

# 热工控制对象<sup>286</sup> 动力学

高饒年 编著

水利电力出版社

# 热工控制对象动力学

高饒年 编著

水利电力出版社

## 内 容 提 要

全书共分八章。前两章主要阐述研究热工控制对象动态特性的目的和控制对象动态数学模型的描述方法；第三章内容为建立热工控制对象动态数学模型的分析方法；第四章至第七章内容为建立控制对象动态数学模型的实验方法；第八章对再现动态数学模型的方法作了介绍；在书末附录中提供了完整的面向模拟方框图的数字仿真程序包。

本书可供热工科技人员阅读，也可作为高等工业院校电厂热工测量及自动化专业的选修课教材和电厂热能动力专业的教学参考书。

## 热工控制对象动力学

高铨年 编著

\*

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 32开本 9.125印张 201千字

1986年6月第一版 1986年6月北京第一次印刷

印数0001—2850册 定价2.20元

书号 15143·5847

## 序 言

本书是根据1983~1987年高等学校水利电力类专业教材编审出版规划编写的。

高等工业院校热动类专业热工仪表与自动控制教材编审小组扩大会议于1982年12月讨论决定，将“热工控制对象动力学”作为电厂热工测量及自动化专业的一门选修课。该课程的教学大纲和教材编写大纲是在会议上共同讨论制订的。

该课程属于热力设备和自动控制之间的边缘课程，其任务在于讲述建立热工控制对象动态数学模型的各种方法，其中包括一次建模（由物理系统到数学模型）和二次建模（由数学模型到模型再现）。

本书系遵照编写大纲，在西安交通大学动力一系开设的“热工控制对象动力学”选修课的讲义和讲稿的基础上编写的。全书共分八章，第一章阐述研究热工控制对象动力学的目的和一般方法；第二章介绍控制对象动态数学模型的描述方法；第三章讲述热工对象理论建模方法，这里主要以电站锅炉和汽轮机为对象，研究它的集中参数模型和分布参数模型，介绍了电站锅炉和汽轮机主要部件动态数学模型的建立方法；第四、五、六、七章研究控制对象实验建模的各种方法，其中第四、五章分别介绍实验确定控制对象动态特性的时间域方法和频率域方法，第六章介绍控制对象的统计动力学，第七章则介绍控制对象离散时间模型的建立方法。实际上，这些实验建模方法不仅适用于热工对象，同时也适用于

其它过程或对象。在实验建模中，本书着重于研究单输入、单输出线性定常对象的建模。以上第三章至第七章都属于一次建模，最后一章（第八章）则介绍二次建模方法，在模拟、仿真知识的基础上，这里将着重介绍一种通用性很强的、面向模拟方框图的数字仿真程序包“CSS”。

本书编写过程中立足于工程技术实用。书中介绍的各种建模方法和结论，一般都进行了推导、论证和分析。在二次建模中，则提供了完整的“CSS”仿真程序包，以便满足模型试验研究和工程技术实用的需要。

本书可供热工科技人员阅读，也可作为高等工业院校电厂热工测量及自动化专业的选修课教材和热动类专业的教学参考书。

本书初稿完成后，由华北电力学院吕邦泰副教授主审。主审人提出了很多宝贵意见和建议，对初稿的修改和提高很有帮助。在此，我表示衷心谢意。

限于本人水平，书中难免有不少缺点和错误，诚望读者不吝指正。

高镗年

初稿写于1984年元月

# 目 录

## 序 言

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 .....                 | 1   |
| 第一节 研究热工控制对象动力学的目的 .....     | 1   |
| 第二节 研究热工控制对象动力学的方法 .....     | 3   |
| 第二章 控制对象动态模型的描述方法 .....      | 8   |
| 第一节 概述 .....                 | 8   |
| 第二节 对象动态特性的时间域描述方法 .....     | 9   |
| 第三节 对象动态特性的频率域描述方法 .....     | 14  |
| 第四节 多输入量多输出量对象动态特性的描述 .....  | 17  |
| 第五节 用状态变量描述对象的动态特性 .....     | 19  |
| 第三章 用分析方法建立热工控制对象的数学模型 ..... | 26  |
| 第一节 概述 .....                 | 26  |
| 第二节 集中参数控制对象数学模型的建立 .....    | 33  |
| 第三节 分布参数控制对象数学模型的建立 .....    | 39  |
| 第四节 蒸汽管道中蒸汽压力和流量的动态特性 .....  | 45  |
| 第五节 汽包水位的动态特性 .....          | 49  |
| 第六节 双相介质蒸发区的动态特性 .....       | 54  |
| 第七节 燃烧室(炉膛)的动态特性 .....       | 65  |
| 第八节 原动机转速的动态特性 .....         | 72  |
| 第九节 中间再热式汽轮机的动态特性 .....      | 76  |
| 第十节 热工对象的低阶近似 .....          | 83  |
| 第四章 实验确定控制对象动态特性的时间域方法 ..... | 92  |
| 第一节 确定对象动态特性的时间域实验 .....     | 92  |
| 第二节 由飞升曲线确定传递函数 .....        | 100 |

