

# 舰船中压锅筒式锅炉蒸发系统运行特性及仿真

(华东船舶工业学院, 江苏省 镇江市 212003) 姚寿广 朱宽仁<sup>1)</sup> 朱德书 周剑平

**摘要:** 从对象工作过程的机理特点及基本物理方程出发, 建立了舰船中压锅筒式锅炉启动及变工况运行过程的分析模型, 开发了能够仿真舰船中压锅筒式锅炉从点火到蒸汽参数达到额定状态的启动全过程以及蒸发系统动态特性变化的软件。通过对某舰船锅炉蒸发系统运行特性的分析, 表明所建模型及开发的软件可为舰船锅炉设计和运行提供有价值的指导性意见。

**关键词:** 锅炉; 运行特性; 仿真

中图分类号: U664.111; TP391.9 文献标识码: A

## 1 前言

系统动态特性及仿真技术作为锅炉设计改进及运行控制的一种有效手段, 已在国内外得到高度重视, 就目前仿真技术研究现状看, 陆上电站锅炉的研究和发展十分迅速<sup>1~3</sup>, 但对工作条件特殊及机动性能要求很高的舰船锅炉, 现有的仿真研究结果难以直接加以引用, 必须针对舰船锅炉自身所具有的特殊性, 建立相应的运行过程的分析模型和仿真软件进行研究。

本文针对舰船锅炉包括锅筒在内的蒸发系统的工质参数变化特点, 通过建立及求解锅筒式锅炉工质侧及金属壁蓄热所遵循的数学模型, 开发了能够模拟计算舰船中压锅筒式锅炉启动及变工况运行的仿真软件。并用该软件对某舰船 110 t/h 主动力锅筒式锅炉进行了仿真计算。

## 2 数学模型

锅炉蒸发系统内工质状态随位置和时间而变化, 严格说来它是一个分布参数系统, 精确建模不仅十分复杂, 而且求解十分困难, 为此本文的建模采用了分区集总参数法, 即把整个系统分成若干区段进行建模分析。

### 2.1 启动过程数学模型

根据锅炉启动过程特点, 认为整个蒸发区内部工质基本不流动, 可将蒸发区简化为一个吸收热量的大容器, 再加上进出口。其简化物理模型如图 1 所示。

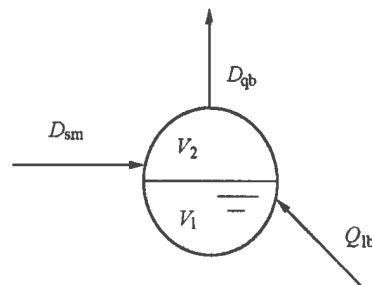
对物理模型进行数学描述时, 进行以下简化假设:

(1) 蒸发区为一集总参数模型, 内部各点工质的热力参数相同, 且同步变化;

(2) 压力超过 0.1 MPa 时, 蒸发区内部的工质为汽液两相共存的饱和工质;

(3) 蒸发区部分的金属温度与工质温度相同, 且与工质温度同步变化;

(4) 在某一燃烧工况下烟气侧的热流密度视为常数, 但不同燃烧工况下, 其值也不同。



基于以上假设即可通过连续方程、能量守恒方程、容积方程和温度变化方程建立起描述启动过程的数学模型<sup>[4]</sup>

### 2.2 动态过程数学模型

根据舰船锅炉的运行特点及仿真要求, 建立如图 2 所示简化的物理模型。

$D_{pb}$ —蒸汽流量, kg/s

$D_{sm}$ —来自经济器的给水量, kg/s

$V_1$ —蒸发区中水的容积,  $m^3$

$V_2$ —蒸发区中蒸汽的容积,  $m^3$

$Q_{1b}$ —蒸发区接收烟气侧的热流, kJ/s

图 1 蒸发区简化物理模型图

建模简化和假设:

(1) 在建模时, 将整个蒸发区划分为下降管、水冷壁金属、水冷壁内工质和锅筒 4 个环节。下联箱包括在下降管内计算;

(2) 蒸发区任何部分水的密度都按饱和水的密

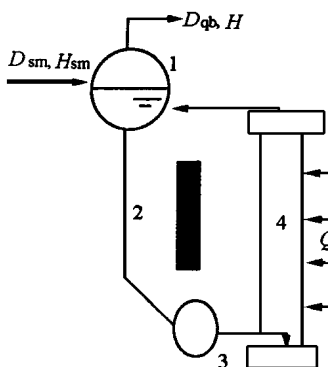


图 2 锅炉蒸发区示意图

度计算;  
 (3) 由于压力的变化比较迅速,因而将压力的变化与温度的变化分开处理,整个蒸发区的压力用一集总参数表示;  
 (4) 水冷壁金属的稳态温度用壁内外表面温度的算术平均值;

