

DOI: 10.7652/xjtuxb201907013

超超临界锅炉低负荷运行时的 流动不稳定性计算分析

欧阳诗洁, 李娟, 董乐, 周熙宏, 杨冬

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究超超临界锅炉水冷壁在低负荷运行工况下的流动不稳定性,采用一维单通道模型,建立了适用于不同几何结构、热工参数的超超临界锅炉的流动不稳定性通用数值计算模型。在试验验证结果符合良好的基础上,对沁阳发电分公司 1 000 MW 超超临界锅炉水冷壁系统低负荷(40%额定出力负荷)运行的部分典型回路进行了数值计算,对比分析了动态流动不稳定发生时,热负荷线密度对进出口流量振幅及其稳定时间的影响。结果表明:对前墙的最短管 9 回路、左侧墙最长管 32 回路及上炉膛受热最强管 107 回路,随着热负荷扰动强度的增加,进出口流量脉动的振幅也逐渐增加;9、32、107 各回路线密度分别为 3.389、3.520、3.172 kW/m,热负荷线密度越大,对应典型回路进出口流量达到稳定所需的时间越长,脉动振幅越大,回路流动状态越不稳定。该结果可为超超临界锅炉的设计及低负荷安全运行提供指导,具有一定的可靠性及工程应用价值。

关键词: 超超临界锅炉;时域法;低负荷运行;流动不稳定性

中图分类号: U462.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)07-0084-08

Calculation and Analysis on the Flow Instability of an Ultra Supercritical Boiler under Low Load

OUYANG Shijie, LI Juan, DONG Le, ZHOU Xihong, YANG Dong

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

Abstract: To study the flow instability of an ultra-supercritical boiler under low load operation, this study established a one-dimensional single-channel model, and a general numerical model for the flow instability analysis of the ultra-supercritical boiler with different geometric structures and thermal parameters was established. Based on the good agreement between numerical and experimental results, the flow instability of water wall system of a 1 000 MW ultra-supercritical boiler in Qinyang Power Generation Company was numerically calculated (40% turbine heat acceptance). The influences of thermal line density on the import and export flow amplitude and time stability were analyzed when the dynamic flow instability occurred in the circuit No. 9 of the shortest tube on the front wall, the circuit No. 32 of the longest tube on the left wall, and the circuit No. 107 of the strongest heating tube in the upper furnace. The results showed that with the increase of the disturbance intensity of heat load, the amplitudes of the flow fluctuation at the inlet and outlet increase gradually. The thermal load line densities of circuits 9, 32, 107 are 3.389, 3.520 and 3.172 kW/m, respectively. With a higher thermal load line density, the import

收稿日期: 2019-01-04。 作者简介: 欧阳诗洁(1995—),女,硕士生;杨冬(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0604400)。

网络出版时间: 2019-03-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190327.1139.004.html>

and export flow rates of the typical circuit require longer time to reach stable; and the flow state is not stable with greater pulsation amplitude. The results can provide a guidance for the design of the ultra-supercritical boiler under low load operation conditions.

Keywords: ultra supercritical boiler; time-domain method; low-load operation; flow instability

近年来,由于我国新能源发电发展迅猛及煤电产能过剩,对调峰电源的需求逐渐升高^[1]。对于以煤炭为主要能源的国家,火电机组尤其是煤电机组持续低负荷运行或深度调峰在未来几年将成为常态^[2-3]。在深度调峰过程中机组负荷多数偏离设计工况,尤其在锅炉低负荷运行时,水冷壁管圈内工质将出现单相流动和双相流动两种工作状态,使锅炉的工作条件更为复杂^[4-5],流动不稳定性大大增加,易造成水冷壁超温或爆管,影响锅炉安全运行。作为火电设备发展的主流,超超临界发电机组具有容量大、蒸汽参数高、效率高等优点^[6-8],因此有必要对超超临界锅炉低负荷运行时的流动不稳定性进行研究。

本文采用一维单通道模型,建立了适用于超超临界锅炉低负荷运行工况下流动不稳定性分析的通用数值计算模型^[9]。该流动不稳定性数值计算程序以 Fortran 语言为基础,包括稳态计算和瞬态计算两部分,采用时域法对控制方程进行求解,能计算低负荷运行工况下不同几何结构及热工参数的超超临界锅炉的流动不稳定性。

为了对该程序在模拟超超临界锅炉低负荷运行流动不稳定性上的可靠性进行验证,将汽液两相流不稳定性的试验数据与相同初始计算参数下本程序的数值计算结果进行了比较,验证结果符合良好,表明该程序对流动不稳定性的模拟结果是合理和准确的,能够用于实际工程应用。基于验证基础,本文针对沁阳发电分公司超超临界锅炉水冷壁系统低负荷运行的部分典型回路,通过水动力计算对其流动不稳定性进行数值分析研究。

