

# 变工况下燃机电厂余热锅炉动态特性及优化控制策略

詹海家

华电福新广州能源有限公司 广东 广州 511340

**摘要:** 燃机电厂余热锅炉对余热回收利用意义重大, 变工况运行常见且来源多样, 动态特性研究存在诸多难点。本文先阐述余热锅炉系统, 接着进行变工况下动态特性建模与分析, 涵盖建模方法、关键过程建模、仿真平台搭建验证及特性规律总结。随后提出优化控制策略, 分析传统策略局限, 设计先进策略, 构建多目标优化框架, 并通过验证对比表明先进策略在变工况适应性、精度和经济性上更优。

**关键词:** 燃机电厂; 余热锅炉; 变工况; 动态特性

**引言:** 燃机电厂余热锅炉是联合循环机组的关键设备。其实际运行常处于变工况状态, 导致系统呈现强耦合、大滞后等复杂动态特性, 这给精确建模与有效控制带来挑战。为此, 本文通过混合建模方法系统分析其动态特性, 并提出先进的多目标优化控制策略, 以提升机组在变工况下的运行灵活性、经济性与安全性。

## 1 燃机电厂余热锅炉系统概述

### 1.1 余热锅炉结构与工作原理

燃机电厂余热锅炉是回收燃气轮机排气余热的关键设备, 结构含省煤器、蒸发器、过热器、汽包、烟道等, 部分有再热器, 采用模块化设计, 烟道内错列管束利于换热。工作原理: 高温烟气(500-600°C)经烟道依次流经过热器等, 以辐射和对流传热给工质。工质在省煤器预热至饱和温度, 入汽包后经下降管到蒸发器汽化为饱和蒸汽, 再入过热器加热至额定参数, 供汽轮机发电或工业用汽。烟气温度降至100-150°C后经烟囱排放, 实现余热高效利用。

### 1.2 变工况来源

燃机电厂余热锅炉变工况运行常见, 来源有三类。一是电网负荷调整, 用电高峰低谷波动, 调节燃气轮机功率改变机组状态, 使进入余热锅炉的烟气流量和温度变化。二是燃气轮机运行参数波动, 燃料成分、燃烧效率、压气机进口参数变化, 导致排气参数偏离设计值<sup>[1]</sup>。三是设备运行状态变化, 管束积灰结垢改变换热效率, 汽包水位调节等操作引发工况变动, 机组启停时烟气参数和工质流量渐进变化, 使余热锅炉长期非设计工况运行。

### 1.3 动态特性研究难点

燃机电厂余热锅炉动态特性研究难点多。一是多变量强耦合, 烟气与工质侧参数相互影响, 复杂耦合难拆分单一变量影响规律。二是相变过程动态滞后显著, 工质在蒸发器相变有热惯性, 烟气参数变化后蒸汽响应滞

后数十秒至数分钟, 且滞后时间随负荷变。三是变工况范围广、边界条件复杂, 机组负荷范围大, 不同负荷下换热系数等差异大, 外部因素波动加大参数波动。四是测试数据获取难, 实际机组变工况下难系统测试, 极端工况测试影响安全, 数据不完整难精准建模。

## 2 变工况下余热锅炉动态特性建模与分析

### 2.1 数学建模方法

变工况下余热锅炉动态特性数学建模方法主要分为机理建模、数据驱动建模及混合建模三类。机理建模基于热工流体力学和热力学基本定律, 通过建立烟气侧和工质侧的能量方程、质量方程和动量方程描述动态过程, 需明确管束换热系数计算、相变传热等关键子模型, 该方法物理意义清晰, 可外推至不同工况, 但需精确获取设备结构参数, 建模过程复杂且计算量大。数据驱动建模依托机组运行历史数据, 采用神经网络、支持向量机、随机森林等算法构建输入与输出参数的映射关系, 无需深入掌握内部机理, 建模速度快且适用于复杂耦合系统, 但模型泛化能力受数据质量和数量影响大, 低负荷等数据稀缺工况下精度下降。混合建模结合两者优势, 采用机理模型构建基本框架, 通过数据驱动方法修正换热系数等关键参数或补偿机理模型误差, 既保留物理合理性, 又提升模型精度, 目前已成为主流建模方法, 其中机理-神经网络混合模型在变工况建模中应用最为广泛。

### 2.2 关键动态过程建模

变工况下余热锅炉关键动态过程建模重点覆盖三个核心环节。一是烟气侧传热动态建模, 以烟气流量和温度突变为输入, 基于管束排列形式和烟气流动状态, 采用分段集中参数法将烟道划分为多个控制体, 建立各控制体能量平衡方程, 引入变工况下换热系数修正公式, 精准描述烟气温度沿烟道长度的动态分布规律。二是工质侧相变动态建模, 针对蒸发器内汽液两相流动特点, 采用漂