|     |                                   |     |
|-----|-----------------------------------|-----|
| 第三节 | 由实验曲线确定微分方程系数 .....               | 107 |
| 第四节 | 利用实验数据进行数值重积分和微分 .....            | 112 |
| 第五节 | 时间域建模程序及应用 .....                  | 118 |
| 第五章 | 实验确定控制对象动态特性的频率域方法 .....          | 124 |
| 第一节 | 对象频率特性实验 .....                    | 124 |
| 第二节 | 由对象的脉冲响应函数 $h(t)$ 计算频率特性 .....    | 128 |
| 第三节 | 利用回归分析方法从对象频率特性拟合传递函数 .....       | 132 |
| 第四节 | 利用加权回归分析方法从对象频率特性<br>拟合传递函数 ..... | 146 |
| 第六章 | 控制对象的统计动力学 .....                  | 149 |
| 第一节 | 关于平稳随机过程的预备知识 .....               | 149 |
| 第二节 | 用相关分析辨识线性对象的原理 .....              | 153 |
| 第三节 | 用白噪声测定对象的动态特性 .....               | 156 |
| 第四节 | 用准随机信号辨识对象 .....                  | 158 |
| 第五节 | 最大长度二式序列——M序列 .....               | 162 |
| 第六节 | 用M序列辨识线性对象 .....                  | 168 |
| 第七节 | 用相关分析法辨识双输入-双输出线性对象 .....         | 175 |
| 第八节 | 用相关分析法辨识多输入-多输出线性对象 .....         | 184 |
| 第七章 | 控制对象离散时间数学模型的建立 .....             | 190 |
| 第一节 | 对象的离散时间模型 .....                   | 191 |
| 第二节 | 离散时间模型与连续时间模型的等价关系 .....          | 193 |
| 第三节 | 最小二乘参数估计 .....                    | 197 |
| 第四节 | 最小二乘参数估计的算法 .....                 | 204 |
| 第五节 | 加权最小二乘参数估计 .....                  | 209 |
| 第六节 | 广义最小二乘参数估计 .....                  | 211 |
| 第八章 | 连续系统仿真程序包 (CSS) .....             | 217 |
| 第一节 | 概述 .....                          | 217 |
| 第二节 | “CSS”程序包的简单介绍 .....               | 220 |
| 第三节 | “CSS”程序包的分析 .....                 | 229 |

|      |                        |     |
|------|------------------------|-----|
| 第四节  | “CSS” 程序包的使用方法 .....   | 239 |
| 第五节  | “CSS” 程序包应用举例 .....    | 244 |
| 附录一  | “CSS” 程序清单 .....       | 249 |
| 附录二  | “CSS” 程序中主要变量及数组 ..... | 275 |
| 附录三  | 关于矩阵运算的几个问题 .....      | 277 |
| 参考文献 | .....                  | 282 |



# 第一章 绪 论

## 第一节 研究热工控制对象动力学的目的

控制对象的动力学是研究被控制对象输入量发生扰动时各输出量随时间变化的特性，即动态特性。研究控制对象动力学的实质是要建立被控对象的动态数学模型，简称建模。建模的全过程可分为一次建模和二次建模。一次建模是指由实际物理系统到数学模型，二次建模是指由数学模型到计算机再现，即所谓仿真。

