

# 350 MW 超灵活锅炉深度调峰下水冷壁流动不稳定性及动态特性分析

卫子钰<sup>1</sup>, 朱天如<sup>1</sup>, 于婷婷<sup>1</sup>, 殷亚宁<sup>2</sup>, 王婷<sup>2</sup>, 杨冬<sup>1</sup>

(1 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2 哈尔滨锅炉厂有限责任公司低碳热力发电技术与装备全国重点实验室, 150046, 哈尔滨)

**摘要:** 针对工质参数快速变化在超灵活锅炉深度调峰过程中引起的典型流体动力不稳定性现象, 提出了一种深入探究超灵活锅炉的密度波不稳定性机理及水冷壁动态响应特性的预测模型。基于频域法, 将整个蒸发管段划分为过冷区、两相区和过热区 3 部分, 对守恒方程进行线性化和微小扰动处理, 利用拉普拉斯变换求解获得管道段的传递函数, 基于此开发 C 语言和 MATLAB 的一维线性三区段临界热负荷 (CHF) 预测程序, 并采用奈奎斯特稳定性判据评估系统的稳定性。以 350 MW 超灵活塔式超临界煤粉锅炉为研究对象, 结果表明: 75% 和 30% 额定负荷的 CHF 分别为  $194.9 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $26.38 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ , 实际工况点距离热负荷边界有足够的裕度; 当锅炉在两负荷之间运行时, 提高运行压力和热负荷可增强流动稳定性, 增加管段长度和降低管道倾角会降低流动稳定性; 入口焓越大, 系统恢复稳定所需的时间越短。研究成果可为锅炉深度调峰安全运行奠定理论基础。

**关键词:** 深度调峰; 密度波不稳定性; 动态特性; 频域法; 拉普拉斯变换

**中图分类号:** TK223.3 **文献标志码:** A

## Numerical Analysis of Flow Instability and Dynamic Characteristics in Water Wall of 350 MW Ultra-Flexible Boiler during Deep Peak-Shaving Operation

WEI Ziyu<sup>1</sup>, ZHU Tianru<sup>1</sup>, YU Tingting<sup>1</sup>, YIN Yaning<sup>2</sup>, WANG Ting<sup>2</sup>, YANG Dong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. The National Key Laboratory of Low-Carbon Thermal Power Generation Technology and Equipment,

Harbin Boiler Company Limited, Harbin 150046, China)

**Abstract:** To address the typical hydrodynamic instability phenomena induced by periodic fluctuations in working fluid pressure, flow rate, and temperature during deep peak-shaving operation of ultra-flexible boilers, a predictive model is proposed to investigate the density wave oscillation mechanisms and dynamic response characteristics of water-cooled walls in-depth. Using the frequency-domain method, the evaporator tube section is divided into subcooled, two-phase, and superheated regions. The conservation equations are linearized with small perturbations, and Laplace transform is applied to obtain the pipe section's transfer function. Based on this, a one-dimensional linear three-region Critical Heat Flux (CHF) prediction program was developed in C and Matlab, with system stability evaluated using the Nyquist stability criterion. For a 350 MW ultra-flexible tower-type supercritical coal-fired boiler, analysis shows CHF values of  $194.9 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  at 75% rated load and  $26.38 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  at 30% rated load, with actual operating conditions maintaining sufficient safety margins from thermal load boundaries. When operating between these loads, increasing operating pressure and thermal load enhances flow stability, while longer tube lengths and reduced pipe inclination angles decrease stability. Higher inlet enthalpy shortens system stabilization time. These findings provide theoretical support for safe boiler operation during deep peak-shaving.

**Key words:** deep peak regulation; density wave oscillation; dynamic characteristics; frequency domain method; Laplace transform

超灵活锅炉由于高效率、低排放、强调峰能力等优点, 被广泛应用于电力生产中。近年来, 在“双碳”

目标下, 新能源发电发展迅猛, 要求传统火电机组必须具有深度调峰能力<sup>[1-3]</sup>, 目前我国怀柔实验室正在

收稿日期: 2025-06-17。 作者简介: 卫子钰 (2001—), 女, 硕士生; 杨冬 (通信作者), 男, 教授, 博士生导师。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4100303)。

开发的超灵活塔式锅炉具备宽负荷高效运行、快速变负荷响应以及深度调峰能力<sup>[4-5]</sup>，为满足新能源主导的新型电力系统调峰要求同时保障电网稳定性<sup>[6]</sup>。当前电力系统中，以风电和光伏为代表的清洁能源装机容量占比逐年提高，这些清洁能源发电方式所具有的波动性和不可控特性使得常规燃煤发电机组需要具备更强的运行灵活性<sup>[7]</sup>，不仅需要具有快速响应能力<sup>[8-9]</sup>，还需在低负荷工况下保持稳定运行<sup>[10]</sup>。在此背景下，锅炉系统中水冷壁的流动不稳定问题以及水冷壁出口参数动态特性问题日益凸显，成为制约系统安全高效运行的关键技术瓶颈<sup>[11-12]</sup>。

频域法在流体动力稳定性研究中的应用正日益受到重视<sup>[13]</sup>，利用奈奎斯特准则来评估流动稳定性<sup>[14]</sup>。Zhang 等<sup>[15]</sup>针对内螺纹管、考虑管壁储热效应，建立了频域数学模型。工质相态变化的稳定性与系统压力、质量流速及入口阻力参数呈正相关。田晓艳等<sup>[16]</sup>运用频域分析手段开发超临界水冷堆计算模型，深入研究了堆芯流体的动态特性。薛爱君等<sup>[17]</sup>建立了超临界水系统的单区域热力学模型，研究了关键参数对稳定性边界、阶跃响应及衰减比的作用。Liang 等<sup>[18]</sup>基于频域法建立了三区段计算模型，专门用于研究竖直管道中的流体动力特性。李维腾等<sup>[19]</sup>开发了适应多种运行条件的广义频域模型，对基本守恒方程实施线性近似和频域变换，建立该数学模型来评估系统的动态特性。现有研究对管道结构的探讨仍不充分，往往忽略了内螺纹管、倾斜角度等因素。

本文采用频域分析法构建了一维单通道三区段计算模型，用于探究管道内汽液两相流的动态特性，并以 350 MW 超灵活塔式超临界煤粉锅炉为研究对象，重点考察了低负荷工况下的流动稳定性问题。在稳态工况分析的基础上，深入探讨了运行压力、热负荷、入口工质焓及管道几何尺寸等关键参数对系统动态响应的影响机理。研究结果为超灵活锅炉深度调峰运行的优化设计和安全控制提供了理论支撑。

## 1 典型回路概况及参数

超灵活锅炉在深度调峰过程中，其运行负荷呈现快速下降的变化特征。在此过程中，水冷壁管内的工质会出现两相共存现象，导致流动系统的稳定性显著降低<sup>[20,21]</sup>，此类不稳定现象往往源于各管组之间的流量分配失衡。以某 350 MW 超灵活塔式超临界煤粉锅炉为研究对象，本研究选取了两种不同负荷工况下流量热偏差较大的回路进行计算分析，以考察单管流动不稳定性特征，进而评估锅炉在当前负荷下的运行稳定性。锅炉炉膛断面尺寸为 14.187 3 m×14.187 3 m，下炉膛水冷壁高度为 45 m，采用 264 根规格为 Ø38×6.5 mm、节距 53 mm 的管道组成的螺旋管圈水冷壁作为研究对象，管道以 14° 倾角布置。