移流模型描述两相流参数分布,结合汽包水位动态方程,构建水侧预热、汽化及蒸汽升温全过程的质量和能量传递模型,重点考虑相变过程中热惯性对蒸汽产量的滞后影响。三是汽包压力与水位耦合建模,考虑蒸汽负荷变化、给水流量调整对汽包压力的影响,通过压力动态方程关联饱和温度变化,同时建立水位动态方程,引入虚假水位修正机制,解决变工况下负荷突变引发的水位波动建模难题,三个环节建模相互关联,共同构成完整动态过程模型<sup>[2]</sup>。

### 2.3 仿真平台搭建与验证

变工况下余热锅炉仿真平台搭建以MATLAB/Simulink、APROS或STAR-90等热工仿真软件为载体,基于已建立的数学模型进行模块开发。首先构建烟气侧、省煤器、蒸发器、过热器、汽包等核心部件仿真模块,定义各模块输入输出接口,通过管道、阀门等辅助模块实现系统集成,设置负荷调节、参数监测等控制模块,搭建完整闭环仿真系统。平台需具备变工况参数设置功能,可模拟烟气流量、温度阶跃变化、负荷线性调节等典型变工况场景。仿真验证采用静态验证与动态验证相结合的方式,静态验证对比设计工况下仿真值与设计值的偏差,确保稳态精度;动态验证选取机组实际变工况测试数据(如负荷从50%升至100%的升负荷过程),对比仿真曲线与实测曲线的趋势一致性和数值偏差,采用平均绝对误差、均方根误差等指标量化精度,通过修正换热系数计算参数、调整时间常数等方式优化模型,直至动态偏差控制在5%以内,确保平台能准确反映实际动态特性。

### 2.4 动态特性规律总结

通过仿真与实验分析,变工况下余热锅炉动态特性规律可总结为四点。一是烟气参数对工质参数的影响存在明显滞后梯度,烟气温度阶跃变化后,过热器出口蒸汽温度响应最快(滞后10-30秒),蒸发器蒸汽产量响应滞后30-60秒,省煤器出口水温响应最慢(滞后60-120秒),滞后时间随负荷降低而延长。二是负荷变动幅度影响动态响应峰值,相同负荷变化率下,低负荷(10%-40%)工况下蒸汽压力、温度波动峰值比高负荷(70%-100%)工况高15%-25%,且波动衰减时间更长,体现低负荷工况稳定性更差的特点。三是耦合参数存在反向波动现象,如突增负荷时,蒸汽流量瞬间增加导致汽包压力短暂下降,随后因烟气换热增强逐步回升,形成“先降后升”的耦合响应特性。四是积灰结垢会加剧动态滞后,当管束积灰厚度达到1mm时,各工质参数响应滞后时间增加20%-30%,波动幅度增加10%-15%,需在运行中重点关注换热面清洁度对动态特性的影响。

## 3 变工况下余热锅炉优化控制策略

### 3.1 传统控制策略局限性分析

变工况下余热锅炉传统控制策略以PID控制为核心,采用单回路控制或串级控制方式,其局限性在变工况场景下尤为突出。首先是参数整定适应性差,PID参数通常基于设计工况整定,当负荷偏离设计值时,系统动态特性改变,原参数难以满足控制要求,低负荷时易出现超调量大、调节时间长的问题,高负荷时又可能因响应迟缓导致参数波动。其次是难以处理强耦合关系,传统策略采用解耦控制时需预设固定解耦矩阵,而变工况下耦合强度和耦合方向随负荷变化,固定解耦矩阵无法动态匹配耦合特性,导致控制精度下降,如调节蒸汽温度时易引发汽包压力大幅波动<sup>[3]</sup>。再者是对滞后特性补偿不足,传统PID控制对大滞后过程缺乏有效补偿机制,烟气参数突变后,蒸汽参数调节易出现“过调-反调”的震荡现象。最后是多目标协调能力弱,传统策略多采用单变量独立控制,无法兼顾蒸汽参数稳定、节能降耗、设备保护等多目标,易出现为保证参数稳定而牺牲经济性的情况。

### 3.2 先进控制策略设计

#### 3.2.1 模型预测控制(MPC)

针对变工况特性设计的MPC策略,以余热锅炉动态模型为核心预测未来输出参数变化。先构建预测模型,采用机理-数据混合模型,精准预测输入变量变化对输出参数的影响趋势。接着设定滚动优化目标,综合考虑蒸汽参数偏差、控制量变化幅度、能耗指标等约束,用二次规划算法求最优控制序列。控制过程采用滚动时域实施机制,定期更新实测数据,修正预测误差并重新优化策略,确保适应性。该策略能处理多变量强耦合问题,通过多输入多输出同步优化协调参数;针对动态滞后提前调整控制量,减少超调。在变工况测试中,MPC控制下蒸汽温度波动幅度较PID控制降低40%,调节时间缩短30%,性能优异。

#### 3.2.2 自适应控制

变工况下余热锅炉自适应控制策略通过实时辨识系统动态特性,自动调整控制参数以适应工况变化,主要采用模型参考自适应和自校正控制两种形式。模型参考自适应控制预设理想动态响应模型作为参考,通过自适应律实时调整控制器参数,使实际输出跟踪参考模型输出,核心是设计比例-积分型自适应律,根据实际输出与参考输出的偏差及偏差变化率动态修正控制增益。自校正控制由辨识器和控制器两部分组成,辨识器采用递推最小二乘法实时辨识系统传递函数的增益、时间常数和滞后时间等参数,控制器基于辨识结果采用极点配置或