建立模型的基本问题是在对实际物理对象观察或试验的基础上，导出描述对象动态性能的数学表达式。因此所得到的模型是这些观察或试验结果的综合，在某种意义上，它完全可以代替物理对象本身。原来的物理对象在用一个数学表达式替代之后，就可以比较方便地从多方面来探讨这个对象的问题。应该指出，只有在非常特殊的情况下，数学模型才能表达对象或过程的所有细节。一般地讲，我们最多只能指望得到和对象有关的最重要的可观察特性的描述，它将包括关键性操作变量与参数变化时的效果。

现代热工控制对象的规模日益庞大，过程也日益复杂。要对这样复杂、庞大的控制对象或过程进行操作、自动控制、最优设计方面的研究和开发，都首先要求建立热工控制对象的动态数学模型。

近代由于电子模拟计算机和高速大容量电子数字计算机以及高级仿真语言的出现，为二次建模即再现数学模型提供

了非常方便有力的工具，这无疑又促进了过程数学模型化的发展。因此在现代工程系统的整体设计与分析研究中，控制对象或过程的数学模型化已经成为最重要的课题之一。

具体来说研究控制对象动力学的目的可以归纳为以下几个方面：

(1) 自动控制系统的合理设计及调节器参数的最佳整定 控制系统的设计、调节器参数的最佳整定都是以被控对象的特性为依据的。为了实现生产过程的最优控制，更需要充分了解对象的动态特性。因为设计最优控制系统的基本内容就是根据被控对象的动态特性和预定的性能指标，在一定的约束条件下选择最优的控制作用，使被控对象的运行情况对预定的性能指标来说是最优的，所以建立合理的数学模型，是实现最优控制的前提。

(2) 指导生产设备的设计 通过对生产设备数学模型的分析 and 仿真，可以确定个别因素对整个控制对象动态特性的影响（如锅炉受热面的布置、管径大小、介质参数的选择等，对整个锅炉出口汽温、汽压等动态特性的影响），从而对生产设备的结构设计提出合理的要求和建议，在设计阶段就有意识地考虑和选择有关因素，以求生产设备除了具有良好的结构、强度、效率等方面的特性之外，还能使之具有良好的动态控制性能。

(3) 培训运行操作人员 对一些复杂的生产操作过程，如飞行器的驾驶、大型舰艇和潜艇的操作以及大型电站机组的运行，都应该事先对操作人员、驾驶员进行实际操作培训。随着电子计算机和仿真技术的发展，已经不需要建造小的物理模型，而是首先建立这些复杂生产过程的数学模型，然后通过计算机仿真使之成为活的模型。在这样的模型

上，教练员可以方便、全面、安全地对运行操作人员进行培训。

(4) 检查在真实系统中不能实现的现象。例如一台单元机组及其控制系统究竟能承受多大的冲击电负荷，当冲击电负荷过大时会造成什么后果。这种具有一定破坏性的试验，往往不允许轻易地在实际生产设备上进行，而是首先需要建立生产过程的数学模型，再通过仿真对模型进行试验研究。

## 第二节 研究热工控制对象动力学的方法

热工对象动力学的研究方法可分为理论建模和试验建模两大类。

理论建模是根据对象的内部机理过程，经过分析建立起描述对象动态特性的数学表达式即数学模型。这种方法最大的优点是在生产设备还处于设计阶段就能建立其模型，而且由于该模型的参数直接和设备的结构、性能参数有关，这对新设备的研究和设计都有重要意义。对那些在实际生产过程中不允许轻易进行试验或进行试验非常困难的场合，理论建模是唯一可取的途径。

对于某些较简单的生产过程或对象，通过理论分析，应用一些基本定律如质量守恒定律、能量守恒定律、牛顿定律、克希霍夫定律等就可以找出输入量、输出量和其他变量间的动态数学表达式，即动态数学模型。

对于大多数的生产过程或对象，尤其象热工过程这样复杂的对象来讲，由于它具有多变量、多回路、非线性和分布参数等特点，或是由于对其内部物理、化学过程至今了解得还不够清楚，因此就不能象上述简单对象那样，经过一般的

理论分析就能建立起严格、精确的数学模型。为了对这种复杂的对象进行理论建模，通常的办法是首先作一些必要的假设和简化。例如应用小偏差线性化的理论，规定变量只在某一小范围内变化；应用分割的办法，把复杂的对象分割成若干个相对简单的区段，求出各区段的近似模型，然后再叠加起来。但是假设和简化的结果，无疑会带来一些误差，因此对于复杂的生产过程或对象应用理论分析法建模往往会降低其数学模型的真实性和准确性。