由于管段长度增加和质量流速降低的共同作用，

锅炉水冷壁在低负荷工况下更易出现流动失稳问题。基于频域分析方法研究水冷壁稳定性时，以左侧墙工质流速最小的第一回路作为研究对象，计算分析了 75%及 30%两种额定负荷工况。各工况下水冷壁管回路的稳态运行计算参数见表 1 和表 2。

表 1 75%额定负荷工况 1 回路稳态计算参数

Table 1 75% turbine heat acceptance operating condition 1 loop steady state calculation parameters

| 参数                                                       | 数值        |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| 入口压力 $p_{in}/\text{MPa}$                                 | 21.442 9  |
| 入口焓 $h_{in}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$              | 1 535.083 |
| 出口压力 $p_{out}/\text{MPa}$                                | 19.983 4  |
| 出口焓 $h_{out}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$             | 2 692.705 |
| 回路长度 $L/\text{m}$                                        | 187.321   |
| 质量流速 $G/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | 1 774.767 |

表 2 30%额定负荷工况 1 回路稳态计算参数

Table 2 30% turbine heat acceptance operating condition 1 loop steady state calculation parameters

| 参数                                                       | 数值        |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| 入口压力 $p_{in}/\text{MPa}$                                 | 12.193 1  |
| 入口焓 $h_{in}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$              | 1 341.435 |
| 出口压力 $p_{out}/\text{MPa}$                                | 11.608 0  |
| 出口焓 $h_{out}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$             | 2 710.169 |
| 回路长度 $L/\text{m}$                                        | 187.321   |
| 质量流速 $G/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | 722.8346  |

## 2 流动不稳定性数值计算模型

本文采用频域法建立计算模型时，运用三区段划分策略，以瞬态饱和水参数与瞬态饱和蒸汽参数作为分区边界，基于图 1 所示的过冷-两相-过热三区划分方法，重点探究了管道几何尺寸、流动参数及热力学状态对两相流动稳定特性的调控规律。

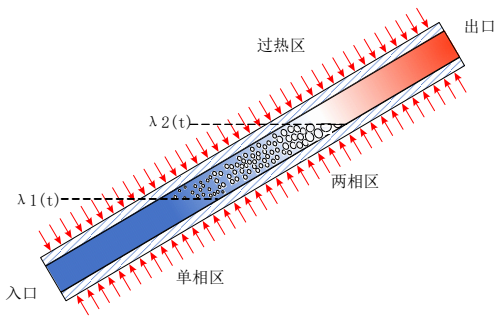


图 1 区段划分图

Fig.1 Section division diagram

### 2.1 模型假设

本文针对超灵活塔式锅炉水冷壁系统的结构特点，运用一维单通道频域法构建了简化计算模型，针

对锅炉深度调峰运行时的工质密度波动稳定性问题,在构建数学模型时引入以下基本假设<sup>[22]</sup>:

(1) 轴向热流简化假设: 仅考虑管道轴向传热效应, 不考虑径向传热对工质热力特性的影响。

(2) 单相未饱和区不可压缩性: 由于单相未饱和和水的密度变化极小, 忽略其压缩性及密度扰动不会引入显著误差。

(3) 单向流动简化: 仅分析工质轴向运动特性, 忽略切向流动分量, 以降低传递函数求解复杂程度。

(4) 均相平衡模型: 基于热力学平衡假设, 将两相流视为完全混合的均匀介质。

(5) 热流均匀分布: 沿管道轴向的热流密度分布保持恒定。

(6) 恒定节流系数: 进出口节流系数保持不变。

## 2.2 守恒方程

(1) 入口压降方程。工质在入口处经过节流会产生压降, 此处的压降方程<sup>[23]</sup>可表示为

$$\Delta p_{in} = k_{in} \frac{\rho_{hm} u_{in}^2}{2} \quad (1)$$

式中:  $\Delta p_{in}$  为入口压降/Pa;  $k_{in}$  为入口节流系数;  $\rho_{hm}$  为流体的密度/(kg·m<sup>-3</sup>);  $u_{in}$  为工质的入口速度/(m·s<sup>-1</sup>)。

(2) 过冷区和过热区守恒方程。在假设 1 和 4 的基础上, 建立一维流动模型, 设定过冷区工质不可压缩且密度恒定, 推导出该区域守恒方程<sup>[24]</sup>, 展现了管段热负荷与管内工质流动参数的传递关系。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (\rho(z) = \rho_{hm} = \text{Const}) \quad (2)$$

式中:  $u$  为工质的流速/m·s<sup>-1</sup>;  $z$  为沿管段轴向方向坐标/m;  $\rho$  为工质的密度/kg·m<sup>-3</sup>。

能量守恒方程为

$$\rho_{hm} \frac{\partial h}{\partial t} + \rho_{hm} u_{in} \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{P_h}{A_c} q \quad (3)$$

式中:  $h$  为工质的焓/(kJ·kg<sup>-1</sup>);  $t$  为时间/s;  $q$  为对管段施加的热负荷/(kW·m<sup>-2</sup>);  $P_h$  为管段的湿周/m;  $A_c$  为管段的流通截面积/m<sup>2</sup>。

动量守恒方程为

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \rho_{hm} \frac{du_{in}}{dt} + \rho_{hm} g \sin \varphi + \frac{f_1}{2D} \rho_{hm} u_{in}^2 \quad (4)$$

式中:  $f_1$  为过冷区的流动摩擦系数;  $D$  为受热管段当量直径/m;  $g$  为当地的重力加速度/(m·s<sup>-2</sup>);  $\varphi$  为管段倾斜角。

(3) 两相区守恒方程。质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_{hm} (1-\alpha)] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_{hm} u_h (1-\alpha)] = -\frac{q P_h}{A_c h_{hl}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{ml} \alpha) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_{ml} u_l \alpha) = \frac{q P_h}{A_c h_{hl}} \quad (6)$$

式中:  $\alpha$  为截面含汽率;  $h_{hl}$  为饱和汽与饱和液的焓差/(kJ·kg<sup>-1</sup>);  $\rho_{ml}$  为饱和汽点的密度/(kg·m<sup>-3</sup>)。

能量守恒方程为

$$\rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + \rho_m u_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = \frac{q P_h}{A_c} \quad (7)$$

式中:  $\rho_m$  为混合工质的密度/(kg·m<sup>-3</sup>);  $h_m$  为混合工质的焓/(kJ·kg<sup>-1</sup>)。

动量守恒方程为

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{G^2}{\rho_m} \right) + \frac{f_2 \rho_m u_m^2}{2D_c} + \rho_m g \sin \varphi \quad (8)$$

式中:  $G$  为工质的质量流速/(kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>);  $f_2$  为两相区的流动摩擦系数;  $\varphi$  为管段倾斜角。

## 2.3 稳态参量的计算方法

数值计算需预先确定 3 个流动分区的阻力系数  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  和稳态工况下各区域边界位置参数  $Z_{hm}$ 、 $Z_{ml}$ 。

