.

35t/h沸腾锅炉的动态数学模型及其数字仿真

方 琦(东方电站成套设备公司)

徐盛仪(重庆大学热力工程系)

[提要]本文通过机理分析建立了 DG35/39-7 型锅炉的分段集中参数数学模型,并在数字计算机上进行了仿真,将得到的主要阶跃响应曲线与现场相同型号沸腾锅炉的试验 结果进行 了比较和 分析。表明所建模型是正确的。仿真结果可用于这种型号沸腾锅炉自动控制系统的 设计及参 数整 定时参考。

主题词 沸腾锅炉 动态模型 数字模型

前 言

用建立数学模型的方法来研究锅炉的动态特性与现场测试的方法相比,它不影响现场生产,且无试验中的各种随机干扰和危及设备安全的可能。对设计阶段的新锅炉,则可通过其数学模型来预测锅炉的动态特性,对设计控制系统具有指导作用,对已运行的锅炉,可通过数学模型来进行控制系统的参数整定,或对其控制系统进行评价。

应用机理分析法研究常规电站锅炉的动态特性已比较成熟^[1,2],但对沸腾锅炉而 言,因其燃烧和传热机理与常规锅炉有较大 区别,且对于这些机理的研究目前尚不完 善,所以国内外在沸腾锅炉的动态特性研究 方面还非常欠缺^[3]。本文除采用常规电站 锅炉建立模型的理论技术外,还对沸腾锅炉 特有的埋管数学模型作了特殊处理。

一 对象简介及物理模型的简化 建立模型的对象是东方锅炉厂设计制造 的35t/h 沸腾锅炉,它装在永荣矿务局发电 厂已正常运行,并通过了国家产品鉴定。该 锅炉本体示意图见图1。



图 1 锅炉本体简图 1.风室 2.排渣管 3.沸腾床 4.埋管 5.炉膛 6.水冷壁 7.高温段过热器 8.低温段过热器 9.汽包 10.飞灰粗分装置 11.省煤器 12.空气预热器

应用机理分析法建立沸腾锅炉动态数学 模型的难点在于其双相蒸发区。这种型号沸

業稿日期: 1988-11-07 ?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1989年

1

ţ

腾锅炉的水循环系统有四个不同的循环回路。为了使所建数学模型不致于过于复杂, 根据工质的受热情况,将其水循环系统简化 为两个循环回路,即一个循环回路包括埋管 受热面,另一回路将两侧墙及后墙水冷壁合 并。

在动态响应过程中,蒸汽和烟气的参数 都是时间及其流程的函数。应以偏微分方程 来描述锅炉的动态特性,但由于锅炉本身的 庞大和复杂,这种模型难以求解。本文则是 采用集中参数近似地代替分布参数,为提高 其精度,把整个锅炉分成若干区段,然后分 别作集中参数处理,即该区段中蒸汽和烟气 的参数仍是时间的函数。

本文依据锅炉结构,汽水侧分成:省煤 器、汽包、下降管 I 和 Ⅱ、埋管、水冷壁 I 和 Ⅱ、低温段过热器、面式减温器和高温段 过热器等十个区段。

按烟气的流程,烟气侧也分成:沸腾床 悬浮段,高温段过热器,低温段过热器和省 煤器等五个区段。

分段时忽略了空气预热器出口热空气温 度变化时对炉膛烟温的影响,因而省略了空 气预热器模型。

工质侧的简化模型如图2所示。



图 2 工质侧简化模型图 1.省煤器 2.汽包 3.下降管 I 4.下降管 I 5.埋管 6.水冷壁管 I 7.水冷塑管 I 8.低温段过热器 9.面 式减温器 10.高温段过热器

集中参数的选择按有限差分法,从各区 段出口处参数为其代表参数。

为使模型既合理又不致过于复杂,建立

模型时作了以下简化假设:

1. 沸腾床温均匀一致;

2. 流过沸腾床任一横断面的流体均匀 一致;

 然料量扰动时空气量成比例调节, 烟道各处漏风量不变。

 4. 锅炉水冷壁为幅射吸热,省煤器为 对流吸热;

5. 省煤器和整个蒸发系统的金属壁温 与工质温度同步变化;

6. 忽略烟道的热惯性及热容量;

7. 除沸腾床以外,烟气侧按比例环节 处理。

二 模型建立及线性处理

由于沸腾床床料的热惯性及热容量很 大,并且为了抓住沸腾炉的特点,单独对沸 腾床建立模型。工质侧按各区段受热方式, 可以分为如下几个环节:(1) 埋管 受热 面;(2) 幅射受热面,(3) 对流受热 面;(4) 炉外不受热连接管;(5) 面式减 温器。

上述序号(2)~(5)各类环节的基本 方程已经由文献多次引用,例如:文献[1]

