

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.032

基于 SIP-PCA 方法的锅炉燃烧 NO_x 排放故障检测分析

薛晓峰¹, 潘喜良¹, 戴海鹏¹, 游联欢¹, 徐俊¹, 李峰²

(1. 华能罗源发电有限责任公司, 福建 福州 350602;

2. 福州大学 机械工程与自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要: 火电厂 NO_x 生成是动态的且多个参数之间存在着交互作用, 难以保证全部过程参数都服从正态分布特点。为此设计一种基于 SIP-PCA 方法的锅炉燃烧 NO_x 排放故障检测方法。采用熵提取方式进行处理时通用性更强, 能够实现非高斯数据的精确描述, 利用 SIP 来表达重构误差。研究结果表明: 火电厂 NO_x 排放因子变化趋势并未呈现出显著的钟摆型特点, 采用 SIP 方法对主成分分析方法进行修正, 使其能够获取更多参考数据。随着燃烧强度和气流速度的增加, 炉膛中形成了更高温度, 生成大量高温 NO_x。在 3 种工况下 NO_x 排放量依次提高了 5.50%、5.58%、4.49%, 采用 SIP-PCA 方法可实现系统的故障诊断。该研究有助于提高锅炉燃烧质量, 为后续的锅炉自动化推进奠定一定的理论基础。

关键词: 火电厂; 锅炉; NO_x 排放; 主成分分析; 故障检测

中图分类号: TM621.2 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2026)03-0166-04

Fault Detection and Analysis of NO_x Emissions from Boiler Combustion Based on the SIP-PCA Method

XUE Xiaofeng¹, PAN Xiliang¹, DAI Haipeng¹, YOU Lianhuan¹, XU Jun¹, LI Feng²

(1. Huaneng Luoyuan Power Generation Co., Ltd., Fuzhou 350602, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The generation of NO_x in thermal power plants is a dynamic process involving interactions among multiple parameters, making it difficult to ensure that all process parameters follow a normal distribution. To address this issue, a fault detection method for boiler combustion NO_x emissions based on the SIP-PCA method is proposed. The use of entropy extraction enhances the method's generality, enabling accurate description of non-Gaussian data, while SIP is employed to express reconstruction errors. The results indicate that the trend of NO_x emission factors in thermal power plants does not exhibit a significant pendulum-like characteristic. By modifying the principal component analysis method with the SIP approach, more reference data can be obtained. As combustion intensity and airflow velocity increase, higher temperatures are formed in the furnace, leading to the generation of substantial amounts of thermal NO_x. Under three different operating conditions, NO_x emissions increased by 5.50%, 5.58%, and 4.49%, respectively. The SIP-PCA method can effectively achieve system fault diagnosis. This study contributes to improving boiler combustion quality and provides a theoretical foundation for the subsequent advancement of boiler automation.

Keywords: thermal power plant; boiler; NO_x emissions; principal component analysis; fault detection

0 引言

当前, 我国发电方式仍以燃煤为主, 其能源消耗巨大, 同时还会排放各种污染废气^[1]。通过分析前期研究报道可知, 我国火电厂产生的氮氧化物(NO_x)排放量约占全国氮氧化物排放总量的40%。从实际生产过程来看, 由于燃煤发电过程本身存在一定的误差, 因此很难用模型进行精确判断^[2]。当系统出现故障时, 氮氧化物的排放量

也会增加。一般情况下, 结垢量随着工作时间逐渐累积, 当达到某一临界值时便会导致检测器准确度的下降^[3-4]。

王勇强等^[5]使用 ANN 建立仿真模型来分析燃煤锅炉内的燃烧反应过程以及氮氧化物生成情况。郭永谦^[6]通过建立一个简单的神经网络模型, 研究燃料在不同工况下的能量转化形式, 以此达到降低 NO_x 排放的目的。随着支持向量回归(support vector regression, SVR)技术水平的不断