(1) 内螺旋管流动摩擦系数的计算方法。对于亚临界压力条件下的流动过程, 摩擦系数的计算采用如下数学模型

$$f_1 = \frac{1}{4d \left( \log_{10} (3700d / 0.06)^2 \right)} \quad (9)$$

式中:  $d$  为管道内径/mm。

(2) 三区分界点稳态坐标的计算方法。基于稳态能量平衡方程, 管段输入的热能完全转化为工质内能, 导致其焓升高, 由此可确定液相区与两相区交界位置  $Z_{hm}$  的计算公式为

$$Z_{hm} = Z_{in} + \frac{GA_c (h_{hm} - h_{in})}{q P_h} \quad (10)$$

式中:  $h_{hm}$  为饱和液点的工质焓/(kJ·kg<sup>-1</sup>);  $Z_{in}$  为管段入口的位置坐标/m。

气相区与两相流区的界面位置  $Z_{ml}$  可由以下关系式确定

$$Z_{ml} = Z_{in} + \frac{GA_c (h_{ml} - h_{in})}{q P_h} \quad (11)$$

式中:  $h_{ml}$  为饱和汽点的工质焓/(kJ·kg<sup>-1</sup>)。

## 2.4 传递函数的推导

基于守恒方程组, 通过线性微扰方法将变量分解为稳态量与扰动量之和, 经拉氏变换导出各流动区域的传递特性模型<sup>[24]</sup>。

采用小扰动线性化方法处理压降方程, 分离稳态分量后得到入口节流的传递函数

$$\delta \Delta p_{in}(s) = G_0(s) \delta u_{in}(s) \quad (12)$$

$$G_0(s) = k_{in} \rho_{hm} u_{in} \quad (13)$$

过冷区和过热区的传递函数可写为

$$\delta \Delta p_1(s) = G_1(s) \delta u_{in}(s) \quad (14)$$

$$G_1(s) = \rho_{hm} Z_{hm} s + \frac{f_1}{D_e} \rho_{hm} u_{in} Z_{hm} + \left( \rho_{hm} g + \frac{f_1}{2D_e} \rho_{hm} u_{in}^2 \right) \frac{1}{s} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{sZ_{hm}}{u_{in}}\right) \right] \quad (15)$$

同理, 两相区的传递函数写为<sup>[25]</sup>

$$\delta \Delta p_2(s) = G_2(s) \delta u_{in}(s) \quad (16)$$

$$G_2(s) = -\frac{1}{\Omega_1 - s} \left\{ G\Omega_1 + \ell \ell \ell \rho_{ml} g + \frac{f_2}{2D_e} G \right\} \left[ u_{in} + \Omega_1 (Z_{ml} - Z_{hm}) \right] \left\{ 1 - \frac{\Omega_1}{s} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{sZ_{hm}}{u_{in}}\right) \right] - \exp\left(-\frac{sZ_{hm}}{u_{in}}\right) \right\} \left[ 1 + \frac{\Omega_1 (Z_{ml} - Z_{hm})}{u_{in}} \right]^{(\Omega_1 - s)/\Omega_1} \quad (17)$$

当出口处于过热状态时, 系统的整体传递函数由 4 个部分组成, 分别是入口节流区、过冷区、两相区和过热区。若出口位于两相区, 则整体传递函数仅包含前 3 部分, 两相段的传递函数特性也会相应改变。基于前述传递函数, 以进口速度扰动为输入, 降压扰动为输出, 推导出系统整体传递关系如下

$$\delta \Delta p(s) = [G_0(s) + G_1(s) + G_2(s) + G_3(s)] \delta u_{in}(s) \quad (18)$$

通过推导获得均匀受热管段闭环传递特性的解析表达式。根据图 2 控制系统框图, 实施 Nyquist 稳定性判据需先求解开环传递关系, 表达式如下

$$\frac{\delta u_{in}(s)}{\delta \Delta p(s)} = \frac{1}{[G_0(s) + G_1(s) + G_2(s) + G_3(s)]} \quad (19)$$

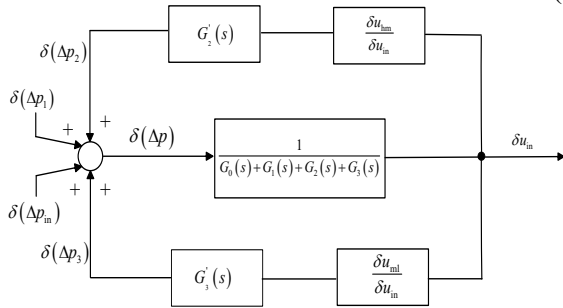


图 2 压力系统扰动反馈关系

Fig.2 Feedback relationship of disturbance to pressure system

依据控制理论基本原理, 建立该闭环系统的传递特性模型

$$\frac{\delta u_{in}(s)}{\delta \Delta p(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (20)$$

系统的开环传递函数为

$$G_{open}(s) = G(s)H(s) \quad (21)$$

通过建立均匀受热管段的闭环传递模型分析可知

$$G(s) = 1 \quad (22)$$

$$1 + G_{open}(s) = G_0(s) + G_1(s) + G_2(s) + G_3(s) \quad (23)$$

在频域稳定性分析中, 传递函数 Nyquist 曲线与坐标原点的相对位置是判断系统稳定性的重要依据: 极坐标图环绕原点时为不稳定, 穿过原点为临界稳定, 不环绕原点为稳定状态<sup>[26]</sup>。

### 3 典型回路的 Nyquist 曲线计算

当前两相流稳定性研究中, 普遍以无量纲过冷度  $N_{sub}$  和相变数  $N_{pch}$  为基本参数来界定流动失稳边界, 计算式如下<sup>[27]</sup>

$$N_{sub} = \frac{\Delta h_{sub}}{h_{fg}} \frac{v_{fg}}{v_f} \quad (24)$$

$$N_{pch} = \frac{Q}{G h_{fg}} \frac{v_{fg}}{v_f} \quad (25)$$

式中:  $\Delta h_{sub}$  为入口欠焓/(kJ·kg<sup>-1</sup>);  $h_{fg}$  为汽化潜热/(kJ·kg<sup>-1</sup>);  $v_{fg}$  为饱和水和饱和蒸汽的比热容差/(m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>);  $v_f$  为饱和水的比热容/(m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>);  $Q$  为总加热功率/kW。

#### 3.1 典型回路 75%额定负荷工况的 Nyquist 曲线

在 75%额定负荷工况运行工况下, 左侧墙 1 回路入口压力维持在 21.442 9 MPa, 此时将入口节流系数设为 0.5。当入口焓为 1 535.083 kJ·kg<sup>-1</sup>, 质量流量为 1 774.767 kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 在热流密度为 180.05 kW·m<sup>-2</sup> 工况下, 测得无量纲入口过冷度  $N_{sub}=0.951$  6, 相变数  $N_{pch}=6.340$  9。基于 21.442 9 MPa 压力条件下 NIST 物性数据库的查询结果, 该压力对应的饱和水温度为 372.45℃。应用 Nyquist 稳定性理论对 75%额定负荷工况进行分析, 得到图 3 所示的频率响应曲线, 表明该流动系统处于稳定工作状态。