(5) 经济器来水不带蒸汽,且进入上锅筒后与饱和工质充分混合;  
 (6) 每个环节都以出口值代表其集总参数,参数的下标为各环节的符号。  
 (7) 因烟温与水冷壁管的温度水平相差极大,

所以即使壁温随着管内工质的温度有所变化,它对烟气的热辐射几乎是没有影响的。因此在负荷发生变化时,将烟气侧的工况作为常数处理。

根据以上建模简化和假设可得到动态变化过程的分区数学模型<sup>[4]</sup>。

根据分区数学模型,推导压力随时间变化公式得到:

$$\frac{dP_{qb}}{d\tau} = \frac{1}{I_{qb0}} [D_{sm}(\epsilon_1 - H_q) - D_{qb}\epsilon_2 + D_{lb}X_{lb}r] \quad (5)$$

其中:  $I_{qb0}$  为整个蒸发区的热惯性;  $X_{lb}$ 、 $D_{lb}$  分别为水冷壁出口工质干度及流量;  $r$  为汽化潜热;  $\epsilon_1 = (\rho^1 - r)/(\rho^1 - \rho^{11})$ ;  $\epsilon_2 = \rho^1 r/(\rho^1 - \rho^{11})$ ;  $\rho^1$ 、 $\rho^{11}$  分别为水和蒸汽的密度;  $H_q$  为蒸汽焓。

将蒸发区内的蒸汽分为水位以上和水位以下两部分,根据质量平衡和几何关系得出上锅筒中水位变动计算式:

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{D_{sm} - D_{qb} - D_x + D_{lb}}{F_b(\rho^1 - \rho^{11})_0} - \left[ \frac{V^1 \frac{\partial \rho^1}{\partial P} + V^{11} \frac{\partial \rho^{11}}{\partial P}}{F_b(\rho^1 - \rho^{11})_0} \right]_0 \times \left( \frac{dp_{zf}}{d\tau} \right) + \frac{1}{F_b} \left( \frac{dV_x^{11}}{d\tau} \right) \quad (6)$$

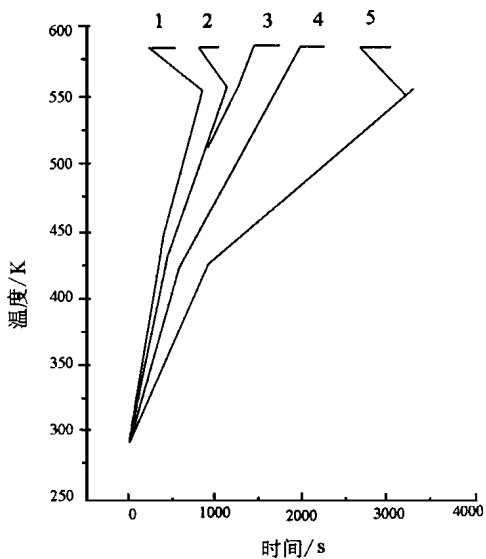


图 3 温度随时间变化图

公式中  $F_b$  为上锅筒中水位面的面积;  $V_x$  为上锅筒水面下含汽容积。该式第一项表示进出上锅筒的工质水位的影响; 第二项表示锅筒中压力变化

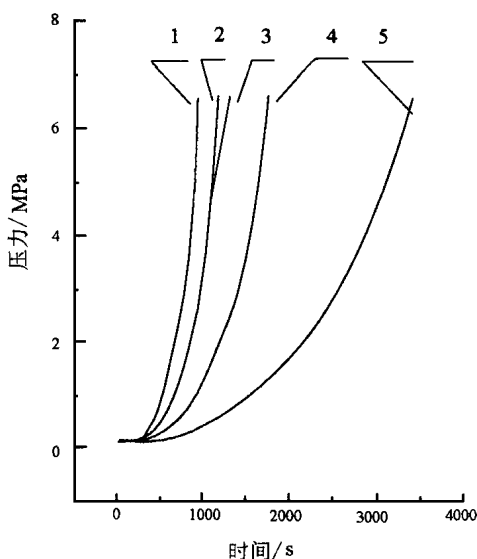


图 4 压力随时间变化图

变工况动态特性的数学模型,进一步针对舰船锅炉动态变化剧烈且范围较大,工质热力参数变化较为明显,在数学模型中考虑了不同温度下的变

对水位的影响,压力变化对水位的影响与上锅筒中压力的大小以及上锅筒中水和蒸汽的相对容积的大小有关; 第三项表示上锅筒水下蒸汽容积的影响。公式(5)(6)中各项的具体计算详见文献<sup>[4]</sup>。

