

高等学校教材

锅炉动态特性 及其数学模型

南京工学院 章臣抛 主编

水利电力出版社

高等学校教材
锅炉动态特性及其数学模型

南京工学院 章臣樾 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 11.25印张 46千字

1987年6月第一版 1987年6月北京第一次印刷

印数0001—2800册 定价1.90元

书号 15143·6355

内 容 提 要

本书根据热工理论和锅炉的稳态与动态工作过程来建立锅炉各主要部分的动态数学模型，再利用模型来进一步分析锅炉各部分和整体的动态特性，并按下列系统或设备分章进行了讨论：单相与两相工质受热管；汽包锅炉蒸发区；直流锅炉的一次工质通道；制粉设备和烟风系统；从锅炉给水至汽机排汽的工质通道。

书中还说明了锅炉动态试验方法的要点和从试验结果整理出近似传递函数的基本方法。

本书是为电厂热能动力专业本科生和研究生编写的一本选修课教材，亦适用于电厂热工自动化专业，并可供有关技术人员参考。

前 言

为了保证锅炉-汽轮机-发电机组的安全和经济运行,设计和运行人员不仅要掌握机组稳态下的工作过程,而且要了解它们的动态特性。锅炉是单元机组中的主要设备之一,它的工作过程极为复杂。对于锅炉动态特性的研究,往往借助于为它建立的某种简化模型。计算机技术的发展为锅炉动态数学模型的广泛应用提供了有利的条件。然而,对于锅炉内部的某些工作机理,人们至今尚未充分掌握。因此,如何建立一个比较符合实际而又相当简单的锅炉数学模型,是一个尚待研究的课题。本书将从掌握锅炉的基本工作过程出发,运用热工理论来建立它的局部动态模型,然后把这类局部模型综合起来,进一步推测它的整体动态特性。两种方法相辅相成。各章内容由简到繁,由浅入深,希望读者能够掌握建模方法,付之实用。

本书是在南京工学院动力系有关同志多年来教学和科研工作的基础上编写而成的,由南京工学院章臣樾担任主编,并编写第三、四、五章。参加编写的还有浦复良(编写第一、二、六章)和支海坤(编写第七章)。限于编者的水平,书中难免有不少缺点和错误,如蒙读者批评指正,编者当不胜感激。

应该说明:本书§3-2中的蒸发区分为几个环节的模型主要取材于清华大学李天铎执笔的《自然循环蒸发系统的数学模型》;§4-3中的直流锅炉非线性模型主要取材于南京工学院柳志倩撰写的《核电站直流蒸汽发生器的数学模型》;§7-4的内容取材于南京工学院钱钟韩教授在本院的一个专题讲座材料。在此,编者向以上各位同志表示谢意,并请对编写中取舍不当或与原意不符的地方给予指正。本书的编写工作得到了南京工学院动力系和热能动力教研组领导的经常关心和支持,在此对有关同志致谢。

在本书编写过程中,钱钟韩教授对原稿和送审稿分别进行了全面仔细的审阅。在每次审阅中都提了很多指导性的意见,还作了具体的修改和补充。编者对钱钟韩教授表示衷心的感谢。

编 者

1986年6月

常用符号

A	表面积	r	汽化潜热
a	单位管长表面积	S	压头
B	燃料量	T	热力学温度; 时间常数
C	区段无因次容积系数	t	摄氏温度
c	比热	U	容积流量
D	工质流量	u	内能
d	流量的相对变量; 直径	V	容积
F	截面积	v	比容
G	气体的流量	w	流速
g	重力加速度	x	蒸汽干度
H	焓	α	放热系数; 角度
h	高度	β	容积份额
I	热惯性	δ	厚度
J	蓄热量	ξ	阻力系数
K	与传热有关的系数	η	焓的相对变量; 效率; 系数
k	系数; 循环倍率	θ	温度的相对变量; 角度
l	长度	λ	导热系数; 摩擦阻力系数
M	质量; 物质贮量	μ	开度
N	功率	ν	功率的相对变量
n	转速	ξ	相对长度 (距离、高度)
P	压力	ρ	密度
p	压力的相对变量	τ	时间
Q	热流量	φ	截面份额; 系数; 风门开度
q	热流量的相对变量	ψ	系数
R	气体常数; 无因次阻力系数		

