

循环流化床锅炉参数波动多维关联抑制策略研究

介予濠

河南理工大学, 河南 焦作 454003

摘要: 循环流化床锅炉作为重要的清洁燃烧技术, 在实际运行中面临床温、蒸汽压力等关键参数波动问题, 严重影响燃烧效率和系统稳定性。本文构建了床温-蒸汽压力参数多维关联模型, 揭示了参数间的耦合关系与波动传递机制。研究采用机理分析与数据驱动相结合的方法, 建立了涵盖人员、设备材料、管理、技术、环境五大类的参数关联网络。基于多维关联理论, 设计了床温参数波动抑制策略和蒸汽压力稳定性优化方法, 开发了燃料特性波动检测、负荷变化维持和多维协调控制等综合控制方案。工程应用结果表明: 床温标准差降低 40%, 蒸汽压力波动减小 35%, 燃烧效率提高 0.5-1.0 个百分点, NO_x 排放降低 18%。该研究为循环流化床锅炉的稳定运行提供了理论基础和技术支撑, 对提升电力系统调峰能力具有重要意义。

关键词: 循环流化床锅炉; 参数波动; 多维关联; 协同控制; 稳定性优化

DOI: 10.63887/fet.2025.1.3.1

引言

循环流化床锅炉技术作为高效清洁燃烧技术, 在工业生产领域应用广泛。全球循环流化床锅炉装机容量年均增长 8%, 国内年增长率达 12%^[1]。该技术具有燃料适应性广、燃烧效率高、脱硫脱硝能力强等优点, 已成为能源结构调整的重要技术支撑^[2]。

然而, 在实际运行过程中, 床温、蒸汽压力等关键工艺参数常表现出不同程度的波动, 直接影响燃烧效率、热能转换效率及设备稳定性。研究表明, 床温波动超过 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 时, 燃烧效率降低 3%-5%; 蒸汽压力波动超过额定值的 $\pm 3\%$ 时, 汽轮机效率下降 1.5%-2.5%^[3]。典型 300MW 机组统计数据显示, 参数波动导致的年均能源浪费约为标准煤 1.2 万吨^[4]。

现有研究多关注单一参数分析, 对关键参数间的耦合关系研究不足, 难以深入揭示参数波动间的传递机制^[5]。传统控制策略主要针对稳态工况设计, 对燃料特性变化、负荷波动等实际扰动因素的多参数协同优化研究有限。因

此, 构建参数波动抑制的协同优化策略, 对循环流化床锅炉持续稳定生产具有重要意义。

1 研究方法

1.1 参数波动数据分析方法

采用时域分析、频域分析和相关性分析相结合的方法, 研究参数波动特性^[5]。时域分析关注参数随时间变化特性, 通过统计床温、蒸汽压力等关键参数的波动范围、标准差等指标评估系统稳定性^[6]。频域分析从波动频率角度识别周期性干扰源和系统固有振荡特性^[7]。相关性分析用于揭示参数间内在联系, 建立参数关联网络。

数据预处理采用异常值处理、平滑滤波、归一化处理和时间同步等方法^[8]。异常值处理针对传感器故障、通信中断等原因导致的数据异常, 分为突变型、漂移型和卡滞型三类。数据平滑处理采用加权移动平均法, 既保留负荷变化引起的温度波动趋势, 又有效抑制高频噪声^[9]。

1.2 多维关联模型构建方法

基于机理分析与数据驱动相结合的方法建立多维关联模型。采用改进型 Hammerstein-Wiener 结构的模型，由非线性静态块和线性动态块组成，能够同时捕捉系统非线性特性和动态特性。模型基本结构为：

$$u(k) \rightarrow f_1[\cdot] \rightarrow v(k) \rightarrow G(z^{-1}) \rightarrow w(k) \rightarrow f_2[\cdot] \rightarrow y(k)$$