### 2.3 仿真模型的建立

上述方程组成的描述舰船中压锅筒锅炉启动及

在此基础上运用四阶龙格-库塔方法作为仿真算法建立了仿真模型,开发了相应的仿真软件,它能对舰船锅炉进行静态热力计算、启动过程及动态特性仿真分析。

### 3 启动及变工况仿真分析

### 3.1 启动工况模拟

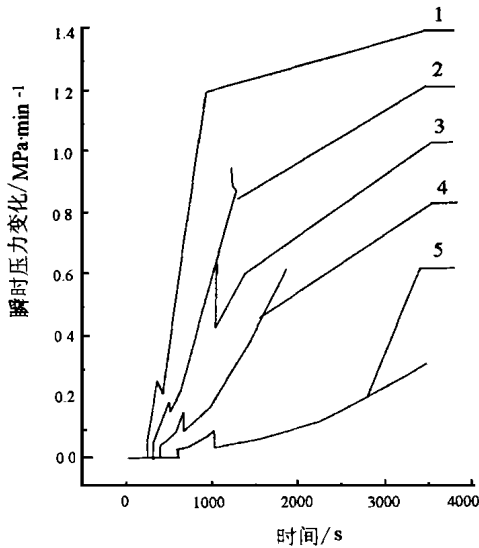


图 5 瞬时升压速度随时间的变化图

锅炉启动以最终达到额定状态为终点时刻。由于燃烧情况不同，启动过程中蒸发区吸入的热量也不同，因而启动过程的快慢也不同。本文

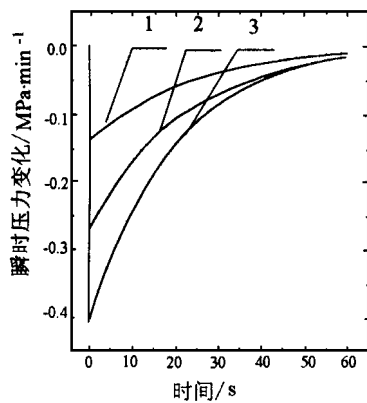


图 6 瞬时压力变化速度随时间的变化值

根据不同的启动初始情况，分别模拟了锅炉燃烧相当于 10% 负荷到 25% 负荷时锅炉内部工质参数随时间变化的情况，其启动过程根据启动的一般规范进行。图 3、4、5 中曲线 1、2、4、5 分别对应 25%、20%、15%、10% 燃烧负荷下的仿真结果。从图中看出，锅炉启动时温度是近于线性上升的，而压力的变化近于指数上升。对本课题所研究的对象 110 t/h 舰船锅筒式锅炉，在应急启动状态，其瞬时升压速度最终可达 1.228 MPa/min，而一般启动时，虽然锅筒的最大升压速度

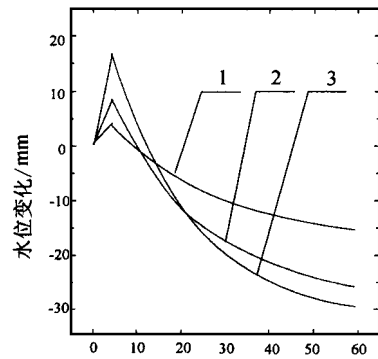


图 7 水位随时间的变化值

仅为 0.325 MPa/min，但其启动时间却需约 1 小时左右。在兼顾启动过程安全可靠性及舰船的机动性

下，本文设置 0.65 MPa/min 为最大升压速度启动限制，得到一条最佳启动曲线，如图 3、4、5 中的曲线 3 所示。

### 3.2 动态负荷变化模拟

动态仿真时，从 40% 负荷开始，直至 100% 负荷，分别模拟锅炉负荷阶跃变化 10%、20%、30% 时，锅炉上锅筒内部工质参数在一定时间内的变化情况。模拟的参数包括上锅筒内部的水位、温度、以及瞬时压力在一定时间内的变化。限于篇幅，现给出一组瞬时压力变化速度及水位变化模拟结果如图 6、7 所示，图中 1、2、3 三条曲线分别表示 70% 负荷时外界负荷发生 10%、20%、30% 阶跃变化时，蒸发区上锅筒内工质各参数随时间变化时的仿真曲线。