常用角标

a	绝热	hq	含汽
b	壁	j	金属
bh	饱和	k	空气
bq	饱和蒸汽	l	炉
bs	饱和水	lb	水冷壁
d	对流	lg	冷再热汽管
f	辐射	lk	冷空气
fj	附加	m	磨煤机
g	给煤	q	汽、气
gp	汽轮机高压缸排汽	qb	汽包
gr	过热器; 过热蒸汽	qs	汽水导管

r 热
rk 热空气
rs 热水段
s 水, 设计值
ss 上升管
sm 省煤器
xj 下降管
xq 新汽
y 烟气

yx 有效
zf 蒸发区
zq 再热蒸汽管; 再热蒸汽
zx 再热汽系统
0 稳态值
1 进口, 烟气侧
2 出口, 工质侧
' (上角标) 进口; 饱和水
" (上角标) 出口; 饱和蒸汽

目 录

前言

常用符号

第一章 绪论	1
§ 1-1 关于锅炉数学模型的一般说明	1
§ 1-2 锅炉动态数学模型的作用与类型	3
§ 1-3 建立锅炉动态理论解析模型的一般方法	5
第二章 锅炉工质侧基本环节的动态数学模型	9
§ 2-1 管式换热器的基本方程组	9
§ 2-2 单相受热管焓通道的分布参数动态数学模型	14
§ 2-3 单相受热管焓-温通道的集总参数动态数学模型.....	22
§ 2-4 单相受热管压力-流量通道的集总参数动态数学模型.....	27
§ 2-5 强制流动两相受热管的动态数学模型	31
§ 2-6 厚壁部件壁温分布的动态数学模型	45
第三章 汽包压力和水位的变动	52
§ 3-1 概述	52
§ 3-2 蒸发区的集总参数模型	54
§ 3-3 汽包水位的变动	61
§ 3-4 蒸发区分为几个环节的集总参数模型	68
§ 3-5 蒸发区工况对自然循环流量和安全性的影响	74
第四章 直流锅炉的工况变动和动态数学模型	81
§ 4-1 燃料量与给水量对直流锅炉工况的影响	81
§ 4-2 压力变动对直流锅炉工况的影响	85
§ 4-3 建立直流锅炉动态数学模型的方法	88
§ 4-4 直流锅炉动态特性的分析	94
第五章 燃料和烟风系统的动态数学模型	98
§ 5-1 各种燃料系统动态特性的比较	98
§ 5-2 制粉系统的动态数学模型	99
§ 5-3 烟气温度和放热量的模型.....	105
§ 5-4 烟风系统的动态数学模型.....	114
第六章 锅炉-汽轮机单元机组的动态数学模型	119
§ 6-1 中间再热汽轮机的模型.....	119
§ 6-2 单元机组的分布参数模型.....	126

§ 6-3 单元机组的非线性集总参数模型.....	130
§ 6-4 单元机组的线性化集总参数模型.....	136
第七章 锅炉的动态试验	139
§ 7-1 概述.....	139
§ 7-2 锅炉动态试验中的几个主要问题.....	144
§ 7-3 由阶跃响应曲线拟合对象的传递函数.....	144
§ 7-4 由响应曲线的数值积分求取对象的近似传递函数.....	164
§ 7-5 把矩形脉冲响应曲线转换成阶跃响应曲线的方法.....	165
参考文献	168

因此，对于同一个系统，由于研究目的或所取简化条件的不同，所建立的模型也不一样。例如，在研究过热器中汽温沿管长的变化规律时，可把很多并联的过热器管简化成一根管子，它的长度与原来的每一根管子相等，而它的通流面积则等于所有并联管通流面积的总和。但是，如果目的是研究过热器中各并联管之间的吸热不均匀性，当然就不能采用这种单管型的模型了。

二、静态数学模型和动态数学模型

（一）静态数学模型

对系统或过程在稳定状态或平衡状态下各输入变量与输出变量之间关系的数学描述称为静态（稳态）数学模型（在本书中，“数学”二字往往省略）。它能反映系统或过程的静态特性。