1 数学模型

为了计算不同布置形式的水冷壁的流动不稳定性,如水平布置、垂直布置、倾斜布置及上述的任意组合布置形式,本文采用单通道模型,该模型不仅考虑了不同水冷壁的布置形式,还考虑了水冷壁管类型、热负荷分布等因素。

1.1 基本假设

为简化模型,作如下假设:

- (1)采用一维模型,考虑压缩性;
- (2)只在径向进行换热,忽略轴向换热;

(3)在同一截面内工质温度和速度均匀分布,且只有轴向流动;

(4)忽略黏性耗散、动能和势能对能量方程的影响;

(5)低负荷工况运行压力下,汽液两相间处于热力平衡,两相区采用均相流模型来描述。

1.2 瞬态控制方程

(1)质量守恒方程

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: A 为管子内横截面积; t 为时间; M 为流体质量流量; z 为沿管长的轴向坐标。均相流模型假设两相流体流动时非常均匀,可以看作是具有平均流体特性的均质单相流体,汽液两相之间没有相对速度且处于热力平衡状态,因此两相流动的质量守恒方程与单相或超临界水流动的质量守恒方程相同。

对于两相流动,采用均相流模型描述时的平均密度按下式计算

$$\rho_m = \frac{\rho_L}{1 + x(\rho_L/\rho_G - 1)} \quad (2)$$

(2)动量守恒方程

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{M^2}{\rho A} \right) + A \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g A \sin \theta - \frac{M^2}{2\rho A} \left[\frac{\psi \lambda}{d_n} + k_{in} \delta_d(z) + k_{ex} \delta_d(z-L) + k_{jb} \delta_d(z-z_{jb}) \right] \quad (3)$$

式中: P 为流体压力; g 为重力加速度; θ 为流体流动方向与水平面的夹角; λ 为单相流体摩擦阻力系数; d_n 为管子内径; k_{in} 为进口阻力系数; δ_d 为一维狄拉克函数; k_{ex} 为出口阻力系数; L 为管子总长度; k_{jb} 为弯头局部阻力系数; z_{jb} 为管子弯头处的轴向坐标。

(3)能量守恒方程

$$A \frac{\partial (qh)}{\partial t} + \frac{\partial (Mh)}{\partial z} = q_l \quad (4)$$

式中: h 为焓; q_l 为线密度,代表单位管长水冷壁的吸热量。单相水在工质状态上为单一物质,且汽液两相混合物采用均相流模型描述,因此单相水流动的能量守恒方程与两相流动的能量守恒方程相同。

(4)状态方程

$$\rho = f(P, h) \quad (5)$$

质量、动量、能量守恒方程与状态方程构成了闭合方程组。

(5) 稳态控制方程。令瞬态控制方程的时间项为 0, 即可得到稳态控制方程, 此处不再给出。锅炉水动力计算过程涉及到大量水和水蒸气的热物理性质, 本文根据 IAPWS-IF97 标准进行计算。

2 数值方法

本文采用时域法^[10-11]求解离散方程。首先对稳态方程进行求解, 得到压力、流量、密度、焓等参数在各个节点的初始稳态值, 然后对稳态的计算结果施加一个热负荷扰动来计算锅炉在各时层的参数值。如果流量脉动的振幅随时间的变化越来越小, 则认为锅炉是稳定的。相反, 如果流量脉动的振幅随时间的变化越来越大, 则认为锅炉是不稳定的。如果流量脉动的振幅随时间作等幅振荡, 则说明锅炉临界稳定。

2.1 离散方法

控制体的划分采用同位网格, 将流体的物性参数, 如压力、焓、密度、流量等存储在控制体的中心。控制体划分方法如图 1 所示。

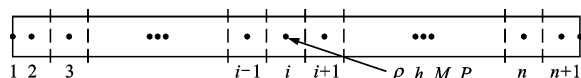


图 1 控制体划分示意图

采用控制容积积分法对控制方程进行离散。空间相采用一阶迎风格式^[12], 即界面线上的物性参数取来流方向上最后 1 个节点的值。时间相上采用全隐格式。

采用上述方法对瞬态控制方程进行离散, 得到下述瞬态离散方程。

瞬态质量方程

$$A \frac{\rho_i^{j+1} - \rho_i^j}{\Delta t} + \frac{M_i^{j+1} - M_{i-1}^{j+1}}{\Delta z} = 0 \quad (6)$$

式中: j 为时间变量, 代表上一时层; $j+1$ 代表当前计算时层; i 为空间变量, 代表第 i 个节点; Δt 为时间步长; Δz 为空间步长。

瞬态能量方程

$$A \frac{(\rho h)_i^{j+1} - (\rho h)_i^j}{\Delta t} + \frac{(Mh)_i^{j+1} - (Mh)_{i-1}^{j+1}}{\Delta z} = q_{li}^{j+1}$$

(7)