第一作者简介: 薛晓峰(1978—), 男, 福建福州人, 高级工程师, 本科, 研究方向为电气工程及其自动化, xxfenghu@163.com。

提升,现有的研究工作大多采用 SVR 来进行 NO_x 的数值模拟研究。朱清智等^[7]提出差分子灰狼算法优化无迹卡尔曼滤波的预测模型,所提算法比其它仿生算法在优化无迹卡尔曼滤波预测 NO_x 模型中有更好的预测精度,对火电厂系统 NO_x 预测提供有效解决方法。殷喆等^[8]利用不可调参数分布将锅炉运行参数模糊均值聚类划分,利用粒子群算法对各工况所属于模型的可调参数进行寻优来实现 NO_x 排放的优化,经过粒子群算法参数优化后 NO_x 排放降低了 10%。

SVR 算法具有良好的非线性处理能力,比人工神经网络具备更优模型计算能力。利用极限学习机的高效计算与泛化性强的优点,建立了 NO_x 释放过程中的微观机制仿真模型,最终达到了准确解析的目的^[9]。NO_x 的生成是一个动态的以及多个参数之间存在着交互作用的过程,难以保证全部过程参数都服从正态分布特点。本文利用生存信息势 - 主成分分析 (survival information potential-principal component analysis, SIP-PCA) 方法对电厂 NO_x 的生成进行模型预测,并完成了系统的故障诊断分析。

1 SIP-PCA 准则的建立

建立下述 IP-PCA 表达式

$$V_{\alpha}(X) = \int_{-\infty}^{\infty} p_X^{\alpha}(x) dx \quad (1)$$

以生存函数计算时得到更优适用性的 SIP 指标。

建立如下 SIP-PCA 准则^[10]

$$S_{\alpha}(X) = \int_{\mathbb{R}^n} \bar{F}_{|X|}^{\alpha}(x) dx \quad (2)$$

在 SIP 准则基础上开发优化 PCA 算法,形成非高斯特征的故障信号时,能够达到准确检测的效果,应保证下述重构误差趋于 0。

$$E = X - UV = X - UU^T X = [e_1, e_2, \dots, e_n] \quad (3)$$

由于数据 X 呈现高斯分布的特点,导致重构误差 E 也形成了非高斯形态的特点。相对协方差特征的提取模式,采用熵提取方式进行处理时通用性更强,能够实现非高斯数据的精确描述。利用 SIP 来表达重构误差。

处理约束极小化算法时,建立如下 SIP-PCA 算式^[11]

$$\begin{cases} \min J = \min S_{\alpha}(e) \\ \hat{S}_{\alpha}(e) = \int_{\mathbb{R}^n} \bar{F}_{|e|}^{\alpha}(x) dx = \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(e_i > x) \right)^{\alpha} dx = \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n^{\alpha}} \int_{\mathbb{R}^n} \sum_{j=1, \dots, j_{\alpha}=1}^n (I(e_{j1} > x) \times \dots \times I(e_{j_{\alpha}} > x)) dx = \\ & \frac{1}{n^{\alpha}} \sum_{j=1, \dots, j_{\alpha}=1}^n \left(\prod_{i=1}^n \min(e_{i,j1}, \dots, e_{i,j_{\alpha}}) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

之后利用拉格朗日乘子算法对以上设置了约束条件的最小化求解过程进行转换得到无约束条件的优化问题

$$J_H = \hat{S}_{\alpha}(e) + Tr \Lambda (U^T U - I) \quad (5)$$

通过梯度下降算法确定未知参数 U

$$\begin{cases} U_{k+1} = U_k - \mu \frac{\partial J_H}{\partial U} \\ \Lambda_{k+1} = \Lambda_k - \eta \frac{\partial J_H}{\partial \Lambda} \end{cases} \quad (6)$$