锅炉运行时，如果输入与输出的物质和能量保持不变，而且恰好收支平衡，那么，锅炉内部各处烟气和工质的流量和参数以及锅炉本身各处的金属温度都能保持稳定。在一定工况下，各种稳态参量都有一定的数值，与前后的历程无关。这些参量的数值可以实际测定，也可由热力学、水动力学、气体动力学等的静态计算求出。在工况变动时，几乎各种参量的数值都会随着工况而改变。改变以后的稳态值，也可通过静态计算来确定。由此表明，在不同的稳定工况下，各种状态参量之间总存在着某些确定的关系。这些关系可用公式、图线、表格等数学形式来表达，从而构成静态的数学模型。综上所述，静态数学模型可直接或间接地取自各种静态计算方法，也可由试验结果得到。它们除了服从物理和化学的基本定律外，还取决于锅炉的结构特点。例如，在不采取任何调温措施的条件下，过热汽温将随锅炉负荷而变化。描述负荷与过热汽温关系的曲线称为锅炉的过热汽温静态特性，这就是一种静态数学模型。实际上，在锅炉结构布置已经确定的条件下，过热汽温除了受到锅炉负荷的影响以外，还与其它很多因素（如燃料性质、炉膛过量空气系数、燃烧器倾角等）有关。如果要把所有主要的影响或关系都表示出来，就必须列出一个庞大的方程组，或者说，需要建立一个相当复杂的过热器静态数学模型。

（二）动态数学模型

在工况变动的过程中，或者说在不稳定状态下，哪些参量会发生变化，它们变化的速度和历程又是如何，这些都属动态问题。动态数学模型（或简称动态模型）就是用来描述系统或过程在不稳定状态下各种参量随时间 τ 变化的数学关系式。这些数学关系式一方面服从物理与化学的基本定律，另一方面也取决于系统的结构特点和初始工作条件。动态数学模型与静态数学模型的主要差别是：前者含有时间变量（ τ ），后者则与时间无关。理论上说，当 $\tau \rightarrow \infty$ 时，由动态数学模型决定的所有参量的最终稳态值应该与静态数学模型所决定的完全一样，两种模型在形式上也趋于一致。因此可以认为，静态数学模型是动态数学模型的极限和基础。但是应该说明，为了使动态模型及其计算不至于过分复杂，在建模时所用的物理模型和假定条件往往比静态计算中所用的更加简化，所以当 $\tau \rightarrow \infty$ 时，动态模型在形式上不会与静态模型趋于一致，由两种模型所得的计算结果也有所不同。一般说来，动态模型的稳态误差（ $\tau \rightarrow \infty$ 时各个参量的误差）要大于静态计算结果的误差。

锅炉在实际运行时，绝对稳定和绝对平衡的状态几乎是不会有的，因为锅炉经常受到

各种因素（外部或内部）的干扰，在上一个动态过程尚未结束时，往往又来了另一次干扰。例如，随时变动的电负荷将影响各台汽轮发电机和有关锅炉的工作，即使不是参加调频的机组也可能受到一些微小的影响。此外，锅炉设备内部的工作情况也不会总是稳定的。例如，辅机工作的不稳定性、燃料供应量的不均匀性以及燃料品质（尤其是固体燃料品质）的变动等，都会影响锅炉的工作。在锅炉从一个工况变动到另一个工况的过渡过程中，各参量随时间变化的数学关系式就是锅炉的动态数学模型。

§ 1-2 锅炉动态数学模型的作用与类型

一、锅炉动态数学模型的作用

一台运行的锅炉应该能够及时适应外界负荷的要求，即：无论是稳定工况或变动工况，任何参量的数值都不应该超出规定的安全限度；与运行经济性有关的各参数都应该符合预定的指标。为了满足上述几个要求，对锅炉本身而言，必须使它具有良好的可控性能，亦即良好的静态与动态特性；此外，对运行调节来说，必须采用良好的自动调节装置或正确的操作方法。要做好这两方面的工作，无论是设计人员或运行人员都必须充分了解锅炉的运行特性。

为了掌握某一台锅炉的静态特性，在设计过程中，可进行一系列的静态计算；对于运行锅炉，则可以进行一系列的试验。多年来，对于任何一种新型号的锅炉，都采用这种研究方法。随着锅炉容量的增大和热力参数的提高，其构造更加复杂，对外扰及内扰也更为敏感，同时在运行调节方面也提出了更高的要求。对于现代锅炉，除了充分掌握它的静态特性外，还必须了解其动态特性。因此就提出了建立动态模型的要求。具体地说，建立动态模型的主要目的有以下几个方面：