其中 $u(k)$ 为输入向量， $y(k)$ 为输出向量， f_1 和 f_2 为非线性映射函数， $G(z^{-1})$ 为线性传递函数。

1.3 波动抑制策略设计

基于多维关联理论，设计包含燃料特性波动检测、负荷变化维持和多维协调控制的综合控制方案^[10]。燃料特性波动检测采用软测量技术，通过关键参数间接监测燃料特性变化。负荷变化维持策略采用前馈-反馈结合的控制方法，预测负荷变化对参数的影响并提前补偿^[11]。多维协调控制机制通过解耦补偿算法识别变量间相互影响并消除干扰。

2 循环流化床参数波动特性分析

2.1 关键参数波动特性

通过对循环流化床锅炉长期运行数据分析，发现床温波动呈现多尺度特性：小幅高频波动（ $\pm 5^\circ\text{C}$ ，周期 5-10 分钟）主要源于给煤系统波动；中等幅度波动（ $\pm 10^\circ\text{C}$ ，周期 0.5-2 小时）多与负荷变化和控制系统调节有关；大幅低频波动（ $\pm 15^\circ\text{C}$ 以上，周期数小时）主要受燃料特性变化影响。

蒸汽压力波动表现出明显的滞后性和负荷相关性，通常滞后于床温变化 3-8 分钟。高负荷下波动率控制在 $\pm 1.5\%$ 内，低负荷下可达 $\pm 3\%$ 以上。数据分析显示，床温标准差每增加 5°C ，锅炉热效率平均下降 0.8 个百分点。

2.2 参数关联网络构建

基于相关性分析构建参数关联网络，识别了三条主要波动传递路径：燃料特性→给煤量→床温→蒸汽参数；风量→循环率→床温分布→传热效率；负荷变化→多参数协同变化→系统响应。

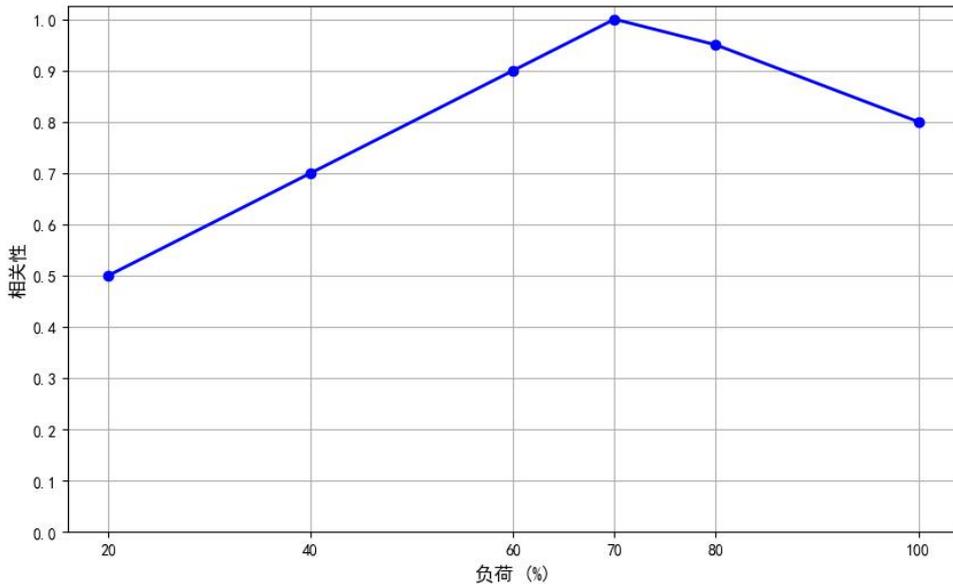


图 1 床温与蒸汽压力相关性随负荷变化图

不同环节表现出不同的波动传递特性，有些环节表现为“放大效应”，如低负荷工况下

床温对给煤波动的响应；有些环节则表现为“衰减效应”，如水循环系统对床温波动的缓

冲。

燃料特性变化是参数波动的主要外部扰动源。当燃料热值标准差超过设计值 10%时，床温标准差增加约 40%，蒸汽压力标准差增加约 30%。负荷变化引起的系统动态响应表现出阶段性和滞后性，变化率控制在 3%/分钟内时参数波动基本可控。设备运行状态也是重要影响因素，给煤系统导致的床温波动占 35%-45%，风机系统占 20%-30%。