> 〔4〕对汽包锅炉的模型建立过程 作了比较详细的介绍。这里主要 介绍沸腾床和埋管受热面的模型。

1. 沸腾床: 取沸腾床为一 控制体。

质量守恒方程:

 $m_c + m_a - m_d - m_f - m_g$

$$=\frac{d}{dt}(G_s+G_g) \tag{1}$$

能量守恒方程:

 $m_c C_c T_c - (m_d + m_f) C_s T_b$ $+ m_a C_{Pa} T_a - m_a C_{Pa} T_b$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2)

$$+ m_{c}Q_{d} - q_{i} = \frac{d}{dt} [(G_{s}C_{s} + G_{g}C_{Vg})$$
$$T_{b}] \qquad (2)$$

式中: ma, ma, ma, ma, mg 分别为燃料, 空气,排渣,飞灰及烟气的质量流量。

G., G. 分别为控制体内固体和 气体的 质量。

 C_{c} , C_{s} , C_{pa} , C_{pg} , C_{Vg} 分别为燃料, 床料粒子的平均比热、空气和烟气的定压比 热,以及烟气的定容比热。

T., T., T., 分别为燃料, 沸腾 床及送 风温度。

Q₄, q_i 分别为燃 料发热值和沸腾床传 给埋管的热量。

2. 埋管受热面:

质量守恒方程:

$$m_i - m_0 = V \frac{d}{dt} \rho_0 \tag{3}$$

能量守恒方程:

$$m_{i}h_{i} + q_{i} - m_{0}h_{0} = V \frac{d}{dt}(\rho_{0}h_{0})$$
 (4)

金属蓄热方程:

$$q_{b\,i} - q_{\,i} = GC \frac{d}{d\,t} T_{\,m} \tag{5}$$

床料对埋管的放热方程: $q_{bi} = K_b A (T_b - T_m)$ (6)

放热系数方程:
$$K_{L} = \mathcal{L}(\alpha_{-L} + \alpha_{L})$$
 (7)

$$\mathbf{X}_{b} = \mathbf{S}(\mathbf{x}_{t} + \mathbf{x}_{t})$$

j

٠.

$$a_{rh} = f(m_c, T_b, d_{de}, \gamma_g, \gamma_y, \gamma_{dj})$$
 (8)
幅射放热系数方程:

$$a_{I} = f(T_{b}, T_{m})$$
(9)
动量守恒方程:

$$P_{i} - P_{0} = \left(\frac{fL}{d} + 1\right) \frac{m_{0}^{2}}{2g\rho_{0}A^{2}_{f}} + \frac{1}{2}L_{i'}(\rho_{i} + \rho_{0}) + \frac{1}{gA^{2}f}\left(\frac{m_{0}^{2}}{\rho_{0}} - \frac{m_{i}^{2}}{\rho_{i}}\right) + \frac{L}{gA_{f}}\frac{d}{dt}m_{0}$$
(10)

式中: m, p, h, P, 分别为工质流量、压 力、焙、密度。

V, *A*, *A*, *L*, *L*, *G* 分别为本 段容 积,传热面积,流通面积,流程,垂直高度 及金属重量。

 q_{bi} , q_i 分别为沸腾床的放热和工 质的 吸热。

T_b, T_m分别为床温和金属壁温。

d_{de}, C, Y_o, Y_y, Y_{di} 分别为 床料粒子 韵平均当量直径,金属比热,床料粒子比 重,烟气比重和床粒堆积比重。

另外还有工质的状态方程和沸腾床燃料 侧的一些关系式。

将基本方程进行线性小扰动差分并引入 各变量的无因次量,经过整理,得到各区段 的线性集中参数模型方程[4]。为了得到锅 炉的动态响应,应将各区段的数学模型按工 艺流程联接起来, 求解整个锅炉 的 动 杰 特 性。在方程中有许多变量是中间变量,如果 这个变量不需要作为观察量,就将其消去, 从而减少一个方程,矩阵的阶段就降低一 继,这样可以大大节省计算机的存储器。

研究所得到的微分方程,发现某些方程 信微分项系数很小,即时间常数很小,这是 设备中惯性很小的环节在数学模 型 中 的 反 映。可以采用大系数简化中的奇异摄动 法[5]进行简化,略去小参数,这样做的目 的不仅仅是减少了微分项的个数,更主要的 是系统病态的程度得到了大大的改善, 便于 : 求解。

数字仿真结果 =

采用快速数字仿真的方法求解锅炉的模 型方程组是用FORTRAN 语言编写的仿真程 序在IBM—FC机上实现的。

利用任何数值计算方法,计算步长的选 取都十分关键, 它影响着计算的稳定性、计 算精度和计算过程的时间。采用倍增步长与

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定步长相结合的方法既能加快计算速度,节 省机时,又能满足一定的精度要求。