2 故障检测方案

通过 SIP-PCA 作为故障检测处理流程如图 1 所示。

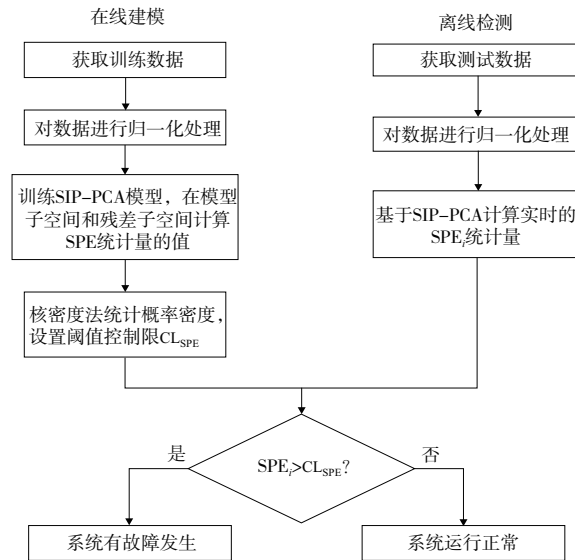


图 1 基于 SIP-PCA 的故障检测流程图

建立以下检测步骤: 1) 设置离线模型: a) 对正常运行过程的历史数据进行采集; b) 归一化各变量历史数据; c) 经过归一化计算后, 再根据 SIP 准则建立 SIP-PCA 模型, 以此消除不同变量的相互影响; d) 计算 SPE 统计结果。2) 测试在线故障: a) 对统计结果投影后再将数据输入 SIP-PCA 模型, 防止测试变量对多元统计结果产生影响; b) 实时计算 SPE 统计结果; c) 当 SPE 的任何一个统计量超过控制限后, 对异常状态开展深入研究。

3 火电厂 NO_x 排放故障检测

3.1 火电厂 NO_x 排放过程

本研究选择 660 MW 燃料型锅炉作为测试对象,将导管安装在竖膜部位。为每面墙都安装了一个具有斜面结构的喷火器。通过一次风把煤粉送入炉膛中,最终将残余的气体也引入到锅炉中^[12],保证锅炉中燃油在燃烧过程中能够得到充足的氧气,从而实现稳定的燃烧效果。锅炉示意图如图 2 所示。

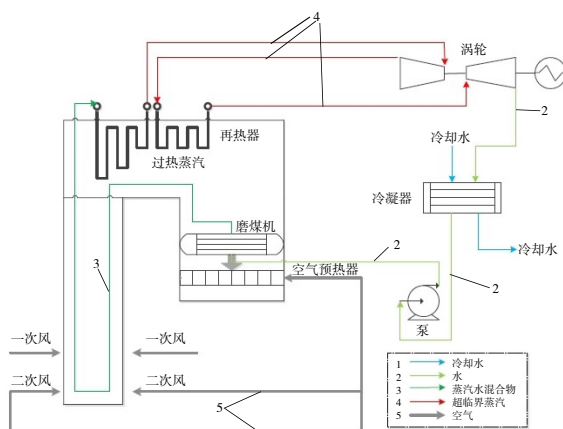


图 2 锅炉示意图

进行实际处理的过程中,控制合适煤粉比的条件下,通过调节排烟阀形状和倾斜角的方式来控制燃烧温度。为了使煤炭形成完全燃烧的状态,应在煤炭燃烧过程中通入充足空气。但也需注意,当吸入的气体太多,则会带走更多热能,反而造成大量能源损耗。而当过剩空气流量不足时,既不能确保燃煤的有效利用,又会导致锅炉中氧气含量过低而生成大量 NO_x。如果只凭氮氧化物的排放量来判定监控的效果,则不能完全保证实时性。