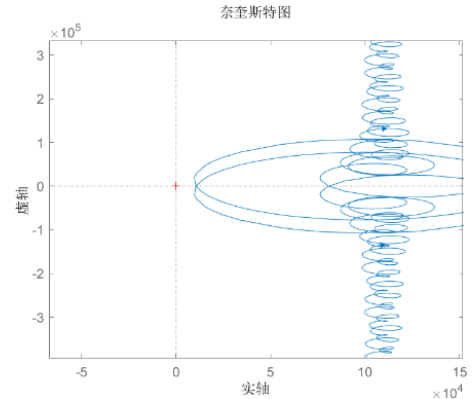


图3  $N_{sub}=0.9516$  和  $N_{pch}=4.0777$  的 Nyquist 图  
Fig.3 Nyquist diagram of  $N_{sub}=0.9516$  and  $N_{pch}=4.0777$

在恒定过冷度工况下,逐步提高热负荷会导致系统稳定性状态发生显著转变。图4显示,当热负荷增至  $194.9 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  (对应  $N_{pch}=6.8657$ ) 时, Nyquist 曲线通过坐标原点,表明流动处于临界稳定状态。继续增加热负荷至  $220 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  ( $N_{pch}=7.7499$ ) 时,如图5所示, Nyquist 曲线将原点包围,系统进入不稳定状态。

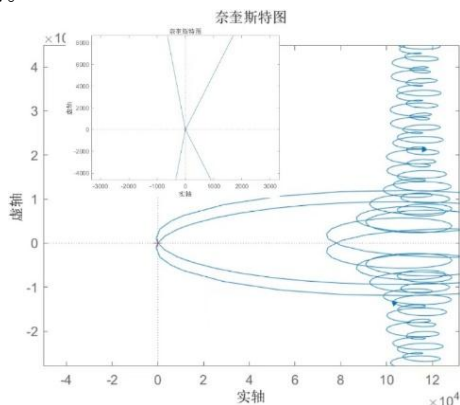


图4  $N_{sub}=0.9516$  和  $N_{pch}=6.8657$  的 Nyquist 图  
Fig.4 Nyquist diagram with  $N_{sub}=0.9516$  and  $N_{pch}=6.8657$

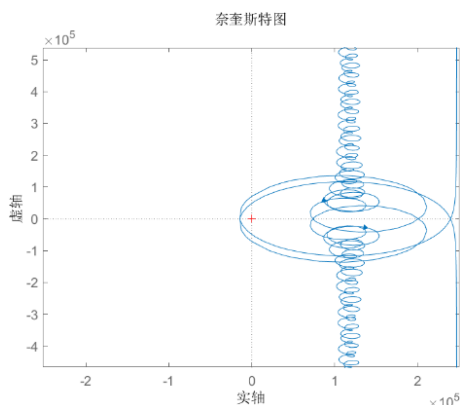


图5  $N_{sub}=0.9516$  和  $N_{pch}=7.7499$  的 Nyquist 图  
Fig.5 Nyquist diagram of  $N_{sub}=0.9516$  and  $N_{pch}=7.7499$

### 3.2 典型回路 30%额定负荷工况的 Nyquist 曲线

在 30%额定负荷工况下,左侧墙 1 回路入口压力维持在  $12.1931 \text{ MPa}$ ,此时将入口节流系数设为 0.5。当入口焓为  $1341.435 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,质量流量为  $722.834 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,当热负荷降至  $20.01 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,测得无量纲入口过冷度  $N_{sub}=0.9557$ ,相变数  $N_{pch}=3.8125$ 。基于  $11.6086 \text{ MPa}$  压力条件下 NIST 物性数据库的查询结果,该压力对应的饱和水温为  $325.90^\circ\text{C}$ 。采用频率域分析方法,验证了 30%额定负荷工况下前墙回路的流动稳定性,相关 Nyquist 曲线见图6。由图可见,当入口过冷度保持恒定时,增加热负荷会改变系统的稳定特性。当热负荷增至  $26.38$

$\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,  $N_{pch}=5.0287$ , Nyquist 曲线通过坐标原点,表明流动处于临界稳定状态。继续增加热负荷至  $30.12 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,  $N_{pch}=5.7188$ , Nyquist 曲线将原点包围,系统进入不稳定状态。

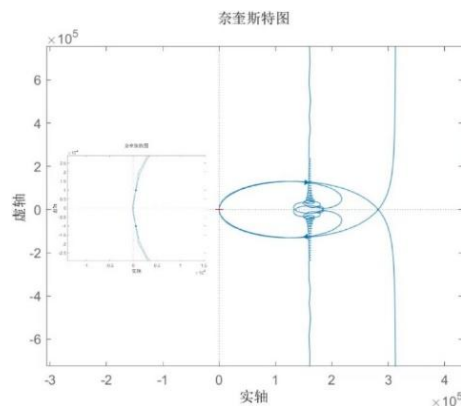


图6  $N_{sub}=0.9557$  和  $N_{pch}=5.0287$  的 Nyquist 图  
Fig.6 Nyquist diagram of  $N_{sub}=0.9557$  and  $N_{pch}=5.0287$

## 4 超灵活锅炉的动态特性分析

### 4.1 模型预测

将数学模型与杜晓成等<sup>[10]</sup>的实验值进行对比,保持工况参数相同:管长为  $2 \text{ m}$ ,压力为  $26.0 \text{ MPa}$ ,入口焓为  $1443.74 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,质量流速为  $660 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,热负荷为  $240 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。当热负荷增至  $290 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ,即变化 20%后,出口焓预测曲线与实验数据吻合,如图7所示。由图可见,计算值与实验值的相对误差小于 8%,趋势一致,模型准确可靠,适用于水冷壁动态特性研究。

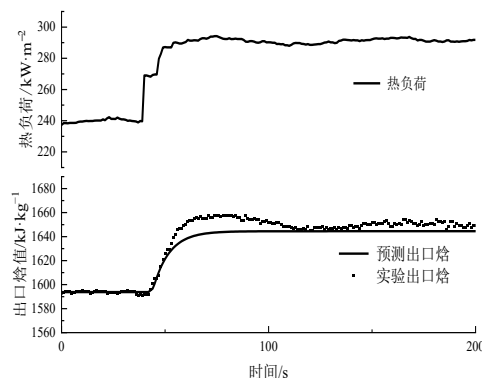


图7 热负荷阶跃至  $290 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  的结果对比  
Fig.7 Comparison of results for heat load step change to  $290 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$

### 4.2 压力对动态特性的影响

在分析 75%额定负荷水冷壁管道的动态特性时,选择水冷壁热负荷最大且管长最长的第 1 回路作为

研究对象。回路入口压力为 21 MPa，入口热负荷为 80 kW/m<sup>2</sup>，入口焓为 1 535 kJ/kg，管道计算长度为 187 m，管道倾角为 14°。

图 8 揭示了压力参数对热负荷扰动响应的调控作用。当压力在 13~21 MPa 之间变化时，在出口焓响应方面，较高压力工况下焓变化更为平缓，这源于比定压热容  $c_p$  与压力的负相关特性：压力提升导致  $c_p$  减小，相同温升对应的焓变降低。对于质量流量响应，高压工况显著抑制了扰动幅值，其机理在于工质比热容的压力依赖性：压力升高使  $\partial v / \partial T$  减小，热膨胀效应减弱，从而降低了对进出口流体的排挤作用。值得注意的是，管壁热惯性使得在 10% 热负荷阶跃条件下，压力变化对响应时间参数的影响相对有限，出口参数变化量不超过 10% 且在 50 s 内均能恢复至稳态。