应用理论分析法建模所得的数学模型的阶数通常较高，在二次建模即仿真时，势必会对计算机的容量和速度也相应提出较高的要求。

理论建模主要是基于分析研究对象的结构及其内部的物理和化学过程，这就要求建模者要具有足够的相应学科的知识。理论建模法实际上也反映了相应学科的发展水平。由理论分析所得到的数学模型一般讲需要通过试验进行验证，尤其是在实际的生产过程中更需要这样作。

试验建模是在实际的生产设备上通过试验获得该对象某些参数的动态特性。一般来说，试验结果是可靠的原始资料，在某种特定的情况下，这些结果允许被推广到其他类似形式的对象上去。

这种通过对实际生产过程或对象的试验，取得输入、输出数据、然后对数据进行分析、处理，由此来确定模型的过程，也称为过程辨识或对象辨识。从大量的试验输入、输出数据中，找出一个与实际对象逼近的模型，该模型能表示真实对象的本质特性，这个模型使指标函数趋于最小，也就是说模型与实际对象等价。指标函数 $V$ 是实际对象输出 $y$ 与模型输出 $y_m$ 的函数，即

$$V = V(y, y_m)$$

试验建模或过程辨识一般都需要在被研究的过程或对象的输入端加入一定形式的扰动信号，这个扰动信号可以是阶跃信号、脉冲信号、周期信号，或者是在统计研究中采用的白色噪音信号，如图 1-1 所示。

就扰动信号的形式来分试验建模可分为时间域方法，频率域方法和统计方法三种。

理论建模和试验建模虽然属于两个不同的范畴，但是其目的相同，都是要建立一个能近似描述实际过程或对象动态特性的数学表达式。实际上一个工程技术人员或一个科学工作者在他要建立被控对象的模型时，或多或少应该对该对象的运动规律有所了解，尽管这种了解还不足以使他立即写出

对象的运动方程式，但却对他采用什么样的方法来建模，或建立一个什么样的模型有很大的帮助。另外，如上所述理论建模和试验建模可以作到相互验证和补充，事实上有些过程的模型就是二者的混合体，所以我们不主张将这两种方法截然割裂开来。当然，由于生产过程或对象种类繁多，物理、化学性能各不相同，因此本书仅限于讨论热工过程或对象的理论建模和试验建模的基本方法。

热工对象的理论建模通常可分为以下三个步骤：

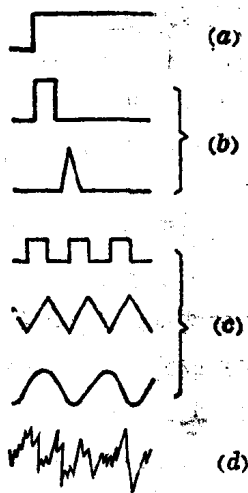


图 1-1 扰动信号  
(a)阶跃信号；(b)脉冲信号；(c)周期信号；(d)白色噪音

(1) 根据对象的内部机理过程和客观需要, 经过分析抓住本质问题, 进行必要的假设和简化;

(2) 确定对象的输入、输出量, 找出联系它们之间的关系, 确定支配这种关系的物理规律, 通常这些规律不外乎是物质守恒定律、能量守恒定律等基本物理定律, 利用这些物理定律列写对象的原始方程;

(3) 进行线性化, 消除中间变量, 最后得到只包括输入量和输出量的动态方程式, 或进一步演算整理成传递函数。

对象试验建模即辨识过程通常可以分为以下几个步骤:

(1) 试验设计 根据辨识的目的、被研究生产过程或对象的特点以及所具备的试验条件, 确定是用时域法还是用频域法或统计法。不管用哪一种方法, 其目的均在于获得被测对象的输入-输出数据, 因为各种辨识方法均建立在试验数据基础之上。试验设计中当然还应考虑实现各种试验方法的细节, 如扰动信号的幅度、频率、测量手段以及同试验有关的相应措施等。

(2) 模型结构选择 根据辨识的目的, 利用基本知识、定理等, 进行具体分析, 确定所要建立的模型是集中参数的还是分布参数的, 以及模型阶次的高低。

(3) 参数估计 参数估计是根据输入、输出数据以及模型结构来确定模型参数。

(4) 模型校验 经过试验设计、模型结构选择和参数估计三个步骤可获得初步的数学模型, 该模型是否可用, 需要经过校验, 即校核模型与实际对象的误差是否满足一定的指标函数。如果满足, 则确定为最后的模型, 否则修改模型的结构、阶次, 有时甚至要重新进行试验设计。