3 多维关联模型与波动抑制策略

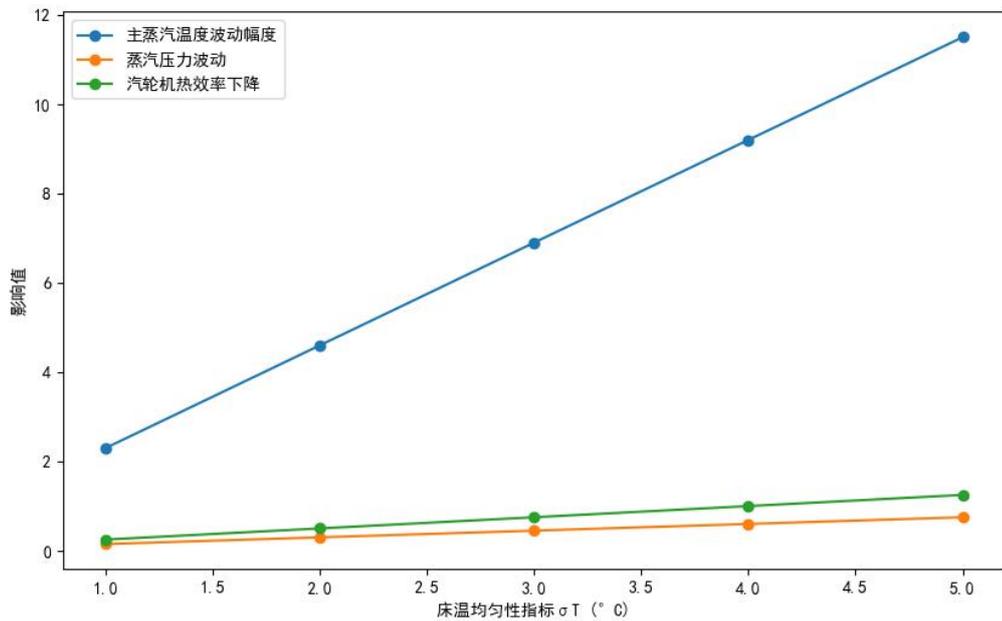


图 2 床温均匀性指标 σT 对系统关键参数的影响

床温均匀性指标 σT 每增加 1° C，主蒸汽温度波动幅度平均增加约 2.3° C，蒸汽压力波动增约 0.15MPa，直接导致汽轮机热效率下降 0.2%-0.5%。

3.2 床温波动抑制策略

3.1 床温-蒸汽压力多维关联建模

建立了床温与蒸汽压力的动态关联模型，床温波动引起的热量变化通过水冷壁传给工质，最终影响蒸汽参数。考虑传热延迟因素，床温变化到蒸汽压力变化的动态过程可用一阶加时滞模型表示：

$$G(s) = K / (Ts+1) \cdot e^{-\tau s}$$

其中 K 为增益系数，T 为时间常数， τ 为纯延迟时间。

基于多维关联模型，设计了床温-给煤量-风量多变量关联控制策略。该策略包含三个层次：基础控制层负责各单回路控制，保证基本稳定性；协调控制层处理变量间交互影响，实现多变量协调控制；优化管理层根据运行目标动态优化控制策略。

表1 多维关联模型与传统模型性能对比

评价指标	传统单变量模型	多维关联模型	改进幅度 (%)
床温预测均方误差 (° C)	8.6±1.2	3.2±0.5	62.8
床温标准差 (° C)	12.5±1.8	7.5±0.9	40.0
蒸汽压力波动 (MPa)	0.34±0.05	0.22±0.03	35.3
控制调节次数 (次/小时)	24.5±3.6	14.2±2.1	42.0

针对燃料特性波动，开发了软测量检测技术，通过余热锅炉出口氧量、床温梯度等间接指标实时监测燃料特性变化。当检测到燃料热值降低时，系统自动增加给煤量并调整风量配比；当检测到燃料水分增加时，系统调整一次风温和风量，保证床温稳定。

