	30	[0,0,1,1,1,1]	5.46	9.05	5	100	93.13	407.9
17 818	710	22	[0,1,1,1,1,1]	4.34	9.83	10	100	92.43	313.1
18 995	957	21	[1,1,1,1,1,1]	2.99	10.72	70	100	92.28	274.3
18 321	865	34	[1,1,1,1,1,1]	3.70	10.65	20	100	93.81	319.6
19 036	560	26	[0,0,1,1,1,1]	4.85	9.41	0	70	93.42	355.2
17 865	827	36	[0,1,1,1,1,1]	4.83	10.70	10	85	93.52	352.4
21 067	605	33	[0,0,1,1,1,1]	4.83	9.13	5	75	93.72	333.8
16 929	716	14	[0,1,1,1,1,1]	4.46	9.78	0	100	91.97	330.1

#### 3.2 寻优推送调整结果

取  $Q_0 = 10\ 000\ \text{kJ}/\text{kg}$ 、 $\Delta Q = 1\ 000\ \text{kJ}/\text{kg}$ 、 $L_0 = 275\ \text{MW}$ 、 $\Delta L = 50\ \text{MW}$ 、 $t_{a,0} = -15\ ^\circ\text{C}$ 、 $\Delta t_a = 5\ ^\circ\text{C}$ 、 $\lambda = 0.5$ 、 $\beta_{\text{max}} = 500\ \text{mg}/\text{m}^3$ 、 $\beta_{\text{min}} = 200\ \text{mg}/\text{m}^3$ 、 $\eta_{\text{max}} = 95\%$ 、 $\eta_{\text{min}} = 85\%$ ,此时入炉煤燃煤发热量为  $19\ 081\ \text{kJ}/\text{kg}$ ,机组负荷  $810\ \text{MW}$ ,环境温度  $28\ ^\circ\text{C}$ ,B/C/D/E/F5台磨煤机运行, $\text{NO}_x$ 排放质量浓度实时值为  $337.4\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,锅炉热效率实时值为  $93.05\%$ 。

根据控制优化模型建立的锅炉燃烧工况标杆库网格,此时  $N_1 = 10$ 、 $N_2 = 11$ 、 $N_3 = 9$ ,当前锅炉燃烧工况可表示为  $\{[19\ 000, 20\ 000]\ [775, 825]\ [25, 30]\ [0, 1, 1, 1, 1, 1]\}$ ,依此查找标杆库数据可得  $\text{NO}_x$

排放质量浓度标杆值为  $297.0\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,锅炉热效率标杆值为  $93.07\%$ 。由式(2)计算得到综合效益因子实时值与标杆值分别为  $67.35\%$ 和  $74.18\%$ 。

经数据清洗、稳态判定和约束判定后发现,锅炉实时综合效益因子小于标杆值,执行标杆值推送,部分寻优操作量实时值与标杆值比对见表3。依照推送的动态标杆值进行燃烧调整,当寻优操作量实时值与标杆值一致且锅炉运行参数稳定后,得到调整后锅炉热效率为  $93.07\%$ , $\text{NO}_x$ 排放质量浓度为  $311.9\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,经过计算综合效益因子为  $71.69\%$ 。寻优推送调整前后指标比对如表4所示。由表4可知,锅炉各项热损失变化较小,锅炉热效率基本不变,而  $\text{NO}_x$ 排放质量浓度降低  $25.5\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,综合效益因子较寻优推送调整前提高了  $4.34\%$ 。

表 3 部分寻优操作量实时值与标杆值对比/%

Tab.3 Comparison of real-time and benchmark values of partial optimization operating parameters (%)

参数	实时值	标杆值
O <sub>2</sub>	4.19	3.93
$\theta_{sec,3}$	10	5
$\theta_{sec,4}$	30	10
$\theta_{sec,5}$	35	30
$\theta_{sec,8}$	35	30
$\theta_{sec,10}$	35	30
$\theta_{cor,1}$	90	100
$\theta_{cor,5}$	90	100

表 4 寻优推送调整后指标对比

Tab.4 Comparison of indicators before and after optimization push adjustment

参数	调整前	调整后
排烟热损失 $q_2/\%$	5.70	5.71
气体未完全燃烧热损失 $q_3/\%$	0.16	0.15
固体未完全燃烧热损失 $q_4/\%$	0.54	0.52
锅炉散热损失 $q_5/\%$	0.37	0.37
灰渣物理显热损失 $q_6/\%$	0.18	0.18
锅炉热效率 $\eta/\%$	93.05	93.07
NO <sub>x</sub> 排放质量浓度 $\beta/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	337.40	311.90
综合效益因子 $\varphi/\%$	67.35	71.69