（1）判断机组动态特性的优劣，也就是：检查它会不会对运行及控制带来特殊困难；是否具备有效的控制手段及足够的控制裕度；分析改变锅炉结构参数对动态特性的影响，从而提出从结构设计上改善动态特性的根本途径。

（2）设计合适的控制系统，并选择合适的系统工作参数或状态。

（3）建立仿真机组，用以培训运行操作人员和进行仿真研究。这种仿真机组除了模仿正常运行工况外，还能模仿事故及启停等全过程。

二、锅炉动态数学模型的类型

无论是静态数学模型或动态数学模型，目前主要采用理论分析、经验归纳、或理论分析与经验归纳相结合的办法，由此得到的模型分别称为理论解析模型、经验归纳模型及混合模型。

（一）理论解析模型（机理性模型）

根据基本的科学定律，从系统内部工作过程的机理出发，为系统或过程建立的数学模型称为理论解析模型。它具有较严密的科学根据，可用于多种多样的工作条件、或对新的过程和系统进行探索。这种建模的方法称为理论解析法。

在新锅炉的设计阶段，它的初步设计方案和各种静态计算的结果都可作为建立机理性模型的依据。对已经投运的锅炉也可用理论解析法建立它的动态模型，模型中采用的某些数据还可以利用现场测试的结果来进行核对和修正。理论解析模型的精度一般不很高，它的定性结论却比较合理，可以用来分析系统结构对运行特性的影响，从而提出改进设计的具体途径。在这方面，理论解析模型具有重要的实际意义。

（二）经验归纳模型（经验性模型）

不考虑系统或过程的工作机理，完全根据实测数据的定量关系而建立的数学模型称为经验归纳模型，所采用的方法称为经验归纳法或黑箱法。显然，这种方法只适用于已经建成并投入运行的设备或系统。如果所依据的只是少量实测数据，则建成模型的精度一般都很低，甚至可能失真。这是因为系统的工作状态和实验数据总包含一些随机因素，由此引起的误差是难于估计的。象锅炉这样复杂的系统和工作过程，在运行中总受到许多难于确定的干扰。例如，通常都采用给粉机的转速或电流来代表给粉量（对有中间粉仓的锅炉），而实际上影响给粉量的其它因素还很多，它们与给粉量之间的具体关系又往往极为复杂，至今尚不清楚，所以即使给粉机的转速保持不变，给粉量也会时多时少。

应该说明，在运行设备上进行正规试验时，只有通过精心准备和大量校核工作后，才可能得到精度较高的实测数据。在动态试验中，一般都争取使有关参量在安全限度以内发生尽可能大的变化，从而使随机干扰的影响相对地减小；或者采用一种特殊模式的输入扰动信号，例如“伪随机信号”。经过多次重复试验，并经过平均，就可得到一些能够如实反映锅炉特性的试验数据。然而，通过这样的大型试验来确定锅炉整体的、甚至只是局部的数学模型，其费用和工作量是很大的。而且这种经验性模型通常不能推广应用于实验范围以外。因此，对于锅炉来说，如果要采用所谓“黑箱法”，亦即在完全依靠经验归纳法建模时，一般都是先从现有锅炉上收集大量的运行数据，再经过统计分析等数据处理方法，尽可能消除随机干扰的影响，从而得到输出输入量之间比较可靠的关系。所建模型的精度主要取决于取得原始数据的广泛程度和进行数据处理的方法及手段。这种建模方法已成为一门专门的学问——系统辨识与参数估计，本书不予论述。