3.3 蒸汽压力波动抑制优化

针对蒸汽压力波动，设计了基于模糊逻辑的自适应控制方法和多变量协同优化策略。模糊控制器输入变量包括压力偏差、偏差变化率和负荷值，输出变量为控制增量。规则库包含147条规则，覆盖各种可能的系统状态组合。

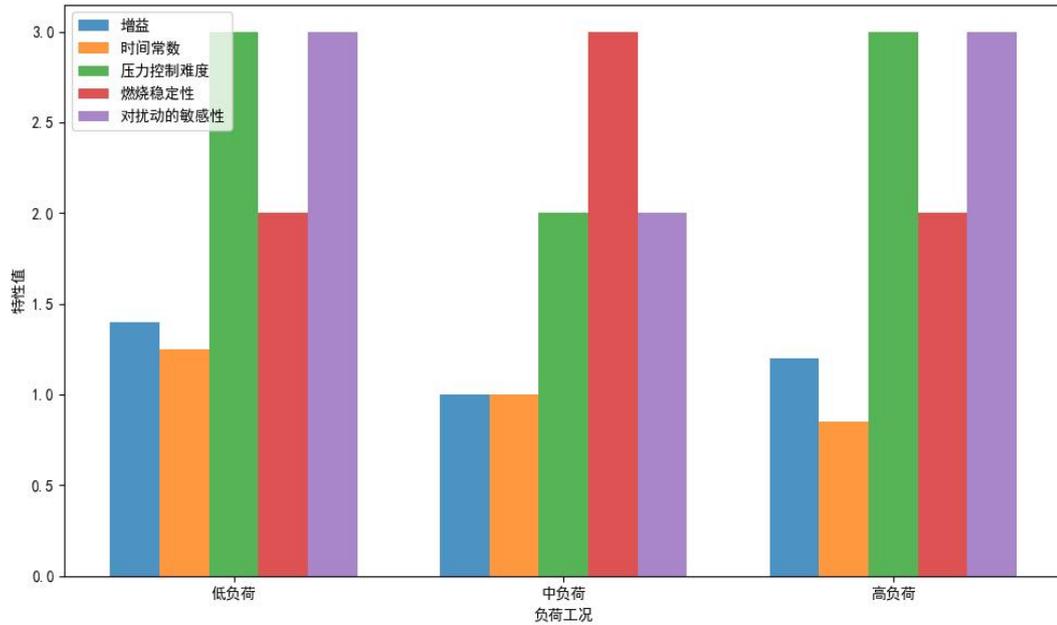


图3 不同负荷工况下的系统特性

低负荷工况下系统增益高、时间常数大，压力控制难度增加。中负荷工况下系统特性相对稳定，控制效果最佳。高负荷工况下系统响应快，但受干扰因素影响更显著。

开发了多情景生产策略选择方法，采用模糊聚类算法将运行工况分为多个情景类别，根据当前系统状态自动选择最适合的控制策略。与固定策略相比，该方法将压力波动幅度降低约45%，调节时间缩短约35%。

4 工程应用与效果分析

以某300MW超临界循环流化床锅炉为例进行工程实施。该机组主要参数为：锅炉蒸发量960t/h，主蒸汽压力26.15MPa，燃料为褐煤，收到基低位发热量13.8-17.5MJ/kg。实施前床温标准差为12.5°C，蒸汽压力标准差为0.38MPa。

床温稳定性提高直接导致燃烧效率提高0.85个百分点，热效率提高0.62个百分点，每年可节约标煤约1.5万吨。蒸汽压力稳定性提高改善了汽轮机运行状态，汽轮机热效率提高0.38个百分点，年增发电量约850万kWh。