瞬态动量方程

$$\frac{M_i^{j+1} - M_i^j}{\Delta t} + \frac{1}{A \Delta z} \left[\left(\frac{M^2}{\rho} \right)_i^{j+1} - \left(\frac{M^2}{\rho} \right)_{i-1}^{j+1} \right] +$$

$$A \frac{P_i^{j+1} - P_{i-1}^{j+1}}{\Delta z} = - \frac{1}{2A} \left(\frac{M^2}{\rho} \right)_i^{j+1} \left[\frac{\psi_i^{j+1} \lambda_i^{j+1}}{d_n} + k_{in} \delta_d(z) + k_{ex} \delta_d(z-L) + k_{jb} \delta_d(z-z_{jb}) \right] - \rho_i^{j+1} g A \sin \theta \quad (8)$$

状态方程

$$\rho_i^{j+1} = f(P_i^{j+1}, h_i^{j+1}) \quad (9)$$

令上述瞬态离散方程中的时间项为 0, 即可得到稳态离散方程, 此处不再给出。

2.2 边界条件及数值计算求解步骤

基于单通道模型的边界条件为: 进口焓值已知且为常数; 进口压力已知且为常数; 进、出口压降为常数。

基于上述数值计算模型, 开发了以 Fortran 语言为基础的超超临界锅炉低负荷运行的水冷壁流动不稳定性的数值计算程序。该程序包括稳态计算和瞬态计算两个部分。

图 2 为程序计算流程简图。通过下述步骤的计算即可得到各个时层各个节点的流量值, 根据流量脉动的振幅随时间的变化趋势来判断锅炉的稳定性。

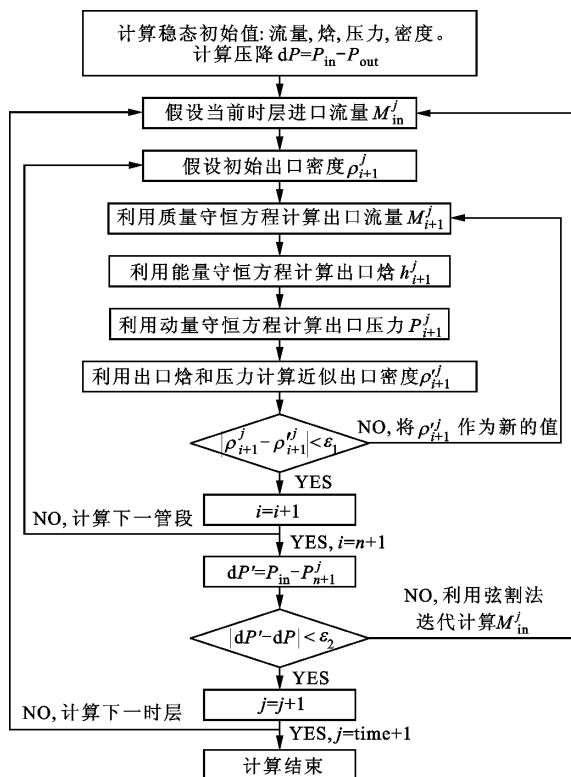


图 2 程序计算流程简图

2.3 计算模型验证

为了对该程序在模拟超超临界锅炉低负荷运行流动不稳定性上的可靠性进行验证, 将汽液两相流

不稳定性的试验数据与相同初始参数下本程序的数值计算结果进行了比较。

文献[13]的试验在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室的高温高压试验台上完成,试验回路如图 3 所示。其运行流程为:高位水箱中的去离子水首先经过滤器由高压柱塞泵升压后分两路,一路作为旁路系统,便于主回路压力和流量的调节,另一路经流量调节阀和流量孔板后进入预热段,加热到所需的进口温度。在本次试验中,预热段出来

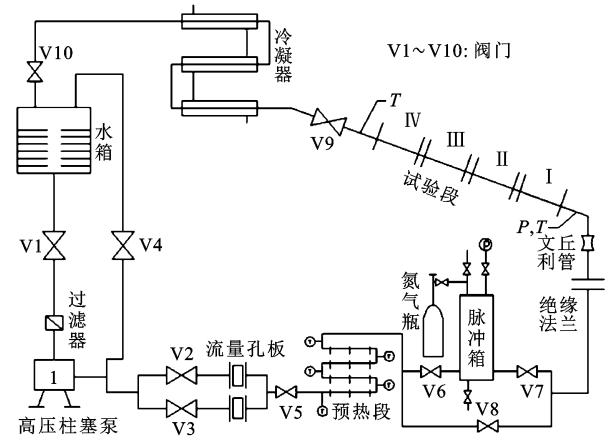


图 3 流动不稳定性试验系统图

的工质经脉冲箱或不经脉冲箱进入试验段,在试验段中被继续加热到汽化,从试验段出来的汽水混合物经冷凝器冷却后回到储水箱。

试验段由与水平成 20° 的倾斜上升 $\Phi 32\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的不锈钢管组成,试验段总共由 4 个加热段组成,每个加热段长为 3 m,各段均采用低电压大电流交流电直接对管子进行加热。试验中主要测量流动不稳定性发生时的压力、流量、压差的变化及其相互关系,从而为判断脉动发生的临界热负荷提供客观依据。