（三）混合模型

对于比较复杂的系统或过程，理论解析模型的精度一般都不够高，而经验归纳模型又只限于某一具体对象。为了提高模型的精度，同时又使模型具有一定的适用范围，常采用理论解析与经验归纳相结合的方法来建立所谓的混合模型。这种模型的总体结构仍具有较明确的物理意义，从而保留了理论解析模型的基本优点。例如，根据相似理论，通过大量实验得出的流动阻力系数与管子直径、表面粗糙度等因素的函数关系就是一种混合模型。锅炉的热力计算和水动力计算等主要是由热量平衡、质量平衡、传热方程及一些经验数据组合而成的，它们能够正确反映锅炉各类参量的静态关系，严格地说都属于混合模型。工程系统或过程往往都是很复杂的，所以一般都很难建立纯粹的理论解析模型，对动态过程来说尤其如此。但是，只要以理论解析公式为主体（即使采用了锅炉热力计算的公式），由此所建立的锅炉动态数学模型，习惯上仍称为理论解析模型，这是本书主要讨论的对象。

§ 1-3 建立锅炉动态理论解析模型的一般方法

一、锅炉模型的特点

(一) 分布参数

锅炉本身占有很大的空间,其中包括处于不同热力学状态的几种介质,并且各处参数都不相同,也就是说绝大部分参数都是三维空间的函数,具有明显的分布参数特点。这样一个分布参数系统的数学模型是十分复杂的,而且通常都是非线性的。因此,在静态计算中通常采用了分区集总的办法,对每个区域内的各种参数都分别用按一定方法得出的平均值来代表,也就是简化为集总参数的模型。由于把整个通道中的介质分成了若干区段,所以对整个锅炉来说,仍带有分布参数的特点。在建立动态模型时也常常是这样处理的,不过各个参数代表值的取法可能与建立静态模型时的取法不同。在动态模型中,对于某一区段内的一种或几种参数有时也按分布参数来处理,但是认为在管道同一横截面上的参数是均匀的,只是沿着工质的流动方向发生变化,也就是将三维空间的分布参数简化为一维空间的。这种分布参数的动态模型都是含有两个自变量——距离 y 和时间 τ 的偏微分方程组。在列写和求解方程的过程中,一般都须进行适当的近似或简化,否则将复杂得无法求解。而集总参数动态模型则是仅含有一个时间变量 τ 的常微分方程组。

(二) 复杂的工作过程

在锅炉内部有几种不同性质和不同状态的介质,同时发生多种化学反应或多种物理过程。在静态计算中,对于燃烧、传热、水动力、气体动力、制粉和热化学计算,都是分别进行的。实际上,在锅炉内部进行的各种过程之间往往还有交叉的影响,但是为了避免求解过于庞大的方程组,通常都是在一种过程的计算中,根据经验预先假定另一种(或几种)过程对它影响的大小,然后把后一种(或几种)计算的结果与前面假定的数据进行比较。例如,在锅炉热平衡计算与传热计算中所用到的工质压力的数据都是预先假定的,这些假定的数据与随后进行的水动力计算所得的结果总有一定的差别,由于在锅炉设计中,一般已有足够准确的经验数据可以取用,所以这些差别通常总是在允许误差范围以内的。

象静态模型一样,在锅炉动态数学模型中,也有描述各种物理过程的方程式。但是,因为动态计算总是在计算机上进行的,而对计算机来说,求解数目较大的方程组一般并无特殊的困难,所以,对于描述明显存在交叉影响的物理过程的方程式,常用联立求解的办法。

由于锅炉内工质的化学反应并不影响锅炉的动态特性,例如炉水加药后发生的化学反应,对通常所说的锅炉动态特性可以说是没有影响的,所以在动态模型中不予考虑。与锅炉内工质的汽压和汽温相比,炉内燃烧过程的变化进行得非常快,所以在动态数学模型中可以认为燃烧反应是瞬间完成的,或者是在炉膛的几个分区内各自瞬间完成的,亦即可以忽略其动态过程。烟气在烟道内发生的化学反应,包括对受热面金属的腐蚀,也不予以考虑。至于灰分对受热面的污染,只是在很长时间后才会影响传热速度,所以在运行控制的

动态过程中通常也不必考虑。总的来说，由于锅炉的动态模型一般都是用来研究压力、温度和流量等热力学参数的变化过程，所以对各种化学反应的动态影响可以不予考虑，只需在选取静态数据时（即动态过程的起点和终点）适当注意到它们的长期影响就够了。

在锅炉内部还有一些极其复杂的工作过程，如汽包中的汽水分离过程、汽水管道内的两相流动过程及煤粉管道内的气、固两相流动过程等，对于它们的静态模型仍在研究、探讨之中。因此，在用理论解析法建立锅炉的动态模型时，对这些过程也只能在宏观上加以反映，并作出一些必要的简化假定。