· 42 ·

仿真的主要内容是在额定负荷下,对燃料量,给水流量,减温水流量及锅炉负荷分 别作10%的阶跃扰动,以相对变化量(无因 次量)的形式描述有关参数的变化过程。

1. 燃料量扰动10% (见图3)



由于沸腾床的热容量很大,虽然燃料量 增加了10%,但它占整个沸腾床内燃料的份 额却很小,而且新加入燃料的混合,干燥、 着火与燃烧还有一段过程。因此,大约有三 分钟的纯迟延后,床温才开始上升。床温变 化后,汽压,汽温及过温蒸汽流量才随之变 化。这些阶跃响应曲线的特点是:带纯迟延 的高阶惯性环节。

2。 给水流量阶跃扰动10%

给水流量阶跃扰动下的动态响应曲线见 图4。它们与常规锅炉相同,水位阶跃响应 曲线的放大图见图5所示,由图可知,水位 容积迟延时间约为16秒。

3. 减温水流量阶跃扰动10%





图 5 水位阶跃响应曲线

扰动后,约经35秒后过热汽温才开始变化, 其特性是典型的有纯迟延的高阶 惯 性 环 节 (见 图 6)。减温水流量扰动对其他参数的 影响很小。

E

4. 主蒸汽流量阶跃扰动10%

主蒸汽流量阶跃扰动下各参数的响应曲 线见图7,这些曲线的变化规律与常规锅炉 相同,但由于沸腾床的热容量较大,因此汽 压变化速度较常规锅炉的汽压变化速度低。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

· 43 ·



四 仿真结果与现场试验结 果比较

沸腾燃烧锅炉与常规电站锅炉最主要的 差别就是燃烧方式不同,因此,本文就燃料 扰动时,床温、汽压、汽温和蒸汽流量的响 应曲线与永荣发电厂提供的试验 曲 线 作 比 较。



图 8 燃料量作10%扰动时的响应曲线比较

图8是燃料量作10%阶跃扰动时,在0~ 600 秒范围内数字仿真结果与现场试验结果 的曲线比较。由图可知,沸腾床温*T*_b、主汽 压力*P*_o,主汽流量*M*_o和主汽温度*T*_o都比较 吻合,达到令人满意的程度。两种结果也存 在一定差别,其一是试验曲线的纯迟延比理 论模型的纯迟延要长20秒左右;其二是各参 数变化几十秒后,本模型的响应稍落后于实 际系统的响应。引起这些误差的主要原因是 建立模型用分段集中参数代替实际系统的分 布参数;计算床高与试验床高不一致,建立

图 7 主蒸汽流量阶跃响应曲线 巾 珍奴; 订昇休尚 习诋驱休间 小一 攻; 建立?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ζ,

1989年

模型时还作了其他简化假设;试验时给煤量 无法准确计量以及试验时的随机干扰等等。

五结 论

用机理建立模型和数字仿真能有效地研 究沸腾燃烧锅炉的动态特性。与现场试验结 果比较,仿真结果的各输出参数对各种扰动 的暂态响应变化趋势一致,且满足一定的精 度要求,说明仿真结果符合实际过程的客观 规律,且可用于这种型号的沸腾炉自动控制 系统设计及参数整定时参考。

参考文献

- 〔1〕 林来兴:"热工调节对象动态 特性译文集"科学出版社,1965年。
- 〔2〕 王海平等译: "燃煤机组实时仿真模型"阿城 电站设备自动化设计研究所,1984年。
- 〔8〕 田子平:"沸腾燃烧的理论与实践"煤炭工业 出版社 1985年。
- 〔4〕 重庆大学热力设备动态特性科研组编译: "热力设备动态特性译文集"重庆大学热力设备动态特性译文集"重庆大学热力设备动态特性科研组 1982年。
- [5] Sandell, N.R.: Sarvey of Deceutralized Controll Methods for Large Scal System, IEEE Trans. Automatic Control Vol. Ac 23, No.2, April, 1978.

№R88-32 轴流式风机 研究所配备 有从叶棚吹风到大型风机试验台 等先进设 备,有装备精良的试制工厂和力量雄厚的生 产协作厂。可以承接各种用途的风机、压气 机的设计、试验及供货,其性能参数范围 为: 单转子压比 2.2~9.0; 效率 0.86~ 0.90; 流量 1200~6000m³/min; 风机 步命 可大于10万小时。压气机、风机可制成部分 或全部静叶可调,有宽广的稳定工作范围。 可广泛用于钢铁冶金、石油催化裂化装置、 煤气输送增力装置等。可根据用户需要提供 鼓风机站的设计及成套设备供货,包括动力 设备、进气过滤、消音、管网、装置的自动 调节及监控、保安系统,并承接安装、调试 及技术服务。也可提供特殊用途的轴流、离 心通风机、鼓风机。