不稳定性试验^[13]初始计算数据如表 1 所示。

表 1 不稳定性试验初始计算数据

参数	数值		
	工况 1	工况 2	工况 3
进口压力 P_{in}/MPa	5	5	5
进口焓 $h_{\text{in}}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	1 009.07	826.77	826.77
进口流量 $M_{\text{in}}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	400	400	400
临界稳态热负荷 $Q_{\text{c}}/\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$	241	262	272

图 4 分别示出了 3 种工况下进口流量脉动的计算值与试验值^[13]的对比。

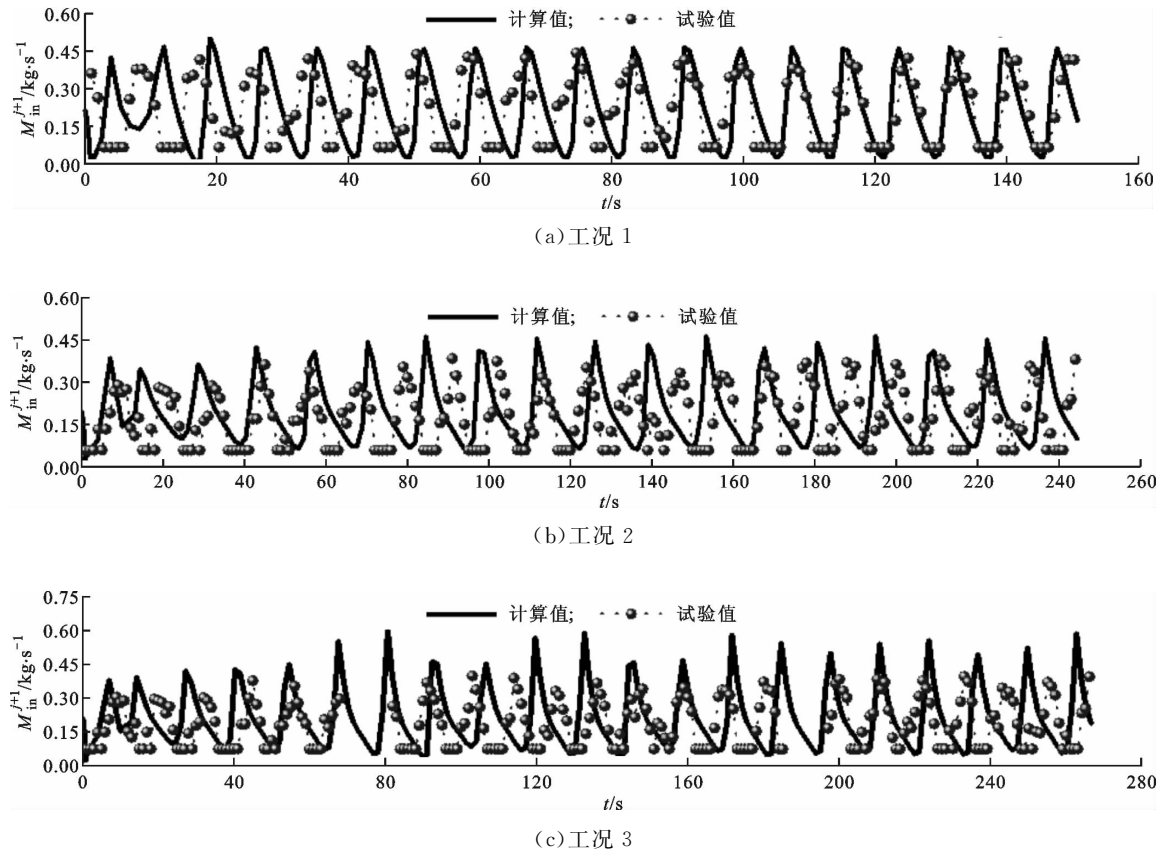


图 4 3 种工况下进口流量脉动的计算值与试验值^[13]的对比

由图 4 可以看出,本程序计算的进口流量与试验数据相比,脉动趋势及振幅相近,周期相差约 0.2~1.9 s,表明本文采用的数学模型和数值方法在模拟超超临界锅炉低负荷运行的流动不稳定性上是准确和可靠的。两组对照组计算结果也反映了临界热负荷及进口焓对流动不稳定性影响,其计算结果与试验结论及不稳定性理论一致。

在模拟两相流动不稳定性已具有可靠性的基础上,下面对沁阳发电分公司超超临界锅炉水冷壁系统低负荷运行的部分回路流动不稳定性进行数值计算,分析动态流动不稳定发生时热负荷对其动态流动不稳定性影响。

3 回路和管段划分及其计算参数

3.1 锅炉水冷壁情况

国家电投集团河南电力沁阳发电分公司 1 000 MW 机组锅炉为超超临界变压直流炉,型号为 DG3063.81/29.3-III,采用对冲燃烧方式、固态排渣、单炉膛、一次再热、平衡通风、露天布置、全钢构架、全悬吊结构 II 型布置。