（三）速度差别很大的几种动态过程

锅炉内各种物理现象动态过程的进行速度可能相差很大。例如，在同一汽水流程中，压力和流量的变动传递得很快，而温度和焓的变化过程却很慢；即使同样是焓和温度的变化，在烟气侧进行得较快，而在汽水侧进行得很慢。对于这些快慢差别很大的变化过程，在动态模型中一般都是分别处理的。例如，在汽水流程的模型中，分为压力-流量通道及焓-温通道。根据不同的建模目的，有时可把快的过程近似为瞬间完成的（从一个稳态跃变到第二个稳态）；有时则把慢的过程近似地当作完全凝滞不变的。例如，当建模目的主要是研究汽温的变化规律时，可把烟气侧的变化认为是瞬间完成的；反之，如果建模目的是为了研究烟气侧的动态过程，则可以认为汽水侧的状态在短时间内没有发生变化。

（四）多变量和多回路

锅炉有许多输入控制量（或操作量），如燃料量、给水量、减温水量、燃烧器倾斜角度、送风机及引风机挡板开度和烟气再循环挡板开度等；也有许多输出变量，如汽水侧和烟气侧各点的压力、温度和流量等。上述输入量和输出量之间是联系密切和互相影响的，因而形成了若干并联、串联和交叉影响的闭合回路，这样就使锅炉模型成为一个多元函数方程组。

（五）非线性

由于工质的物理性质在不同状态下差别很大，而且某些物理过程的输出量是几个输入变量的非叠加性多元函数，所以锅炉特性具有非线性的特点。例如，水蒸汽的各个热力学状态参数之间的关系或辐射换热量与温度之间的高次方关系都是非线性的，总能量常是工质流量与工质能量密度的乘积，这种乘法关系也是非线性的。因此，严格地说，锅炉的动态特性在不同工况下是不同的，亦即不符合叠加原理。

二、建模的一般步骤

1. 明确建模目的

在着手建模之前，首先要明确建模目的，也就是对模型的用途要了解清楚。用途不同，需要的模型也就不一样。例如，建模目的是为了设计机炉的主控系统，需要了解锅炉-汽轮机单元机组的负荷适应性，则可将单元机组动态特性简化成图1-1所示的两个输入、两个输出的关系。这里通常假定送风、引风、给水和汽温都各自处于良好的自动调节状态（送风、引风与燃料供应量是完全匹配的），水位与一、二次汽温都能基本保持不变。然后把锅炉（包括再热器）和一、二次汽管当做一个整体，作为一个能量转换和传递的单元。在这种情况下，压力 P 的变化既能反映锅炉贮能、贮质的增减，又能反映输送能量

(工质)潜力的高低,因而可把模型简化成为输出变量 P 、 N 与输入量 Q 、 μ_t 之间的关系。如果建模的目的是了解锅炉各点状态参数在动态过程中的变化规律,那么就要涉及锅炉内部的工作过程,建立更详细的模型,包括很多微分方程及代数方程。其数目最多时可达数百个。

明确建模目的,不仅在建模之前,而且在建模过程中都会起良好的指导作用。

2. 考虑利用模型求解动态响应的可能性

要利用动态数学模型求解在预定输入信号作用下输出变量的动态响应,一般均需采用模拟计算机或数字计算。因此,在建模之前,应该对准备采用的计算工具的性能有所了解。

如果模型非常复杂,就要求计算机有很大的容量。若要求在数字机上进行实时运算,还要考虑计算机的运算速度是否能够适应实时要求。总的来说,必须估计到以后利用模型求解动态响应的可能性。为了减少求解动态响应的困难,在建模过程中就必须进行合理的简化,使所建模型既能符合实际需要,又能在所用的计算机的能力范围内进行运算。简化的方法一般可以从物理模型和数学模型两个方面着手。