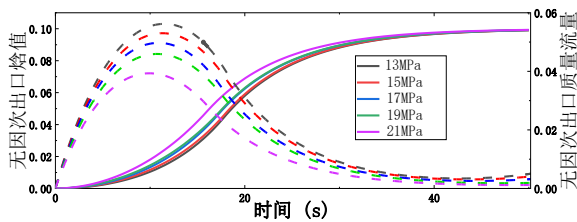


图 8 热负荷扰动条件下压力对动态特性的影响  
Fig.8 Effect of pressure on dynamics under thermal load disturbance

图 9 给出了入口焓扰动条件下压力对动态特性的影响规律。入口焓阶跃增加，工质比热容瞬时增大产生体积膨胀，推动管内流体加速向出口移动，导致出口质量流量上升。由于热负荷保持恒定，出口焓在初始阶段呈现下降趋势，高焓工质到达引发出口参数显著变化：焓急剧上升而流量快速下降，随后在调节机制作用下回归稳态值，这一变化在 20 s 内能够恢复至稳态值。随着系统压力的升高，工质的物性参数变化梯度显著减小，定压比热容和比热容等参数值降低，动态过程中出口焓与质量流量的波动幅值衰减。

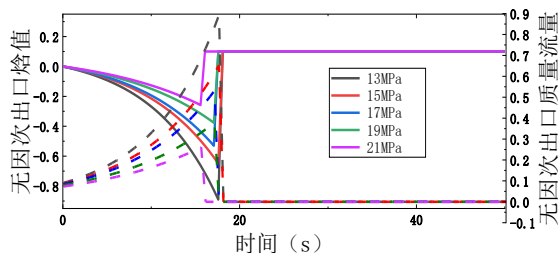


图 9 入口焓扰动条件下压力对动态特性的影响  
Fig.9 Effect of pressure on dynamics under inlet enthalpy disturbance

入口质量流量扰动条件下压力对动态特性的影响如图 10 所示，与其他参数扰动不同，流量变化引发的响应最为迅速，几乎不存在时间延迟，其变化过程可分为初始阶跃突变、渐进上升阶段和最终稳态

平衡 3 个阶段。在热负荷恒定的约束条件下，出口焓呈现单调递减趋势，其变化幅值与质量流量的增量严格满足能量守恒关系，出口参数在 20 s 内恢复至稳态且最大变化幅值不超过 10%。由图 10 还可以看出，系统响应时间与操作压力呈正相关关系，其物理机制在于高压条件下工质比热容降低导致物性变化速率减小。这种物性变化延缓了进口扰动向出口的传递过程，从而延长了动态响应时间。

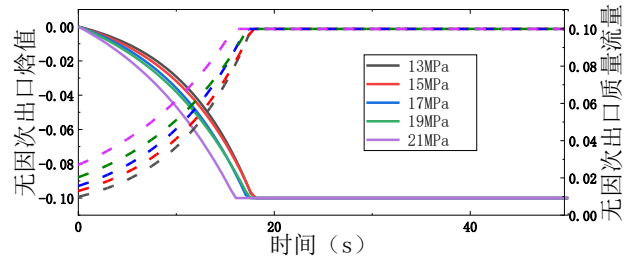


图 10 入口质量流量扰动条件下压力对动态特性的影响  
Fig.10 Effect of pressure on dynamics under inlet mass flow disturbance

图 11 反映了出口压力阶跃增加触发的动态过程：压力阶跃，出口焓的变化较为复杂，压力突升导致出口焓瞬时跃增，引发质量流量骤降，随后质量流量逐步回升促使焓递减。在压力扰动作用下，工质物性参数发生改变，部分热量被管壁暂存，从而造成无量纲焓瞬时呈现负向波动。在恒定入口质量流量和热负荷条件下，系统经过动态调整后焓最终恢复至稳态水平。

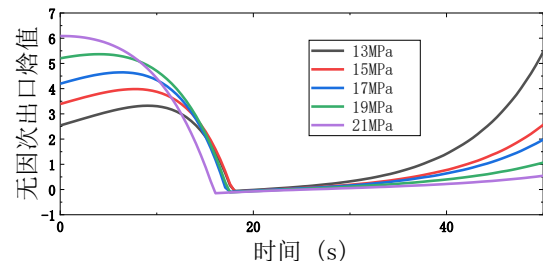


图 11 出口压力扰动条件下压力对动态特性的影响  
Fig.11 Effect of pressure on dynamics under outlet pressure disturbance

### 4.3 热负荷对动态特性的影响

不同扰动条件下热负荷对动态特性的影响如图 12 所示。由图可见，随着热负荷的增加，工质物性参数的提升使得扰动传播速度加快，响应时间相应减少，比热容增大，使得任何参数变化能够更快地传递到出口位置，从而缩短了扰动传播所需的时间。图 12(a)表明，随着热负荷增加，出口质量流量在热负荷扰动下的波动幅度更为明显。这主要源于两个因素：一是较高的热负荷使温度、压力等工质参数升高，系统对扰动更加敏感导致质量流量的波动加剧；二是在相同扰动幅度下，热负荷越大，其实际变化量也越大，进一步放大了出口质量流量的波动，出口焓值在

50 s 内恢复至稳态且最大变化幅值不超过 10%。图 12(b)和 12(c)反映了相较于低负荷工况，高负荷条件下入口焓扰动和入口质量流量扰动会引起更快速的出口焓波动和质量流量变化。高热负荷条件下工质热力学参数提升，系统对扰动的敏感性增强。如图 12(d)所示，随着热负荷的提升，相同的出口压力扰动所产生的焓波动呈现衰减趋势。这一现象可能与压力扰动时的工质状态有关，与低负荷工况相比，高负荷条件下增大的焓差和提升的基准值共同作用，显著降低了无因次焓的相对变化幅度。