炉膛宽度为 33 973.4 mm、深度为 15 558.4 mm。水冷壁下集箱标高为 7 500 mm,出口集箱标高为 75 500 mm。下炉膛管子数量为 778,上炉膛管子数量为 1 556。

3.2 回路和管段划分

组成锅炉水冷壁的管子之间存在着结构和热力偏差,本文将几何结构相似和热力偏差基本相同的管子划分为同一回路,认为回路各单管的热力参数、几何结构完全相同。

图 5 为管段划分示意图:沁阳发电分公司锅炉冷灰斗高 10 687.6 mm,划分 10 个管段;下炉膛螺旋管圈水冷壁高 35 764.3 mm,螺旋管倾角为 23.578°,划分 40 个管段,每个管段约长 2.57 m;上

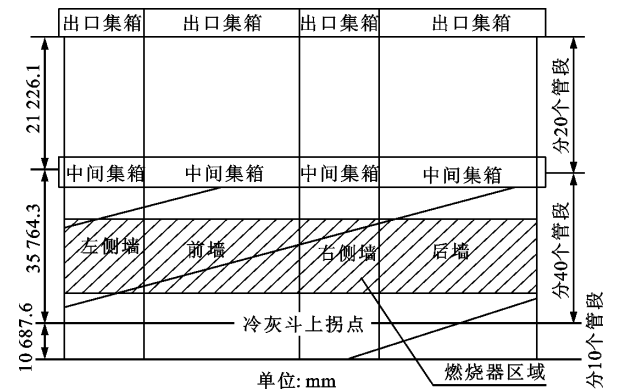


图 5 管段划分示意图

炉膛高 21 226.1 mm,划分 20 个管段,每个管段约长 1.06 m。其他各连接管作相应划分,管段长度在 1~2 m。

3.3 本文工况初始稳态计算参数

本文计算取锅炉 40% 额定出力负荷工况,表 2 给出了该低负荷运行工况下水冷壁运行的热力参数选取下炉膛前墙的最短管 9 回路及左侧墙最长管 32 回路及上炉膛受热最强管 107 回路为典型回路。已知较低流量工况下,水冷壁流动不稳定性发生概率增大,为保证计算结果与锅炉实际运行工况间有一定调节裕度,取流量因子为 0.9,分别计算分析 9 回路、32 回路、107 回路在本文工况下的流动不稳定性。9 回路、32 回路与 107 回路在本文工况下的初始稳态计算参数(取流量因子为 0.9)见表 3。

表 2 水冷壁运行热力参数

参数	数值
水冷壁流量/ $t \cdot h^{-1}$	1 078.37
入口温度/ $^{\circ}C$	307
入口压力/MPa	12.86
出口温度/ $^{\circ}C$	360
出口压力/MPa	12.27

表 3 本文工况初始稳态计算参数

参数	数值		
	9 回路	32 回路	107 回路
P_{in}/MPa	13.259 7	13.259 8	12.665 4
$h_{in}/kJ \cdot kg^{-1}$	1 379.7	1 379.7	2 495.1
P_{out}/MPa	12.703 9	12.707 4	12.492 4
$h_{out}/kJ \cdot kg^{-1}$	2 440.423	2 538.252	2 987.190
$M_{in}/kg \cdot s^{-1}$	0.340 5	0.354 1	0.136 8
L/m	106.557	116.555	21.226

4 计算无关性分析

在数值计算前必须进行网格无关性分析,以确保数值计算结果与时间步长和空间步长的无关性。

4.1 时间步长无关性分析

为了保证时间步长与空间步长的独立性,取空间步长为 0.05 m。基于汽液两相流不稳定性试验的“扰动法”思想,采用变步长计算,为了分析超超临界锅炉低负荷运行工况下的水冷壁流动不稳定性,需在计算出初始稳态参数后对 Q_s 施加一个热负荷扰动。为了更全面地分析本文工况下的流动不稳定性,设置稳态热负荷从 0~1 s 线性增加到 $1.1Q_s$ 、 $1.2Q_s$,并维持 10 s 不变,11 s 时阶跃回原值,之后

维持不变。由于施加扰动时间较短,因此取扰动段(即 0~11 s)符合计算收敛要求的最小时间步长,以保证计算结果的准确性。

下文取本文工况下 32 回路组数据($P_{in}=13.259\ 8\ \text{MPa}$, $M_{in}=0.354\ 1\ \text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, $h_{in}=1\ 379.7\ \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)对 11 s 后的时间步长进行无关性分析,其余组皆按此方法进行步长选择及计算,不再赘述。图 6 给出了 11 s 后不同时间步长对进口流量的影响,可知取时间步长为 1 s 时对计算结果没有影响。