在实际操作中,很难确保 NO_x 的生成控制效果满足以上假定条件。3 个变量对应的概率变化结果如图 3 所示。水平轴表示变量值,垂直轴表示概率分布。研究表明,各因子的变化趋势并未呈现出显著的钟摆型特点,且与平均指数间也未呈现对称结构。针对上述问题,本文采用常规主成分分析的方法并未达到理想的结果,且形成了较大的误差。为了提高氮氧化物浓度监控的准确性,本文采用 SIP 方法对主成分分析方法进行了修正,使其能够获取更多参考数据。

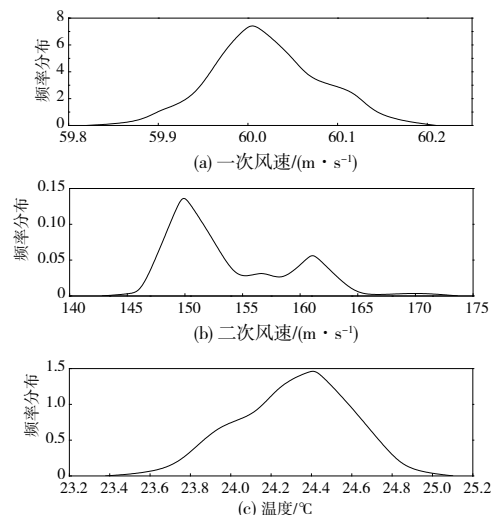


图 3 3 个过程变量的 PDFs

3.2 故障检测

对电站锅炉 NO_x 排放量进行标准化预处理,得到了一个满足实际评价需求的神经网络模型。分别建立了 3 个不同的失效模型来评估本文算法的故障检测效果。故障状态描述如表 1 所示。

表 1 故障状态描述

模型	故障描述
FN ₁	执行器故障
FN ₂	一次风速引起故障
FN ₃	二次风速引起故障

由于煤炭中包含了大量的有机组分和挥发性物质,这些成分受到高温氧化作用后,将会分解与氧化,从而形成了燃烧阶段的放热过程。通过取样获得的各种故障运行条件下形成的 NO_x 排放量如图 4 所示。据此分析了不同失效因子对 NO_x 产生的影响。

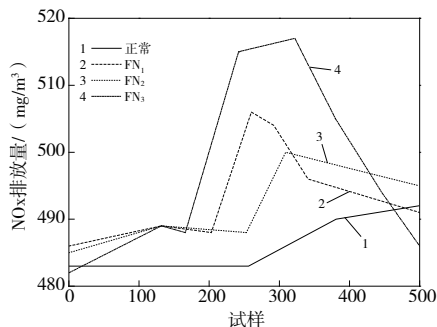


图 4 NO_x 排放统计曲线

在 FN₁ 调节方式下,如果出现调节阀堵塞的

情况,则送煤量将会增大,从而形成了更多包含挥发成分的有机氮化物,进一步加剧了 NO_x 的生成。随着供煤量的提高,炉膛内会产生高温燃烧表面和尾烟,在这种情况下,燃烧产物中的 NO_x 浓度也明显升高。

无论采用 FN₂ 还是 FN₃ 进行调节,一次空气已能够提供足够的氧,当一次、二次空气流量增大后,供氧量也随之增加。结果显示,随着燃烧强度增加后,炉膛中形成了更高温度,生成了大量的高温 NO_x。随着气流速度的增加,炉膛中氧气含量增加,易发生有机氮向 NO_x 的转化,从而提高了煤粉燃烧的 NO_x 比例。

增大风速会产生较大的预期误差,从而使 T2 统计量升高。以 SPE 进行统计时,其发生失效时的 NO_x 释放模式也具有较大的区别,由此得到的 SPE 的统计特征也具有较大差异。NO_x 排放故障结果统计如表 2 所示。

表 2 NO_x 排放故障结果统计 单位: %

参数	FN ₁		FN ₂		FN ₃	
	T2	SPE	T2	SPE	T2	SPE
FAR	1.5	3.1	1.4	3.2	1.5	2.9
MDR	48.5	0.6	2.8	2.3	0	0.1

通过对 3 种工况的监控测试发现,在 3 种工况下的 NO_x 排放量依次提高了 5.50%、5.58%、4.49%。故障出现在 250 个采样点处,NO_x 的释放趋于平稳状态。在监测过程参数的时候,不需要考虑成本控制问题,采用 SIP-PCA 方法可实现系统的故障诊断。