## 4 结 论

(1) 基于动态标杆值对实时参数进行数据清洗、稳态判定和约束判定,实现了全工况下在线燃烧寻优,使锅炉燃烧、污染物排放相互协调,辅助指导运行人员进行燃烧调整,减少燃烧调整的随意性,降低运行人员的劳动强度。同时,标杆值自主更新实现了新成果固化,做到持续优化和完善标杆库。

(2) 某机组的实践案例表明,所设计的燃烧控制优化算法将综合效益因子提高 4.34%,使锅炉热效率和 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度相互协调更优。

(3) 下一步的研究将结合机组热工组态逻辑,探索设计燃烧寻优参数的 DCS 闭环调整方案,最终实现锅炉燃烧调节的智能自动控制。

### 参考文献:

[1] 杜冬梅,曹冬惠,何青.“双碳”目标下我国电力行业低碳转型的思路探讨[J/OL]. 热力发电(2022-05-31)[2022-08-08]. <https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202204074>.  
DU Dong-mei, CAO Dong-hui, HE Qing. Discussion on low-carbon transformation of China's power industry under the "double-carbon" goal[J/OL]. Thermal Power Generation(2022-05-31)[2022-08-08]. <https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202204074>.

[2] 崔明,左明,宋伟.火电企业大气污染物排放对环境危害及减排对策[J].科技与企业,2016(2):93,95.  
CUI Ming, ZUO Ming, SONG Wei. Environmental hazards and emission reduction countermeasures of air pollutant emissions from thermal power enterprises[J]. Science-Technology and Enterprise, 2016(2):93,95.

[3] 张国斌,张光明,刘永江,等.基于数据挖掘案例推理的电站锅炉燃烧优化[J].热能动力工程,2021,36(3):114-121.  
ZHANG Guo-bin, ZHANG Guang-ming, LIU Yong-jiang, et al. Combustion optimization of power plant boilers based on data mining case reasoning[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(3):114-121.

[4] 郑伟,刘达.基于全工况数据挖掘的多目标燃烧优化[J].热力发电,2017,46(6):69-74.  
ZHENG Wei, LIU Da. Multi-objective combustion optimization based on data mining with full-scale working condition[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(6):69-74.

[5] 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(2):163-170.  
NIU Pei-feng, MA Yun-peng, ZHANG Xin-xin, et al. Research and application on combustion optimization of coal-fired boiler in thermal power plant based on artificial intelligence technology[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019(2):163-170.

[6] 刘瑞东,王志,周远科,等.根据气温对锅炉运行的影响构造闭环燃烧优化控制的试验研究[J].节能技术,2022,40(2):99-104.  
LIU Rui-dong, WANG Zhi, ZHOU Yuan-ke, et al. Experimental study on closed-loop combustion optimization control based on the influence of air temperature on boiler operation[J]. Energy Conservation Technology, 2022, 40(2):99-104.

[7] 余廷芳,耿平,霍二光,等.基于智能算法的燃煤电站锅炉燃烧优化[J].动力工程学报,2016,36(8):594-599,607.  
YU Ting-fang, GENG Ping, HUO Er-guang, et al. Combustion optimization of a coal-fired boiler based on intelligent algorithm[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(8):594-599,607.

[8] 闫水保,冯灿,齐继鹏,等.基于约束支持向量回归的电站锅炉燃烧优化建模[J].热能动力工程,2021,36(11):126-132.  
YAN Shui-bao, FENG Can, QI Ji-peng, et al. Combustion optimization modeling of boiler in power plant based on constrain support vector regression[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11):126-132.

[9] 牛鹏坤,洪辉,王炜哲.基于改进遗传算法的电站锅炉效率优化[J].热能动力工程,2020,35(3):111-115.  
NIU Peng-kun, HONG Hui, WANG Wei-zhe. Optimization of boiler combustion efficiency based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3):111-115.

[10] 张尚志.基于数据挖掘的电站锅炉低氮燃烧优化研究[D].武汉:华中科技大学,2016.  
ZHANG Shang-zhi. Research on optimization of low NO<sub>x</sub> combustion in coal-fired boiler basing on data mining[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2016. (刘颖 编辑)