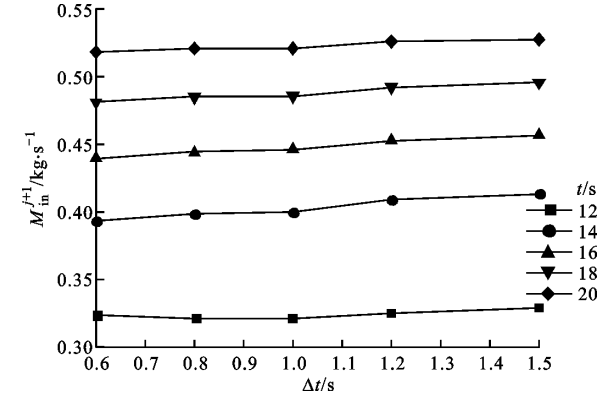


图 6 32 回路时间步长无关性分析

4.2 空间步长无关性分析

与时间步长无关性分析类似,为了确保空间步长与时间步长的独立性,取 11 s 后计算时间步长为 1 s。图 7 给出了 0~50 s 时不同空间步长对进口流量的影响,由图可知空间步长对计算结果影响很小,本文选取空间步长为 0.05 m。

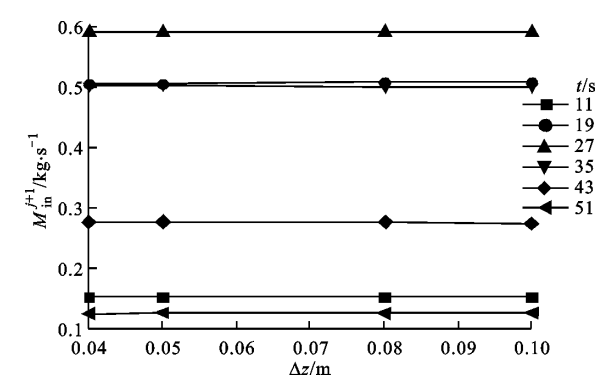


图 7 32 回路空间步长无关性分析

经上述分析可知,Δt 为 1 s(11 s 后)、Δz 为 0.05 m 的数值计算结果是网格无关的。假定热负荷分布均匀,水冷壁管被均匀划分为 2 331 个管段,节点数由进口时的 1 逐渐增加到出口时的 2 332。

5 典型回路计算结果及对比分析

对前墙的最短管 9 回路、左侧墙最长管 32 回路

及上炉膛受热最强管 107 回路 3 类典型回路进行稳定性分析。图 8~10 分别为本文工况下对 9、32、107 回路施加 1.1、1.2 倍热负荷扰动时的进出口流量脉动对比图。

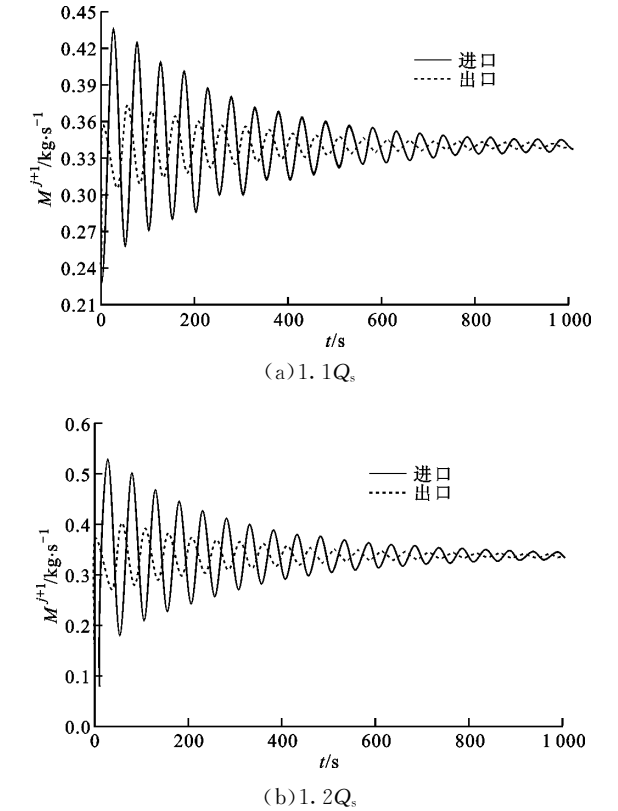
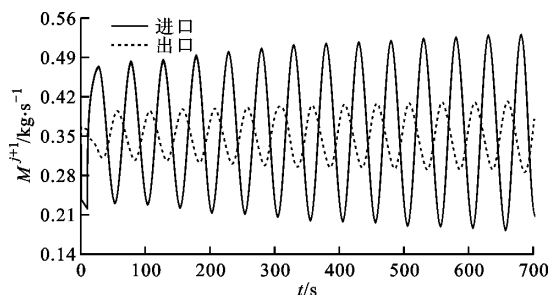
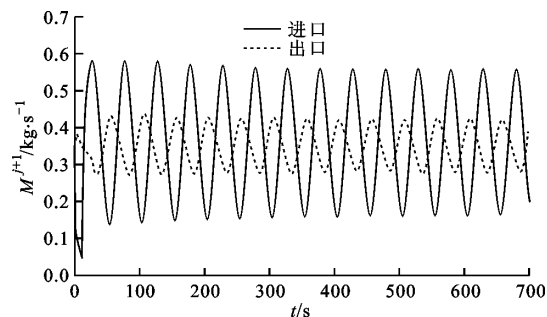
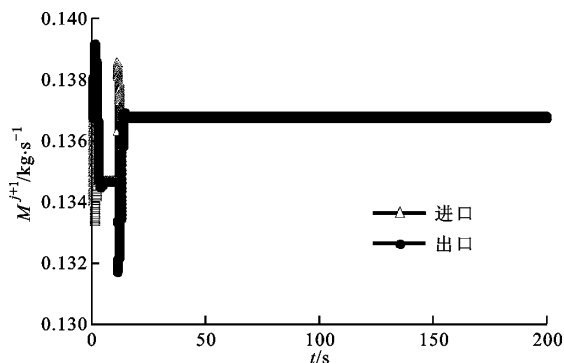
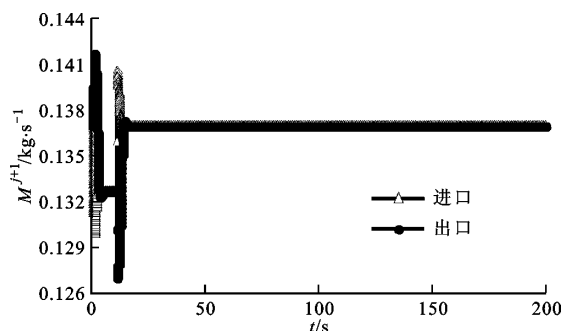