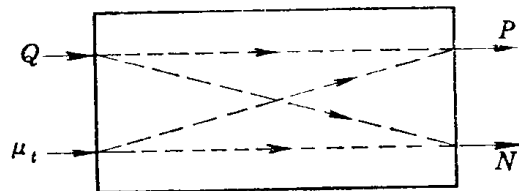


图 1-1 单元机组简化框图

Q —炉内燃烧率(包括燃料量与空气量); μ_t —汽机
调门开度; P —新汽压力; N —机组输出功率

3. 分解系统和建立物理模型

锅炉的动态物理模型与进行静态计算时所采用的物理模型大致相似。在建立动态模型时,首先要按介质性质或过程特点把整个系统划分成若干子系统,如燃料系统、空气系统、烟气系统和汽水系统等;再把每个子系统分成若干环节(即静态模型中的区段),如省煤器、蒸发区和过热器等。如无特殊要求,可对每个环节都采用集总参数。一般地说,即使是要求全面反映各种参量变化的动态物理模型也应该比静态计算中采用的模型更简单、简化假定也更多,所以偏离实际情况较远。系统划分的环节愈细,则模型愈接近于真实,但是模型各部分的相互联系也就愈复杂,亦即模型中包括的方程式愈多(可能与环节数目的平方成正比),有时甚至会超出实用的需要,徒然增加由模型求解动态响应的困难。

在分解系统或划分环节时,通常可遵照以下的一些原则:

- (1) 输入(加入扰动)和输出(被测的参量)点应在环节的分界处,有时输出点亦可取在分布参数环节内部的若干点上;
- (2) 传热性质相同、热负荷强度相近的受热面划分在同一环节中;
- (3) 同一环节中介质的性质应尽可能是一致的;
- (4) 容积和质量不大、不吸收热量或吸热量相对很少的管子和集箱,可不作为独立的环节,而并入与其相邻的前面或后面的受热面中;
- (5) 金属既可作为一个独立环节,也可将其热容量和与其接触的工质合并在一起。

4. 建立方程式

动态数学模型所包括的方程式主要是针对一个简化的物理模型,根据质量守恒、能量守恒、动量守恒等定律列出的基本方程式和传热方程、工质热力学状态参数方程,以及各

种状态变量之间的静态关系式。方程式中所需数据一般都取自锅炉的结构计算和各种静态计算书。一个复杂模型的方程式的数目很大，所以常会发生方程数与未知变量（状态变量与输出变量）数目不相符的情况，在列出的方程组中还可能线性相关的问题。因此，建立方程式一般是分通道、分环节地进行的。对于每一个通道或环节所列出的方程式都必须是线性不相关的，也没有相互矛盾，同时要检查未知变量的数目是否与方程式的数目相等。

通过上述步骤所建立的只是初步的数学模型，对这个模型还需作种种简化、变换、整理等数学处理后，才能作为编制计算机的模拟框图或编制计算程序的依据，也才有可能在计算机上求解出输入变量扰动下输出变量的动态响应。有时，上述步骤要反复地进行，直到取得满意的结果为止。

第二章 锅炉工质侧基本环节的动态数学模型

按照建模步骤中提出的分解系统的原则, 锅炉的每一个或几个串联的受热面可当作一个换热器, 并作为模型的一个基本环节, 一台锅炉的本体主要就是几个串联的换热器。本章将从换热器的基本方程出发, 阐述如何应用理论解析法建立作为基本环节的几种受热面的动态数学模型。通过这些基本环节模型的建立与讨论, 就能初步了解各种环节的具体建模方法和动态特性。

§ 2-1 管式换热器的基本方程组

管式换热器是一种典型的表面式换热设备, 其传热面由很多根等长的管子并联而成。设管内为冷介质, 它一面流动, 一面吸热, 其热力状态参数相应地发生变化; 管壁金属具有显著的蓄热性能; 管外热介质通过传热面向冷介质放热。图 2-1 为受热管段简化的物理模型, 其中包含如下的简化假定:

(1) 所有的并联管用一根等效的受热管来代表, 其介质通流面积为并联各管的通流面积之和, 而其长度与并联管一样。

(2) 管外热介质对管壁金属和管壁金属对管内冷介质都只有径向放热, 管壁四周的径向传热强度都是均匀的。

(3) 沿管长 y 方向无导热和其它热交换, 换热只在径向进行。

(4) 管壁径向导热系数无限大, 即金属管壁的外层和内层之间无温差, 所以金属温度只沿管长 y 方向有变化。

(5) 管内介质为充分混合的流体, 在同一横截面上有均匀的流速, 无边界层, 无径向和切向温差。

(6) 管内介质沿长度方向作一元流动(无内部环流)。

这些假定可使问题大为简化, 但模型仍能基本正确地反映主要的物理现象。

一、管内介质方面的基本方程

(一) 质量守恒方程(连续性方程)