不同故障识别的结果如图 5 所示,分别看到 FN₁、FN₂、FN₃ 的对应变量。进行故障辨识时,能够更早确定影响 NO_x 生成量增加的因素,确保 NO_x 一直处于规定排放区间内。

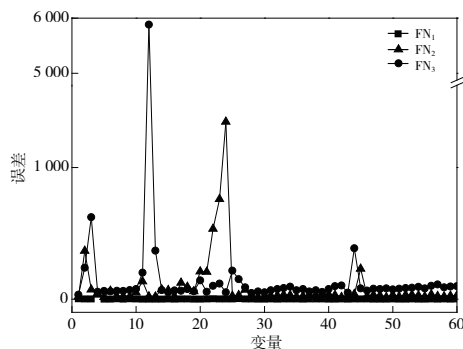


图 5 3 种故障识别结果

4 结语

本文开展基于 SIP-PCA 算法的火电厂 NO_x 排放故障检测分析,取得如下结果:

1) 火电厂 NO_x 排放因子变化趋势并未呈现出显著的钟摆型特点,采用 SIP 方法对主成分分析方法进行了修正,使其能够获取更多参考数据。

2) 随着燃烧强度和气流速度的增加,炉膛中形成了更高温度,生成大量高温 NO_x。在 3 种工况下 NO_x 排放量依次提高了 5.50%、5.58%、4.49%,采用 SIP-PCA 方法可实现系统的故障诊断。

参考文献:

- [1] 谢尉扬,朱宝,祝相云,等. 火力发电机组凝汽器抽真空系统节能改造优选方案研究[J]. 热力发电,2020,49(4):114-118.
- [2] 汪鑫,陈钧,范卫东. 燃煤电站锅炉掺氨燃烧与排放特性综述[J]. 洁净煤技术,2022,28(8):25-34.
- [3] 张珑慧,林德海,王颖,等. 机器学习在火电厂 NO_x 减排中的应用综述[J]. 热力发电,2023,52(1):7-17.
- [4] 贾彦兵,周托,王志宁,等. 工业可燃废气再燃低 NO_x 排放实验研究及工程应用[J]. 煤炭转化,2022,45(3):80-86.
- [5] 王勇强,周月桂,韩佳宸. 贫煤空气分级燃烧 NO_x 排放特性试验研究[J]. 热力发电,2021,50(11):61-67.
- [6] 郭永谦. 基于运行数据的锅炉故障自动检测技术研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(4):237-240.
- [7] 朱清智,屈保中,董泽. 火电厂燃煤锅炉 NO_x 排放预测模型优化设计[J]. 计算机仿真,2023,40(7):89-93,104.
- [8] 殷喆,杨春来,袁晓磊,等. 基于模糊聚类的 NO_x 排放多模型预测优化[J]. 热力发电,2022,51(4):105-111.
- [9] 程港,林小峰,宋绍剑,等. 基于 PCA-GA-ELM 的光伏发电功率预测研究[J]. 可再生能源,2019,37(10):1440-1447.
- [10] 张云钦,程起泽,蒋文杰,等. 基于 EMD-PCA-LSTM 的光伏功率预测模型[J]. 太阳能学报,2021,42(9):62-69.
- [11] 晁垚,金倩如,申黎明,等. 一种基于体压分布和 PCA-BP 神经网络模型的办公椅舒适度测定方法[J]. 林业工程学报,2021,6(5):183-190.
- [12] 文武,万玉辉,张许红,等. 基于改进 CHI 和 PCA 的文本特征选择[J]. 计算机工程与科学,2021,43(9):1645-1652.

收稿日期:2024-01-08