№R88-33 工业汽轮机设计和制造 研究所能承担适合中、小型电站,自备电站 及化工系统的水泵,风机等使用的中、小型 工业汽轮机,功率为1500~6000千瓦(包括 背压式、抽、凝式等)的整套设备的设计、 制造、调试、安装以及一、二、三类压力容 器的设计等任务。

№R88-34 **沸腾锅炉设计** SHF 全沸 腾锅炉为双锅筒横置式或纵置式自然循环水 管锅炉。该炉结构简单,布置紧凑合理,维修 方便,运行安全可靠,燃料适应性广。采用 微正压给煤,有上下烟道和飞灰再燃床,炉 内除尘,能改善环境污染,并提高了锅炉热 效率。能燃用低发热值的煤矸石、褐煤、炉 渣及甘庶渣、木屑等劣质燃料。SHF 型沸腾 炉已有下列系列产品: SHF2-13-H、SHF4-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-13-H、SHF6-13-H、SHF8-13-H、SHF10-50-25/400-S、 SHF35-39/450-H(其中后两种可作为发电 机组配套设备,亦可作为热电联供及其他工 业供行)。还可以根据客户要求,设计燃用 各种燃料、各种参数的沸腾炉。

(如需以上技术或产品请与编辑部联系)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

• 44 •

- 56

Abstract

This paper is devoted to a preliminary study of the combined operation of a gas turbine power station and heating furnaces during the process of petrolium refining. Also discussed in this paper are certain aspects concerning its economy, feasibility and some possible problems which may arise in connection with the operation of the combined unit.

Key Words: gas turbine power generation, heating furnace, combined unit, economy, feasibility

5. Development of marine reversible gears.....Zheng Dingtai(22) Abstract

This paper gives a description of the development worldwide of marine reversible gears during the last 30 years or so, with a detailed discussion of astern adjustable torque converter coupling and its advantages.

Key Words: gear transmission unit, astern running, hydraulic torque convertor

6. The development prospects of waste-heat boilers

Abs tract

A comprehensive review is given in this paper of the recent developments in waste-heat boilers in the USA, Japan, USSR and China, with some proposales being put forward for their further growth and development. Key Words: waste-hear boiler

7. The design and operation of $SHW_{360}^{6} - 10/160 - H(A)$ steam/Water boiler

.....Dong Shan, Ling Renbin(36) Abstract

This steam/water boiler is capable of supplying steam and hot water simutaneously, and also operates solely as a steam boiler or hot water boiler. Switching between these three operation modes can be easily conducted and the supply ratio of steam and hot water changed at will. The water temperature can be adjusted as required to within 20 °C of the saturation temperature at the corresponding pressure, with the ranging of regulation being between 95° C and 160° C. It offers special convenience for users who are in need of both hot water for space heating and a steam supply source.

Key Words: steam/water boiler, tilting reciprocating grate, brown coal and bitumionus coal

3. Dynamic mathematical model and digital simulation of 35t/h fluidized bed ?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

boilers......Fang Qi, Xu Shengyi(39) Abstract

By way of mechanism analysis, the authors have created a mathematical model based on section-centralized parameters for $DG_{35}/39-7$ boilers. A simulation has been carried out on a digital computer. The main step response curves obtained are analysed and compared with the test results of the on-site fluidized boilers of the same type. Such an analysis has denonstrated the validity of the established model. The simulation results can serve as reference data during the desiin of the automatic control system and also parameter adjustment and setting of such fluidized bed boilers.

Key Words: fluidized bed beiler, dynamic model, digital mcdel

9. An exploratory study on the application of microcomputeraided centralized control of marine boilers and their main systems

.....Wu Yiliang, Miao Yongmao, Zhou Bing(45) Abstract

On the basis of the specific features of marine powerplants and taking account of the practical operation experience of the original control system, the authors discuss the various options of microcomputer control applicable to marine boilers and main systems, control culculation algorithms, pulse point selection and parameter setting, etc., with some examples of boiler combustion system control calculation being given.

Key Words: marine boiler, microcomputer

10. Theoretical calculation of saturated steam wetness......Gong Sanxing(49) Abstract

This paper explains the underlying basis for the substitution of the commonly used evaporating surface escape speed W_0'' and steam volumn load R_r by evaporation surfac non-dimensional load K_F . Based on the Soviet author $\Pi_{\bullet}C_{\bullet}$ CrepMaH equation, a rewritten equation form convenient for calculation purpose has been solved to facilitate the theoretical determination of the saturated steam wetness.

1.2.1
\otimes
\otimes
\otimes
\otimes
ŏ
\otimes
$\otimes \otimes \otimes$
3