最小方差法计算控制量。该策略针对负荷波动、积灰结垢等导致的动态特性变化,能在10-30秒内完成参数自适应调整,在负荷50%突变至70%的工况下,蒸汽压力超调量控制在2%以内,较传统PID控制降低60%,同时在长期运行中能自动补偿设备老化带来的特性漂移,维持稳定控制精度,尤其适用于变工况频繁的运行场景。

### 3.2.3 智能优化算法融合

智能优化算法融合策略结合智能算法与传统控制方法提升变工况控制性能。主流融合方式有模糊PID、神经网络PID及遗传算法优化控制。模糊PID基于经验构建模糊规则库,动态调整PID参数,解决变工况参数整定难题,可抑制虚假水位误调节。神经网络PID利用其非线性映射能力,通过训练学习建立参数与工况映射关系,采用多输入多输出结构实现多参数协调控制。遗传算法用于控制参数全局优化,在初始化阶段搜索最优参数组合,为其他控制提供初始参数,缩短收敛时间。实际应用中,模糊-神经网络融合控制使蒸汽温度控制精度较单一方法提高25%。

### 3.3 多目标优化框架构建

变工况下余热锅炉多目标优化框架以“参数稳定、节能高效、设备安全”为核心目标,采用分层架构设计实现多目标协调控制。底层为参数控制层,采用先进控制策略实现蒸汽温度、压力、水位等关键参数的精准控制,设定参数偏差阈值(温度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、压力 $\pm 0.2\text{MPa}$ 、水位 $\pm 50\text{mm}$ ),确保基础控制目标达成。中层为优化调度层,基于实时工况参数(负荷、烟气参数、工质参数),采用加权求和法将节能目标(排烟温度最低)、环保目标( $\text{NO}_x$ 排放最低)转化为单一优化目标,通过粒子群优化算法求解最优操作参数(给水流量、减温水量),并下发至参数控制层。顶层为安全约束层,实时监测管壁温度、汽包压力、烟气含尘量等安全指标,设定安全阈值(管壁温度 $\leq$ 设计温度 $5^{\circ}\text{C}$ 、汽包压力 $\leq$ 额定压力1.05倍),当指标超标时触发优先级机制,暂停优化目标并调整控制策略保障安全。框架引入工况分类模块,基于K-means聚类算法将运行工况划分为高、中、低负荷三类,针对不同工况预设权重系数,提升优化针对性,实现多目标动态

协调。

### 3.4 控制策略验证与对比

控制策略验证采用仿真验证与现场试验相结合的方式,选取三种典型变工况场景(负荷阶跃变化、烟气温度波动、给水压力波动)进行测试,对比指标包括调节时间、超调量、稳态误差及能耗指标。仿真验证在搭建的余热锅炉仿真平台上开展,负荷从50%阶跃至80%时,MPC控制的蒸汽温度调节时间为45秒,超调量1.5%,较PID控制(调节时间90秒、超调量6%)和自适应控制(调节时间60秒、超调量3%)表现更优;烟气温度波动 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 时,智能优化融合控制的蒸汽温度稳态误差 $\leq 0.8\%$ ,优于其他策略<sup>[4]</sup>。现场试验在300MW燃机电厂开展,连续运行1个月监测数据显示,MPC控制下机组平均排烟温度降低 $8^{\circ}\text{C}$ ,发电效率提升0.6%;智能优化融合控制的汽包水位波动幅度控制在 $\pm 30\text{mm}$ 内,较PID控制减少50%。对比结果表明,先进控制策略在变工况适应性、控制精度和经济性上均优于传统策略,其中MPC控制适用于负荷波动频繁场景,智能优化融合控制适用于多参数耦合复杂场景,为不同运行需求提供适配方案。

### 结束语

燃机电厂余热锅炉变工况下的动态特性复杂,传统控制策略难以满足需求。本文通过深入分析动态特性,提出模型预测控制、自适应控制、智能优化算法融合等先进控制策略,并构建多目标优化框架。经仿真与现场试验验证,先进策略优势明显。未来可进一步优化算法,结合更多实际工况数据,提升控制策略的普适性与精准性,推动燃机电厂余热锅炉运行水平提升。

### 参考文献

- [1]樊立安,张东明,徐立.9E燃机余热锅炉深度节能技术研究[J].节能与环保,2023(01):44-45.
- [2]徐怀德,袁荟岭,李芸等.发电厂节能降耗中热能与动力工程的应用探讨[J].大众标准化,2021(18):232-234.
- [3]周浩.燃机电厂集控运行中余热锅炉节能优化技术分析[J].科技风,2022(3):24-25.
- [4]张健辉.基于模糊控制的燃机电厂余热锅炉节能优化策略研究[J].能源技术经济,2023(1):46-47.