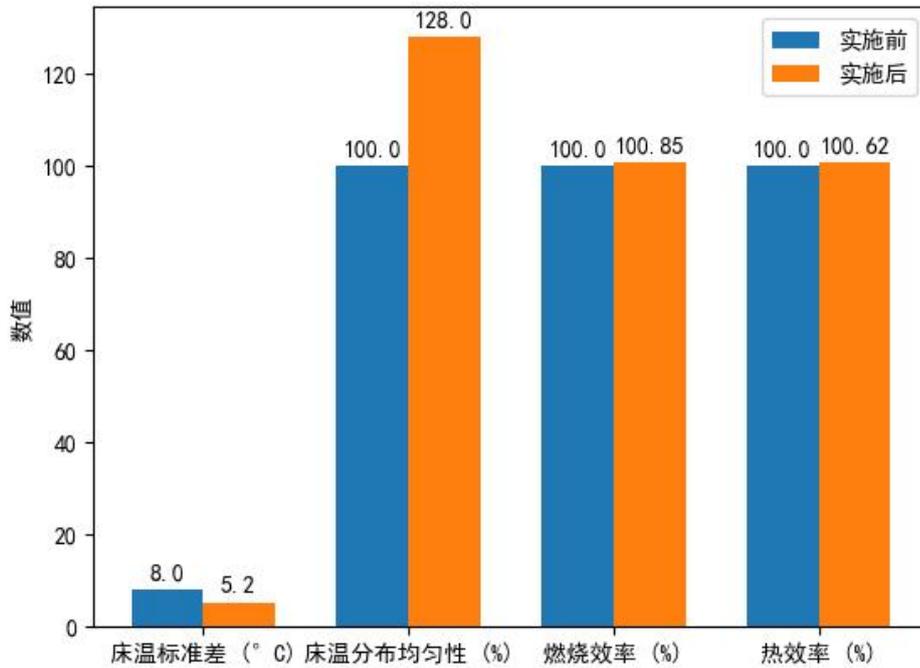


图4 实施前后数据对比

结束语

本文针对循环流化床锅炉参数波动问题，构建了多维关联抑制策略，取得以下主要结论：（1）系统分析揭示了床温、蒸汽压力等关键参数波动的多尺度特性，建立了参数关联网络，识别出三条主要波动传递路径。建立了床温-蒸汽压力多维关联模型，采用改进型 Hammerstein-Wiener 结构，相比传统单变量模型在预测精度和控制稳定性方面显著提升。（2）设计了基于多维关联的参数波动抑制策略，包

括燃料特性波动检测、负荷变化维持和多维协调控制机制，开发了基于模糊逻辑的自适应控制方法和多情景策略选择方法。（3）工程应用结果表明，该优化方案使床温标准差降低40%，蒸汽压力波动减小35%，燃烧效率提高0.5-1.0个百分点，NO_x排放降低18%，年节约标煤2.6万吨，创造经济效益约2400万元。本研究为循环流化床锅炉稳定运行提供了理论基础和技术支撑，对提升电力系统调峰能力具有重要意义。

参考文献

- [1]岳光溪, 吕俊复, 徐鹏, 等. CFB 燃烧技术燃料适应性广的理论基础[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 1-12.
- [2]李建军, 魏金江, 郭庆华, 等. 350MW 超临界循环流化床锅炉联合脱硝技术研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(4): 156-162.
- [3]张开萍, 吴创之, 卢啸风, 等. 生物质循环流化床锅炉床温动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 36-39.
- [4]周霞, 李政, 张学俊, 等. 热电联产机组与蒸汽压缩储热系统耦合技术方案[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 43-51.
- [5]张西容, 刘德昌, 王永征, 等. 超临界循环流化床锅炉水冷壁热偏差分析[J]. 动力工程学

报, 2020, 40(8): 625-632.

[6]王勇权, 刘德昌, 徐鹏, 等. 基于 CNN-GRU-MHA 的 CFB 机组污染物排放动态预测[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 55-59.

[7]胡仙楠, 吕俊复, 赵长遂, 等. 循环流化床锅炉快速变负荷关键技术分析[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 1-8.

[8]韩诚良, 赵长遂, 胡南, 等. 不同提升管高度的循环流化床数值模拟研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(9): 728-735.

[9]肖红亮, 赵长遂, 张学俊, 等. 机器学习在循环流化床锅炉技术中的应用[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 1-9.

[10]李建军, 魏金江, 郭庆华, 等. 350MW 超临界循环流化床锅炉联合脱硝技术研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(4): 156-162.

[11]刘春, 张缦, 韩志明, 等. 循环流化床锅炉 NO_x 动态排放建模与仿真[J]. 动力工程学报, 2020, 40(6): 456-463.