在管内取一长度为 dy 的微元体, 其截面积为 F , 管内介质的流量是长度和时间 τ 的函数(见图 2-2)。根据质量守恒, 在单位时间内对微元体有

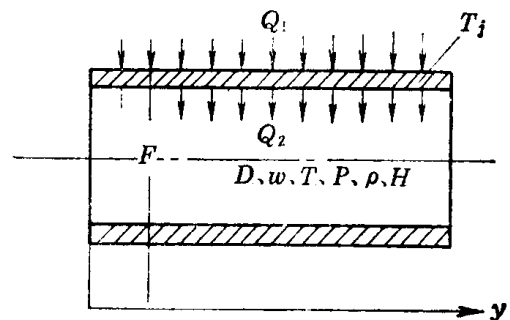


图 2-1 受热管简化的物理模型

Q_1 —管外放热介质向单位管长的管壁金属在单位时间内的放热量; Q_2 —管壁金属向管内介质在单位管长和单位时间内的放热量;
 T_j —金属温度

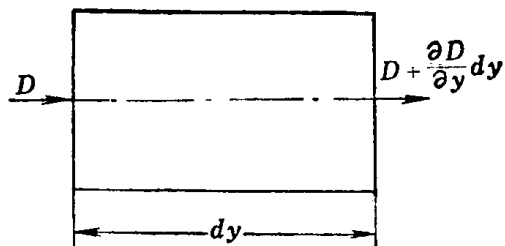


图 2-2 管内柱形微元体

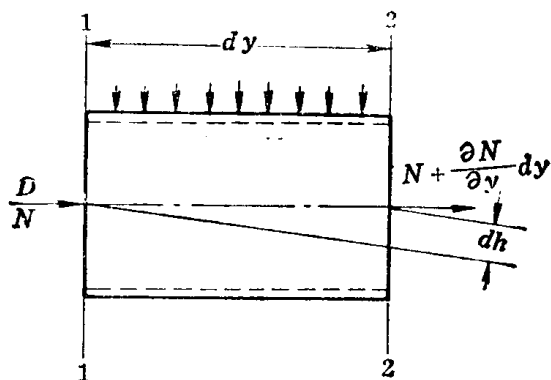


图 2-3 微元体及控制面

$$D - \left(D + \frac{\partial D}{\partial y} dy \right) = \frac{dM}{d\tau} \quad (2-1)$$

式中 M ——微元体内介质的质量；

D ——介质流量。

所以当 F 为常数时，有

$$\frac{\partial D}{\partial y} + F \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0 \quad (2-2)$$

或

$$\frac{\partial D}{\partial y} - \left(\frac{F}{v^2} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} \right) = 0 \quad (2-2a)$$

式中 v ——介质比容， $v = \frac{1}{\rho}$ 。

式 (2-2) 和式 (2-2a) 就是连续性方程，是研究热工动态过程的基本方程。

(二) 能量守恒方程 (热力学第一定律)

设有如图2-3所示的开口管内的微元体，它有固定的控制面。考虑每千克介质携带的能量有内能 u 、动能 $\frac{w^2}{2}$ 及位能 gh ，其中 w 为流动速度、 h 为高度。同时，认为外场作用的体积力只有重力一项，则在单位时间内有下列关系：

(1) 通过截面1-1进入微元体系的介质能量为 N ，且

$$N = D \left(u + \frac{w^2}{2} + gh \right) \quad (2-3)$$

(2) 通过截面2-2流出微元体系的介质能量为 $N + \frac{\partial N}{\partial y} dy$ ；

(3) 当介质通过截面1-1时，界外流体通过压力 P 对它的推动功为 FPw ；

(4) 当介质通过截面2-2时，体系对外界所作的推动功为 $FPw + \frac{\partial(FPw)}{\partial y} dy$ ；

(5) 外界对体系所加的热量 (即管壁金属向管内介质的传热量) 为 $Q_2 dy$ ；

(6) 体系内部介质所具有的总能量为