图 8 9 回路在 2 种热负荷扰动下的进出口流量脉动对比

本文以进出口流量经一段时间的衰减振荡后逐渐趋于同值作为判定流量达到稳定的标准。由图 8 可知:对前墙最短管 9 回路施加 1.1、1.2 倍热负荷扰动时,进出口流量脉动的振幅逐渐减小,700 s 左右进出口流量幅值衰减到最大幅值的 10%(1.1 倍热负荷扰动下进口流量振幅初始稳定值为 0.016 43 kg/s,1.2 倍热负荷扰动下进口流量振幅初始稳定值为 0.030 21 kg/s),此后相邻周期流量的衰减比均小于 1.2,流量脉动振幅较小且进出口流量逐渐趋于同值,这表明 9 回路流动是稳定的。施加热负荷扰动后,进出口流量随时间呈反相脉动,当进口流量增加时,出口流量减小,当进口流量减小时,出口流量增加;进出口流量脉动的振幅随时间逐渐减小直至消失,最终进出口流量相等,恢复到稳定状态。

由图 9 可知,对左侧墙最长管 32 回路施加 1.1、1.2 倍热负荷扰动时,1.1 倍热负荷扰动下的进出口流量呈发散趋势,1.2 倍热负荷扰动下的进出口流量均随时间作等幅振荡,流量脉动振幅较大(约为 0.400 27 kg/s)且进出口流量无同值趋势,表明

(a) 1.1Q_s(b) 1.2Q_s图9 32回路在2种热负荷扰动下的
进出口流量脉动对比(a) 1.1Q_s(b) 1.2Q_s图10 107回路在2种热负荷扰动下的
进出口流量脉动对比

该回路在1.1、1.2倍热负荷扰动下流动不稳定或处于临界稳定状态,流动不稳定性较高。

由图10可知:对上炉膛受热最强管107回路施加1.1、1.2倍热负荷扰动时,进出口流量脉动的振幅逐渐减小,20 s左右进出口流量恢复到稳态且为同值,振幅稳定值为0,表明107回路流动稳定且稳定性极高。随着热负荷扰动倍数的增加,进出口流量脉动的振幅也逐渐增加,但仍随时间逐渐减小直至消失,表明施加1.1、1.2倍热负荷扰动时,工况流动都是稳定的。

对比3种典型回路的进出口流量达到稳定值的时间可知,32回路稳定性最差,即其达到稳定的时间最长,9回路次之,107回路最快达到稳定。影响各典型回路稳定时间的因素主要为压降、进口流量、进出口焓、管道长度等因素,由表3可知,下炉膛9、32回路相应参数值差别很小,这是因为各回路均匀绕过热负荷高和低的区域,受热环境相同且较为均匀。相比而言,上炉膛107回路各计算初值除压降外,其余参数值与下炉膛两回路有较大差别,因此本文取线密度 q 综合进口焓 h_{in} 、出口焓 h_{out} 、管长 L 、进口流量 M_{in} 对各回路稳定性的影响进行分析,其公式如下

$$q = \frac{M_{in}(h_{out} - h_{in})}{L} \quad (10)$$

线密度即沿回路管长方向的热流密度,是判断系统不稳定性发生的关键因素,代入9、32、107回路各项数据可得其线密度分别为3.389、3.520、3.172 kW/m。线密度越大,进出口流量达到稳定所需的时间越长,脉动振幅越大,回路流动状态越不稳定。这是由于热流密度增强,回路内工质将因受热加速汽化使流阻增大,从而减少进口流量,但若流量持续减小致使管内流阻降低到一定值时,又会使流量向增大方向变化,形成流量循环增减变化的不稳定流动状态。