从图 6 看出，在外界负荷发生变化的起始阶段，由于压力的变化反应比较迅速，所以瞬时压力变化速度发生突变，突然下降。以后，随着压力的逐步降低，它与背压之间的压差变小，出口流量降低，所以压力的瞬时变化也逐渐变小。相对不同外界负荷变化，压力变化的速度也不一样，瞬时最大压力变化与负荷变化成正比。背压不同，其变化时间也不一样，其趋势是压差越大，变化时间越长。

从图 7 看出，水位的变化与压力的变化趋势相同，负荷变化幅度越大，则水位的变化幅度就越大。在负荷变化的初始阶段，水位首先上升，此水位为虚假水位<sup>[1]</sup>。由于不同负荷时，自然循环锅筒式锅炉蒸发区的循环倍率  $K$  是不一样的，工质的循环流速也不一样。考虑流速的影响，在锅炉初始负荷不同时，虚假水位到达最高水位的时间也不一样，初始负荷越大，工质的循环流速越快，水位到达最高点的时间就越短，以后随着上锅筒进出口流量的不平衡，上锅筒水位逐渐下降。

从不同初始负荷仿真结果还可以看出，锅炉的初始负荷越低，在外界负荷发生同样幅度的变化时，上锅筒内部工质的参数变化幅度也就越大，因而在锅炉负荷较低时，它对外界负荷的变化反映也就更敏感。当考虑锅炉出口流量与压差成正比时，工质的各项参数均具有自平衡能力。如果背压不同，其压差也就不同，因而工质达到稳定状态的时间也就不一样。如果不考虑压差对出口流量的影响，那么水位在出现虚假水位以后，几乎是呈线性下降的，随着时间的延续，水位可能出现过度下降。这对锅炉的上锅筒来说是极其危险的，所以此种情况要引起注意。

# 四角切圆燃烧炉内颗粒湍流扩散数值模拟

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001) 王春刚 朱群益 吴少华 秦裕琨 尹向梅<sup>1)</sup>

**摘 要:** 基于四角切圆燃烧锅炉炉内湍流流动各向同性的假设, 得出炉内各点的特征频率。同时采用特征频率—频谱随机轨道模型及随机轨道模型对炉内颗粒的湍流扩散进行了数值模拟。计算结果表明, 特征频率—频谱随机轨道模型更能反映出颗粒湍流扩散中受涡结构影响的特征, 更接近实验结果。

**关 键 词:** 锅炉; 气固两相流; 紊流扩散; 数值模拟

中图分类号: TK224.1; O357.5<sup>+</sup>3 文献标识码: A

## 1 问题的提出

气固两相流动数值模拟的关键在于颗粒相的模拟。目前应用较多的是随机轨道法。文献[1]认为一般的随机轨道模型未能考虑到各个湍流涡团不同的脉动频率、频谱、振幅和方向性。脉动频谱随机轨道模型, 即用随机的傅利叶级数来模拟气流的湍流脉动速度。文献[2~3]提出了通过对湍流脉动的特征频率和频率谱分析, 构造湍流频率谱分布函数, 借用频率谱指数的分数维特性, 确定频率谱函数, 结合湍流描述理论, 以湍流平均值计算特征频率, 建立脉动速度与研究对象特征频率之间的联系, 从而模拟颗粒的脉动速度, 给我们提供了新的思路。

收稿日期: 1999-05-27; 修订日期: 1999-06-09 1) 哈尔滨锅炉厂

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(96-A19-01-01)及清华重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 王春刚(1972-), 男, 黑龙江杜尔伯特人, 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院博士研究生。

## 4 总结

本文所建立的数学模型和开发的能够模拟计算舰船中压锅筒式锅炉启动及变工况运行的仿真软件对某舰船 110 t/h 主动力锅筒式锅炉进行了仿真计算。计算结果与舰船式锅筒锅炉一般实际运行数据比较相符, 表明所建立的模型及开发的软件可为舰船锅炉设计和运行提供有价值的指导性意见。

## 2 特征频率—频谱随机轨道模型

在拉格朗日坐标系下, 煤粉颗粒瞬时的动量方程为:

