

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。

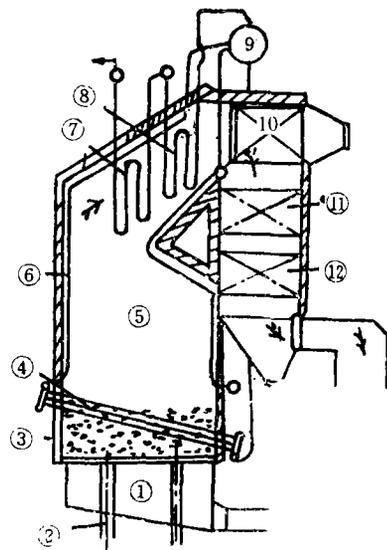


图1 锅炉本体简图

- 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

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。

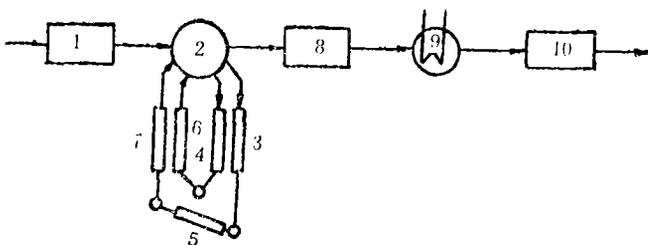


图 2 工质侧简化模型图

- 1.省煤器 2.汽包 3.下降管 I 4.下降管 II 5.埋管
- 6.水冷壁管 I 7.水冷壁管 II 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；
3. 燃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，并且为了抓住沸腾床的特点，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：

$$m_c + m_a - m_d - m_f - m_g = \frac{d}{dt}(G_s + G_g) \quad (1)$$

能量守恒方程：

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

$$+ m_c Q_d - q_i = \frac{d}{dt} [(G_s C_s + G_g C_{Vg})$$

$$T_b] \quad (2)$$

式中: m_c, m_o, m_d, m_f, m_g 分别为燃料, 空气, 排渣, 飞灰及烟气的质量流量。

G_s, 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_c, T_b, T_a 分别为燃料, 沸腾床及送风温度。

Q_d, 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:

$$m_i - m_o = V \frac{d}{dt} \rho_o \quad (3)$$

能量守恒方程:

$$m_i h_i + q_i - m_o h_o = V \frac{d}{dt} (\rho_o h_o) \quad (4)$$

金属蓄热方程:

$$q_{bi} - q_i = GC \frac{d}{dt} T_m \quad (5)$$

床料对埋管的放热方程:

$$q_{bi} = K_b A (T_b - T_m) \quad (6)$$

放热系数方程:

$$K_b = \zeta (\alpha_{rh} + \alpha_f) \quad (7)$$

浮化团放热系数方程

$$\alpha_{rh} = f(m_c, T_b, d_{dc}, \gamma_g, \gamma_y, \gamma_{dj}) \quad (8)$$

幅射放热系数方程:

$$\alpha_f = f(T_b, T_m) \quad (9)$$

动量守恒方程:

$$P_i - P_o = \left(\frac{fL}{d} + 1 \right) \frac{m_o^2}{2g\rho_o A^2 f} + \frac{1}{2} L_v (\rho_i + \rho_o) + \frac{1}{gA^2 f} \left(\frac{m_o^2}{\rho_o} - \frac{m_i^2}{\rho_i} \right) + \frac{L}{gA_f} \frac{d}{dt} m_o \quad (10)$$

式中: m, p, h, ρ , 分别为工质流量、压力、焓、密度。

V, A, A_f, L, L_v, 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,

$d_{dc}, C, \gamma_g, \gamma_y, \gamma_{dj}$ 分别为床料粒子的平均当量直径, 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, 求解整个锅炉的动态特性。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维, 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, 发现某些方程的微分项系数很小, 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。

三 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-PC 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

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。

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）

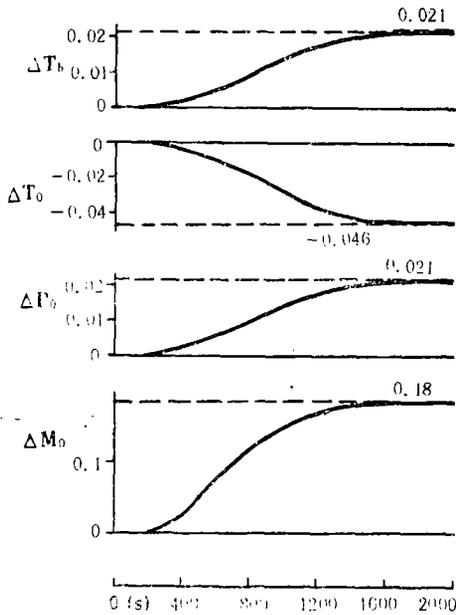


图 3 燃料量阶跃响应曲线

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，大约有三分分钟的纯延迟后，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：带纯延迟的高阶惯性环节。

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，水位容积延迟时间约为16秒。

3. 减温水流量阶跃扰动10%

由于是表面式减温器，故当减温水流量

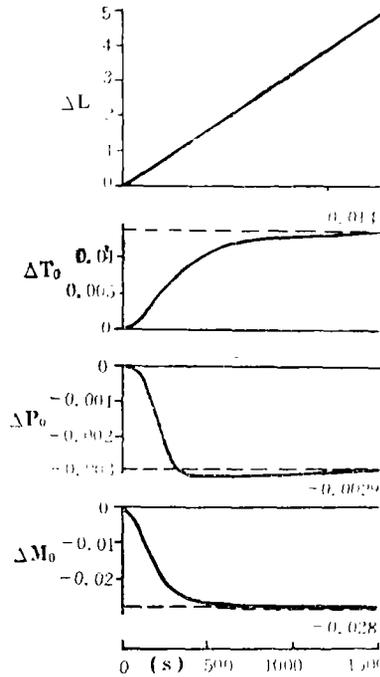


图 4 给水流量阶跃响应曲线

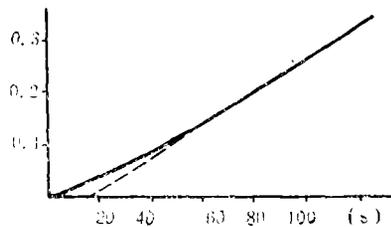


图 5 水位阶跃响应曲线

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延迟的高阶惯性环节（见图6）。减温水流量扰动对其他参数的影响很小。