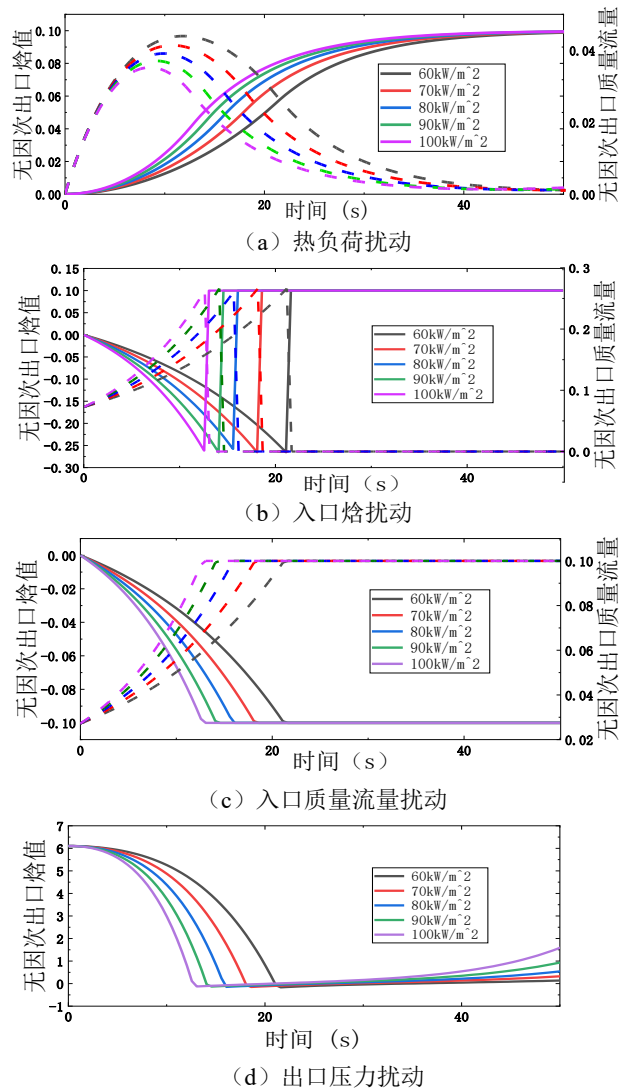


图 12 不同扰动条件下热负荷对动态特性的影响

Fig.12 Effect of thermal load on dynamics under different disturbance conditions

#### 4.4 入口焓对动态特性的影响

图 13 给出了不同扰动条件下入口焓对动态特性的影响。随着入口焓的增加，系统对扰动的响应时间呈现缩短趋势。图 13(a)结果显示，入口焓的降低会提升系统对热负荷扰动的敏感性，具体表现为出口质量流量的波动幅度增大。该现象的本质在于较低

的入口焓工况下，热负荷扰动导致的工质状态参数变化更为剧烈，产生更强的进出口流量抑制作用，导致出口流量波动幅值增大，此扰动时间不超过 50 s 且最大变化幅值不超过 10%。图 13(b)和 13(c)结果显示，随着入口焓的提升，出口焓和质量流量的扰动幅值先上升后下降。图 13(d)表明，在出口压力扰动工况下，较小的入口焓会导致更大的出口焓波动。这可以解释为低焓工况下工质比热容较大，在相同压力扰动下会产生更显著的质量流量变化，在恒定热负荷条件下这种变化会直接反映为出口焓的更大波动，扰动时间在 20 s 以内。

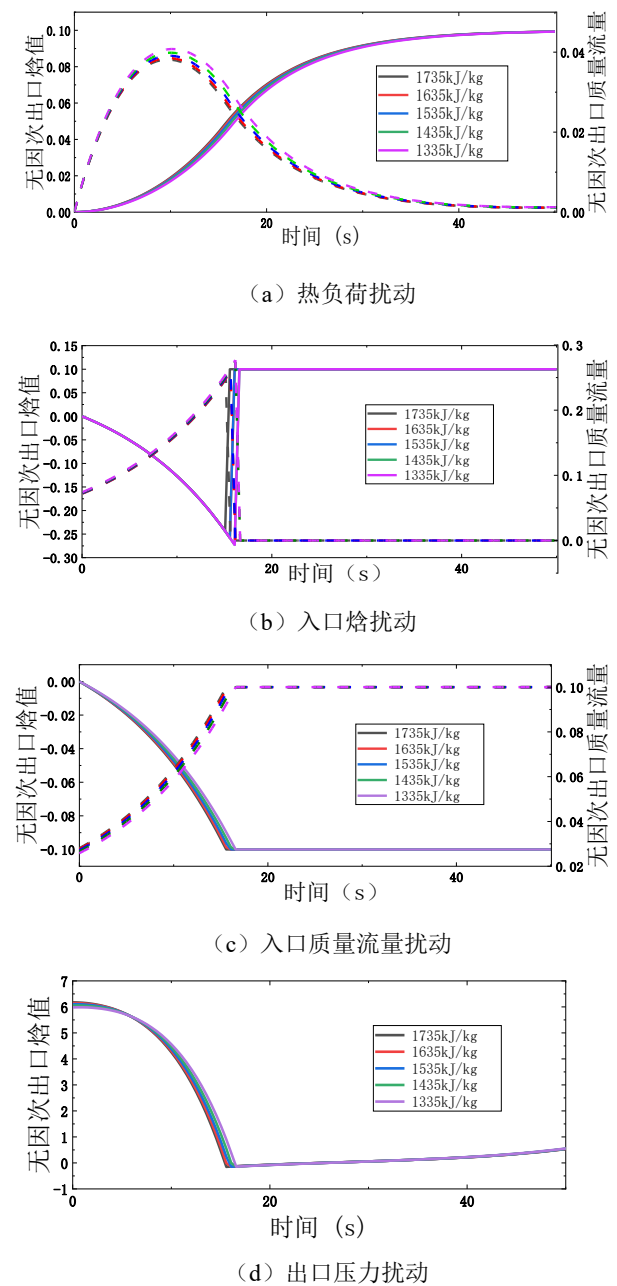
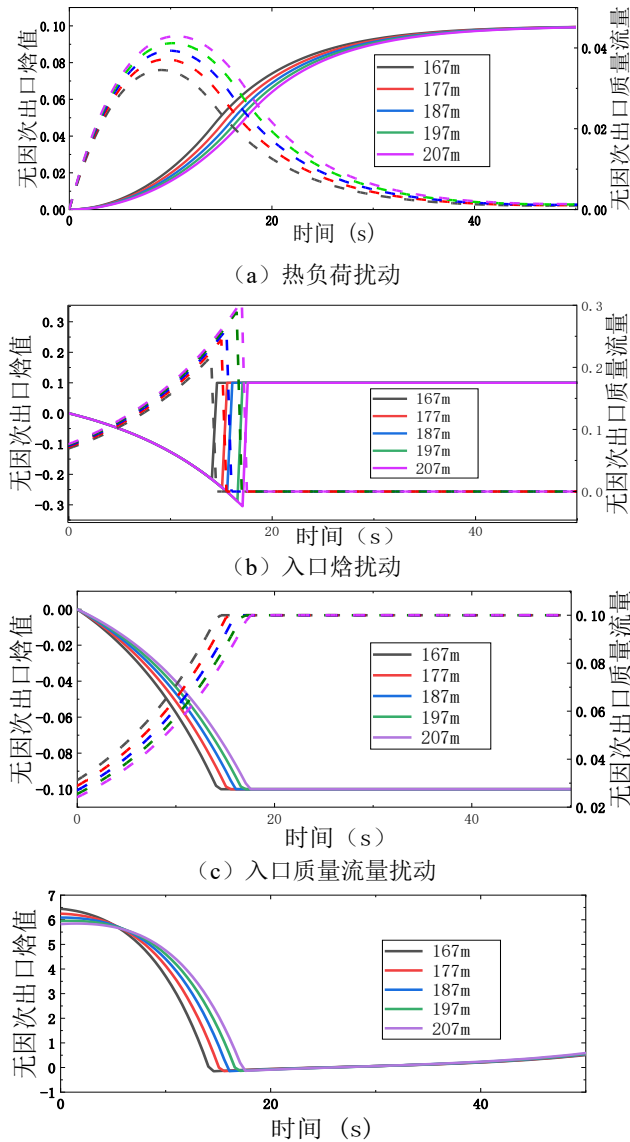


图 13 不同扰动条件下入口焓对动态特性的影响

Fig.13 Effect of inlet enthalpy on dynamics under different disturbance conditions