对象试验建模或辨识的几个步骤之间的关系可以借助于图1-2来说明。

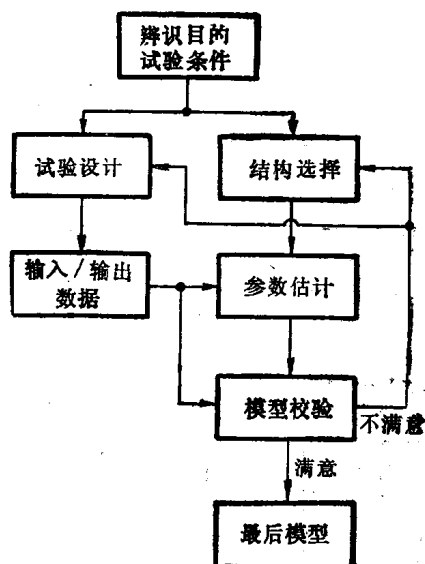


图 1-2 试验建模过程

## 第二章 控制对象动态模型的描述方法

### 第一节 概 述

这里着重讨论线性对象动态特性的描述，所谓线性是指对象输出量的静态值和输入量的静态值大小成比例；另外，当对象受到多个扰动（输入）量的作用时，它们对输出量的总作用等于每个扰动量单独作用引起效果的总和，即符合叠加原理。

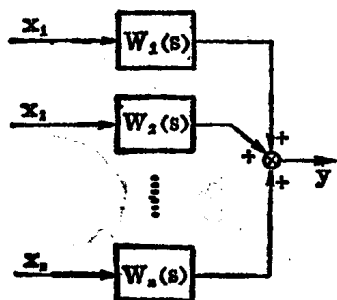


图 2-1 热工控制对象方框图

最简单的热工控制对象的方框图如图 2-1 所示。图中被控对象是多输入、单输出的物理系统，引起输出量  $y$  变化的原因往往很多（ $x_1, x_2, \dots, x_n$ ），而且各个输入量引起输出量变化的动态特性一般是不同的，这是热工控制对象的一个特点。

对于图 2-1 所示的热工对象，它的输出量的拉氏变换为

$$Y(s) = W_1(s)X_1(s) + W_2(s)X_2(s) + \dots + W_n(s)X_n(s) \quad (2-1)$$

式中  $W_1(s) = \frac{Y_1(s)}{X_1(s)}$ ,  $x_2, x_3, \dots, x_n$  不变;

$$W_2(s) = \frac{Y_2(s)}{X_2(s)}, x_1, x_3, \dots, x_n \text{ 不变;}$$



$$W_n(s) = \frac{Y_n(s)}{X_n(s)}, \text{ 当 } x_1, x_2, \dots, x_{n-1} \text{ 不变。}$$

这就是说，对于线性对象，根据线性叠加原理，我们可以把多输入量对象的问题转化成单输入量对象的问题进行研究。

当输入量在较小的范围内扰动时，对象往往可表现为线性。因此，如果遇到某个生产过程或对象的工作范围较大时，通常将它分成若干个小的区段，在每个区段内可以认为对象是线性的。

对象的动态模型有两大类：参数模型和非参数模型。参数模型是用数学方程式或函数表示的，例如微分方程、脉冲响应函数、阶跃响应函数、传递函数和状态方程等都是参数模型。非参数模型是用曲线表示的，例如阶跃响应曲线、脉冲响应曲线和频率特性曲线等都是非参数模型。

本章主要针对连续时间对象简要介绍几种参数模型的描述方法，关于离散时间对象参数模型的描述方法将在第七章中介绍。

## 第二节 对象动态特性的时间域描述方法

对象的动态特性实际上是指在动态过程中，输入参数与输出参数之间的关系，也就是这些参数对时间的各阶导数之间的关系，因此可以用微分方程来描述对象或过程的动态特性。

单输入量单输出量的对象如图2-2所示。设对象的输入量为 $x(t)$ ，输出量为 $y(t)$ ，则

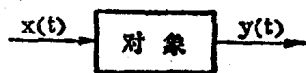


图 2-2 单输入单输出对象