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。

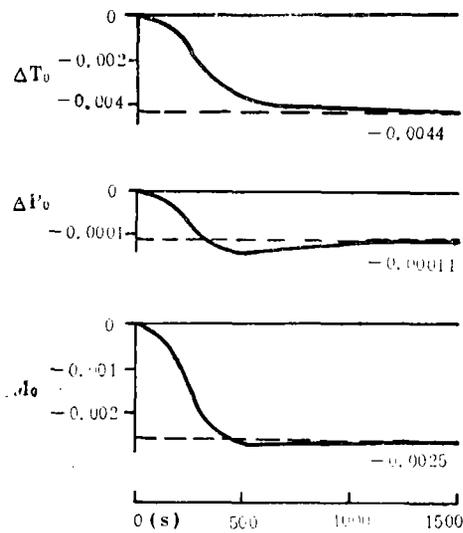


图6 减温水流量阶跃响应曲线

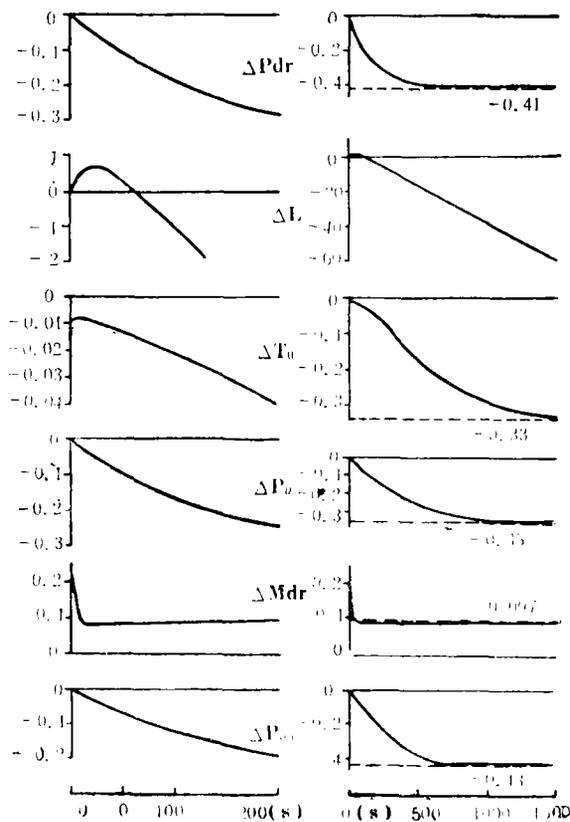


图7 主蒸汽流量阶跃响应曲线

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。

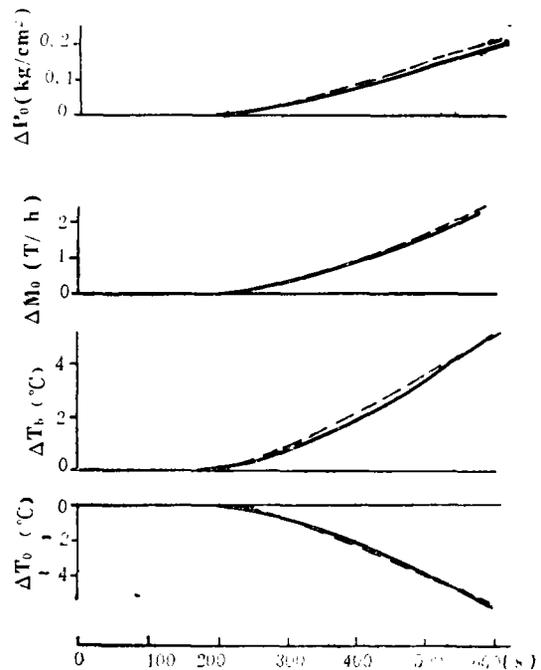


图8 燃料量作10%扰动时的响应曲线比较

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_0 、主汽流量 M_0 和主汽温度 T_0 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延迟比理论模型的纯延迟要长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

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。
- 〔3〕 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科研组 1982年。
- 〔5〕 Sandell, N.R.: Survey of Decentralized Control Methods for Large Scal System, IEEE Trans. Automatic Control Vol. Ac 23, No.2, April, 1978.

新技术、新产品信息

№R88—32 轴流式风机 研究所配有从叶栅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；风机寿命可大于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、炉渣及甘蔗渣、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、SHF12-13-H、SHF20-25/400-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汽）。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）

4. Comprehensive utilization of gas turbine power station in petroleum refineries.....Ye Zide (17)

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 petroleum 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 converter

6. The development prospects of waste-heat boilers Wu Yisan(27)

Abstract

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 proposals being put forward for their further growth and development.

Key Words: waste-heat boiler

7. The design and operation of SHW₃₆₀⁶ - 10/160 - H(A) steam/Water boilerDong Shan, Ling Renbin(36)

Abstract

This steam/water boiler is capable of supplying steam and hot water simultaneously, 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 bituminous coal

8. Dynamic mathematical model and digital simulation of 35t/h fluidized bed