#### 4.5 管道长度对动态特性的影响

从图 14(a)可以看出, 管道长度与出口质量流量的扰动幅度呈正相关关系。在固定热负荷工况下, 管段长度的增加促使出口工质获得更高的焓和更大的比热容。当系统受到热负荷扰动时, 这种物性变化会加剧工质的膨胀效应, 表现为质量流量波动的显著增强。图 14(b)的结果表明, 管长与系统动态响应特性存在显著相关性, 由于入口焓的阶跃变化会引发比热容的突变, 促使工质向出口方向加速流动。随着管段长度的增加, 工质膨胀程度更大, 入口焓扰动引起的出口参数变化更为显著。图 14(c)的结果表明, 管道长度与出口流量的初始响应幅度存在负相关关系, 管道长度的增加会衰减入口流量扰动的传播效应, 从而降低出口质量流量的瞬态响应强度。图 14(d)揭示了管道长度对压力扰动响应的影响规律, 长管段在恒定热负荷下会产生更大的进出口焓差, 这使得当系统受到相同压力扰动时, 由于初始焓较高, 经过无量纲化处理后出口焓的相对变化幅度会呈现减小趋势。



(d) 出口压力扰动

图 14 不同扰动条件下管长对动态特性的影响

Fig.14 Effect of tube length on dynamics under different disturbance conditions

#### 4.6 管道倾角对动态特性的影响

图 15 给出了不同扰动条件下管道倾角对动态特性的影响。图 15(a)~(c)的计算结果表明, 倾角越大两相区气泡分布及流速分布更加均匀, 扰动越小, 且扰动越快恢复平稳, 恢复平稳所需时间不超过 50s, 阶跃幅度不超过 10%。图 15(d)表明在出口压力发生阶跃时, 管道倾斜角度越大, 出口焓扰动越剧烈, 此时重位压降的影响占主导地位, 系统稳定性变差, 随后一段时间内逐渐恢复平稳。倾斜角度的变化对流动稳定性的影响具有双重作用。

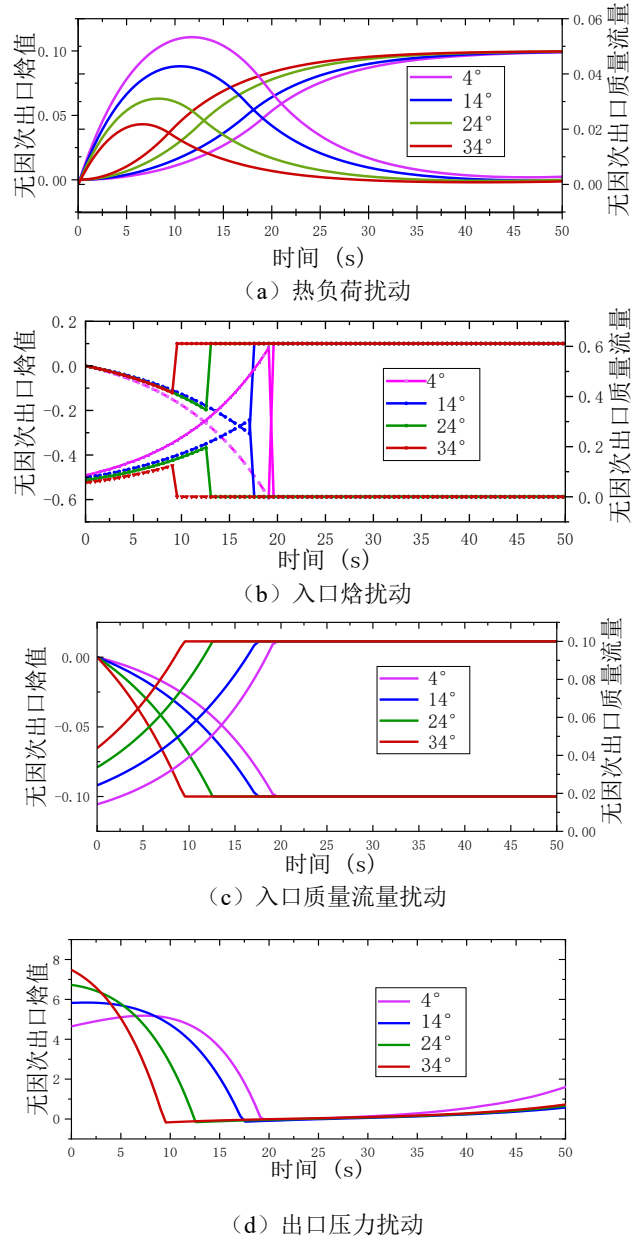


图 15 不同扰动条件下管道倾角对动态特性的影响

Fig.15 Effect of pipe inclination angle on dynamics under different disturbance conditions

## 5 结论

本研究以某 350 MW 超灵活塔式超临界煤粉锅炉为例,采用频域分析方法,构造了一种适用于多种运行状况的一维单通道水动力数值计算模型,系统分析了锅炉水冷壁在低负荷运行时的两相流稳定性问题,重点考察了不同锅炉水冷壁运行参数对流动不稳定性的作用机制,所得结论如下。

(1) 75%额定负荷和 30%额定负荷工况下,左墙 1 回路的临界热负荷分别为  $194.9 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $26.38 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。深度调峰运行工况分析表明,此锅炉水冷壁系统在各运行点均维持稳定状态,且具有显著的安全裕度。

(2) 热负荷扰动工况下,压力、入口焓和入口流量阶跃提升 10%可抑制出口流量波动,而热负荷增加和管段延长则会放大该波动,热负荷阶跃造成的出口参数变化可在 50 s 内恢复至稳态。入口焓阶跃分析显示,高压大流量工况下出口参数变化较小,但受热负荷和管长影响显著,且呈现非线性响应特性;质量流量阶跃主要导致出口焓初始突变;出口压力阶跃在高压大流量时引发更明显的焓变化;倾斜角度越大,阶跃扰动会越快恢复稳定。入口焓等阶跃扰动造成的出口参数变化可在 20 s 内恢复至稳态,且最大变化范围不超过 10%。入口焓阶跃会导致出口焓最大变化幅值达到 30%,但热负荷具有足够的安全裕度,仍能保证锅炉水冷壁安全运行。

在超灵活锅炉水冷壁动态特性的计算当中,过程相对简化,假设条件与实际情况有所偏差,该模型只能对实际运行的锅炉控制提供理论参考。在今后的工作中,可以 Aspen 建模平台或 MATLAB 的 Simulink 平台为基础,建立整个电厂的动态仿真模型,分析多参数扰动对不同位置工质参数的影响。