在该分析基础上,结合线密度值及本文的流动不稳定性计算结果,可对影响左侧墙最长管32回路达到稳定的压降、进口流量、进出口焓、管道长度等参数进行调整,为锅炉的设计及稳定运行提供有价值的参考及指导。

6 结 论

(1)建立了适用于超超临界锅炉低负荷运行工况下流动不稳定性分析的通用数值计算模型,并计算了低负荷运行工况下不同几何结构及热工参数的超超临界锅炉的流动不稳定性。将汽液两相流不稳定性的试验数据与相同初始计算参数下本文程序的

数值计算结果进行了比较,验证结果符合良好,表明该程序对流动不稳定性的模拟结果是合理和准确的,能够用于实际工程应用。

(2)对沁阳发电分公司超超临界锅炉水冷壁系统低负荷运行的部分回路的流动不稳定性进行了数值计算,分析了动态流动不稳定发生时热负荷对进出口流量振幅及其稳定时间的影响。结果表明,对前墙的最短管9回路、左侧墙最长管32回路及上炉膛受热最强管107回路,随着热负荷扰动倍数的增大,进出口流量脉动的振幅也逐渐增大。32回路稳定性最差,即其达到稳定的时间最长,9回路次之,107回路最快达到稳定。

(3)热负荷线密度越大,对应回路的流动状态越不稳定。结合线密度值及本文的流动不稳定性计算结果,可对稳定性表现较差的回路压降、进口流量、进出口焓、管道长度等参数进行调整,为锅炉的设计及稳定运行提供有价值的参考及指导。

参考文献:

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-7.
- [2] 葛学利,张忠孝,范浩杰,等. 热偏差和流量偏差对1 000 MW超超临界锅炉水冷壁壁温影响的研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2348-2357.
GE Xueli, ZHANG Zhongxiao, FAN Haojie, et al. Study on the effect of flame offset and flow deviation on wall water tube temperature of 1 000 MW ultra-supercritical boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2348-2357.
- [3] WANG Siyang, YANG Dong, ZHAO Yunjie, et al. Heat transfer characteristics of spiral water wall tube in a 1 000 MW ultra-supercritical boiler with wide operating load mode [J]. Applied Thermal Engineering, 2018(130): 501-514.
- [4] 曾俊,李文军,何洪浩,等. 超超临界压力锅炉垂直水冷壁壁温偏差试验研究[J]. 湖南电力, 2017, 37(3): 56-58.
ZENG Jun, LI Wenjun, HE Honghao, et al. Experimental study on the temperature deviation of lower water wall in the ultra supercritical boiler [J]. Hunan

Electric Power, 2017, 37(3): 56-58.

- [5] ZHANG T J, WEN J T, PELES Y, et al. Two-phase refrigerant flow instability analysis and active control in transient electronics cooling systems [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(1): 84-97.
- [6] 丘加友. 1 000 MW二次再热超超临界锅炉水动力及流动不稳定性计算分析[J]. 锅炉技术, 2018(1): 1-5.
QIU Jiayou. Computational analysis on hydrodynamic characteristics and flow instability of a 1 000 MW ultra-supercritical tower type boiler with double reheat cycle [J]. Boiler Technology, 2018(1): 1-5.
- [7] 郭宇朦,李会雄,张庆,等. 倾斜上升光管上母线处超临界压力水传热关联式的建立[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 72-77.
GUO Yumeng, LI Huixiong, ZHANG Qing, et al. Establishment of heat transfer correlation for the supercritical water flow near the upper generating line of an inclined upward smooth tube [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 72-77.
- [8] 曲默丰,梁梓宇,赵云杰,等. 低质量流速光管内超临界水传热特性的实验与数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(7): 52-59.
QU Mofeng, LIANG Ziyu, ZHAO Yunjie, et al. Experimental and numerical investigation on heat transfer characteristics of ultra-supercritical water in smooth tube with low mass flux [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(7): 52-59.
- [9] 上海发电设备成套设计研究所. 电站锅炉水动力计算方法: JBZ201—83[S]. 北京: 机械工业出版社, 1983: 61-66.
- [10] CHATOORGOON V. Stability of supercritical fluid flow in a single-channel natural-convection loop [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(10): 1963-1972.
- [11] XIONG T, YAN X, HUANG S F, et al. Modeling and analysis of supercritical flow instability in parallel channels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57(2): 549-557.
- [12] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2011: 140-141.
- [13] 杨冬,黄开健,朱晓静,等. 1 000 MW超超临界压力锅炉水冷壁水动力不稳定性试验研究[R]. 西安: 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 2006.

(编辑 荆树蓉)