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = \Sigma F \quad (1)$$

式中  $m_p$ 、 $V_p$ 、 $t$ 、 $F$  分别为煤粉颗粒的质量、速度、运动时间及所受到的力。由文献[1]对煤粉颗粒在炉内较典型的流动情况下各种力的数量级关系分析结果可知, 冷态炉内流动模拟过程中可以忽略颗粒的浮力、Magnus 力、压力梯度力、Saffman 力以及虚假质量力等。这样, 单位颗粒质量的动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{du_p}{dt} &= \frac{1}{\tau_r} (u_g + u'_g - u_p) \\ \frac{dv_p}{dt} &= \frac{1}{\tau_r} (v_g + v'_g - v_p) - g \\ \frac{dw_p}{dt} &= \frac{1}{\tau_r} (w_g + w'_g - w_p) \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $u_p$ 、 $v_p$ 、 $w_p$  为颗粒的瞬时速度,  $u_g$ 、 $v_g$ 、 $w_g$  为气相流场的时均速度,  $\tau_r$  为颗粒运动的驰豫时间;  $u'_g$ 、 $v'_g$ 、 $w'_g$  是气相流的脉动速度。

颗粒湍流扩散的数值模拟关键在于气相脉动速度的模拟, 从而体现各个湍流涡团不同的脉动频

## 参考文献:

- [1] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [2] 唐世林. 电站计算机仿真技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] 韩璞, 刘长良, 李长青. 火电站仿真机原理及应用[M]. 天津: 天津科技出版社, 1998.
- [4] 周剑平. 舰船锅炉动态特性研究及仿真[D]. 江苏镇江: 华东船舶工业学院, 1998. 3.

(复 编辑)

舰船中压锅筒式锅炉蒸发系统运动特性及仿真= **Operating Characteristics and Simulation of the Evaporating System of a Naval Medium-pressure Drum Boiler** [刊, 汉] / YAO Shou-guang, ZHU De-shu, ZHOU Jian-pin (Eastem China Marine Engineering Institute, Zhenjiang, Jiangsu, China, Post Code: 212003), ZHU Kuan-ren (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 399 ~ 402

Based on the mechanism features of the work process of a targeted object under investigation and its basic physical equations the authors have set up an analytical model for the start-up and off-design operating process of a naval medium-pressure drum boiler. A software has been developed, which can simulate the whole start-up process of the above-cited naval boiler, beginning from its ignition up to the steam parameters attaining a rated power, as well as the variation of the dynamic characteristics of its evaporating system. An analysis of the operation characteristics of the boiler evaporating system indicates that the established model and the software developed along with it can provide valuable reference data and materials for the design and operation of the naval boiler under discussion. **Key words:** boiler, operating characteristics, simulation

四角切圆燃烧炉内颗粒湍流扩散数值模拟= **Numerical Simulation of Particle Turbulent-flow Diffusion in a Tangentially Fired Boiler Furnace** [刊, 汉] / WANG Chun-gang, ZHU Qin-yi, WU Shao-hua, QIN Yu-kun (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001 // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 402 ~ 404

On the basis of a hypothesis that the turbulent flow in a tangentially fired boiler furnace assumes an isotropic character obtained is the eigenfrequency of various points within the furnace. Meanwhile, a numerical simulation has been conducted of the turbulent flow diffusion of the in-furnace particles with the use of the eigenfrequency - frequency spectrum stochastic trajectory model and a stochastic trajectory model. The calculation results indicate that as compared with experimental results the eigenfrequency-frequency spectrum stochastic trajectory model has been found to produce results reflecting better the effect of the in-furnace eddy on the particle turbulent-flow diffusion. **Key words:** boiler, gas-solid dual-phase flow, turbulent flow diffusion, numerical simulation

500 MW 超临界压力直流锅炉机组实时仿真数学模型= **Mathematical Model of Real-time Simulation for a 500 MW Supercritical-pressure Once-through Boiler** [刊, 汉] / XU Er-shu, LI Shu-kang (Northeast University of Electrical Power Engineering, Baoding, Hebei, China, Post Code: 071003), MA Gang (Baoding Electrical Power Bureau, Baoding, Hebei, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 405 ~ 407

The authors have set up an algorithm for in-furnace heat transfer and algorithms for various in-boiler processes. These algorithms have been prepared on the basis of an analysis of the structure and properties of a 500 MW supercritical-pressure once-through boiler and in compliance with the mass, energy and momentum conservation law. In addition, by the use of a modularized model building technique, set up is a mathematical model of real-time simulation for a Russian-made 500 Mw supercritical-pressure once-through boiler. With the help of the above-cited model it is possible to accurately simulate the static and dynamic characteristics of any specific boiler units. **Key words:** once-through boiler, real time simulation, simulation

变频调速装置在电站锅炉辅机上的应用= **The Application of a Frequency Conversion-based Speed Regulation Device in Utility Boiler Auxiliaries** [刊, 汉] / PIAO Yun-feng, SUN Xu-ping, ZHANG Yu-hui (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 408 ~ 409

Described in this paper are the working principles, specific features and prospects of development of frequency conver-