## 参考文献

- [1] HASSAN Q, ALGBURI S, SAMEEN A Z, et al. A comprehensive review of international renewable energy growth [J]. Energy and Built Environment, 2024.
- [2] QU Mofeng, YANG Dong, LIANG Ziyu, et al. Experimental and numerical investigation on heat transfer of ultra: supercritical water in vertical upward tube under uniform and non-uniform heating[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127:769-783
- [3] WIDJAJANTO T, DARMADI D B, IRAWAN Y S, et al. Failures analysis of tube coating in Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler [J]. Heliyon, 2024, 10(4): e26134.
- [4] XI K, LI R, ZHAO L, et al. Experimental investigations of flow dynamics in the riser of supercritical water circulating fluidized bed [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2023, 169: 104600.
- [5] 欧阳诗洁,李娟,董乐,周熙宏,杨冬.超超临界锅炉低负荷运行时的流动不稳定性计算分析[J].西安交通大学学报, 2019, 53(07):84-91.
- [6] OUYANG Shijie, LI Juan, DONG Le, et al. Calculation and analysis on the flow instability of an ultra supercritical boiler under low load[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(07):84-91.
- [7] 杨冬,聂超,周科,等. 超临界机组深度调峰工质流动不稳定试验与理论计算[J].洁净煤技术,2023,29(06):40-48.
- [8] YANG Dong, NIE Chao, ZHOU Ke, et al. Experiment and theoretical calculation of flow instability in deep peak: shaving of supercritical units[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(06): 40-48.
- [9] 周旭,周妍君,李维成,等. 660 MW 超超临界 CFB 锅炉失电壁温计算及运行措施[J].洁净煤技术,2023,29(11):91-98.
- [10] ZHOU Xu, ZHOU Yanjun, LI Wercheng, et al. Calculation of heating surface wall temperature and operation measures for 660 MW ultra supercritical CFB boiler under electricity failure[J]. Clean Coal Technology, 2023,29(11):91-98.
- [11] 严俊杰,刘明,王朝阳等.燃煤发电机组瞬态过程高效灵活清洁协同的能势动态匹配技术及应用[J/OL].西安交通大学学报:1-8[2024-02-27].
- [12] YAN Junjie, LIU Ming, WANG Chaoyang, et al. Energy-potential dynamic matching technology for the synergy of high-efficiency, flexibility and clean for coal-fired power generation units during the transient processes and its application[J/OL]. Journal of Xi'an Jiaotong University, :1-8[2024-02-19].
- [13] 吴浩民,王烈高,卫鹏凯,梁志远,赵钦新.电站锅炉深度调峰超温工况下水冷壁腐蚀机理研究[J].西安交通大学学报, 2023, 57(11):118-129.
- [14] WU Haomin, WANG Liegao, WEI Pengkai, et al. Overheating corrosion behavior of heat resistant steels during deep peaking[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023,57(11):118-129.
- [15] 杜晓成,王奥宇,项昱轩,等. 超临界CFB锅炉灵活运行方式下的流动传热及动态特性试验研究[J].热力发电, 2023, 52(09):76-86.
- [16] DU Xiaocheng, WANG Aoyu, XIANG Yuxuan, et al. Experimental investigation on flow heat transfer and dynamic characteristics of supercritical CFB boiler under flexible operation[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(09):76-86.
- [17] HU W, XUE S, GAO H, et al. Leakage failure analysis on water wall pipes of an ultra-supercritical boiler [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 154: 107670.
- [18] CARRASCO D S, GOODWIN G C, PEIRCE R D. Novel modelling for a steam boiler under fast load dynamics with implications to control [J]. Automatica, 2023, 156: 111184.
- [19] 侯素霞,赵福宇,刘成. 频域法分析两相流动不稳定性[J]. 2007: 1.
- [20] Hou Suxia, Zhao Fuyu, Liu Cheng. Frequency domain method to analyze the instability of two-phase flow[J]. 2007: 1.
- [21] 李军,李晓明,刘长亮. 开式自然循环流动不稳定性的频域法分析[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(10): 1800-1805.
- [22] LI Jun, LI Xiaoming, LIU Changliang. Instability analysis of open natural circulation system using frequency domain method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017,51 (10): 1800-1805.
- [23] ZHANG Y, LI H, LI L, et al. Study on two-phase flow instabilities in internally ribbed tubes by using frequency domain method[J]. Applied Thermal Engineering, 2014,

- 65(1-2):1-13.
- [16] 田晓艳, 田文喜, 朱大欢, 等. 基于频域法超临界水冷堆CSR1000流动不稳定性研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(3): 402-408.  
Tian Xiaoyan, Tian Wenxi, ZHU Dahuan, et al. Flow instability analysis of supercritical water-cooled reactor CSR1000 based on frequency domain[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(3): 402-408.
- [17] 薛爱军, 程旭. 超临界水热力系统的稳定性的简化模型分析[J]. 核动力工程, 2009, 30(5): 35-39.  
XUE Aijun, CHENG Xu. Stability analysis of a simplified model of supercritical water-cooled system[J]. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(5): 35-39.
- [18] LIANG Qian, LI Xiaowei, SU Yang, et al. Frequency domain analysis of two-phase flow instabilities in a helical tube once through steam generator for HTGR[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 168: 114839.
- [19] 李维腾, 郭泽瑞, 韩磊, 等. 超临界循环流化床锅炉深度调峰时水冷壁流动不稳定性特性计算分析[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(01): 68-77.  
LI Weiteng, GUO Zerui, HAN Lei, et al. Calculation and safety analysis of unstable flow characteristics of water wall during deep peak shaving in supercritical CFB boiler [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(1): 68-77.
- [20] 王芊. 垂直上升管内汽液两相流不稳定性实验研究与数值计算[D]. 西安交通大学, 1990.  
WANG Qian. WANG Qian. Experimental study and numerical calculation of the binstability of vapor-liquid two-phase flow in a vertical ascending pipe[D]. Xian Jiaotong University, 1990.
- [21] 张鑫, 刘朝晖, 毕勤成, 吕海财, 杨冬. 倾斜内螺纹管中超临界水的传热和流动阻力特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(12): 106-115.  
ZHANG Xin, LIU Zhaohui, BI Qincheng, et al. Heat transfer and resistance characteristics of water in an inclined internally ribbed tube under supercritical pressure conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(12): 106-115.
- [22] ZHAO Jiyun,. Stability analysis of supercritical water cooled reactors[D]. Cambridge MA: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [23] 辛亚飞, 聂超, 毕凌峰, 等. 倾斜管内汽水两相流动不稳定性特性的数值分析[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(3): 195-201.  
XIN Yafei, NEI Chao, BI Lingfeng, et al. Numerical analysis of unstable characteristics of steam-water two-phase flow in inclined pipe[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection. 2022, 38(3): 195-201.
- [24] 王志勇, 李维腾, 堵根旺, 等. 自然循环锅炉深度调峰时水冷壁汽水两相流动不稳定性特性计算及安全分析[J]. 热力发电, 2024, 53(11): 119-129.  
WANG Zhiyong, LI Weiteng, DU Genwang, Calculation and safety analysis of unstable characteristics of two Phase flow in water wall during deep peak shaving of natural circulation boiler[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(11): 119-129.
- [25] 毕凌峰, 杜晓成, 张西容, 等. 基于频域法的超超临界锅炉水冷壁动态特性模型验证及计算分析[J]. 动力工程学报, 2023, 43(12): 1557-1566.  
BI Lingfeng, DU Xiaocheng, ZHANG Xirong, et al. Model verification and calculation analysis of dynamic characteristics of water wall of ultra-supercritical boiler based on frequency domain method[J]. Journal of Power Engineering, 2023, 43(12): 1557-1566.
- [26] 茆凯源, 聂鑫, 谢海燕, 等. 超超临界 1000 MW 二次再热机组锅炉水动力及流动不稳定性计算分析[J]. 热力发电, 2017, 46(08): 36-41.  
MAO Kaiyuan, NIE Xin, XIE Haiyan, et al. Computational analysis on hydrodynamic characteristics and flow instability of an ultra supercritical 1 000 MW double-reheat unit boiler. [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(08): 36-41.
- [27] SHIN C W, NO H C. Experimental study for pressure drop and flow instability of two-phase flow in the PCHE-type steam generator for SMRs[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 318: 109-118.