

王广军 辛国华 著

# 热力系统动力学 及其应用

科学出版社

## 内 容 简 介

本书是一本应用基本物理定律和计算机仿真技术分析热力系统及热力设备动力学特性的专著。书中总结了国内外研究工作者特别是作者本人在热力系统动力学领域的主要研究成果,并给出了许多具体的应用实例。全书共分六章,系统地阐述了热力系统中典型环节及流体网络系统动力学过程的建模及数字仿真方法,讨论了热力系统数学模型的简化方法及简化方法的有效性,以及所建立的数学模型及仿真方法在不同应用领域的通用性。书中重点论述了热力系统中分布参数环节及流体网络系统的建模与仿真方法及其通用性问题。

本书可供能源、电力、化工、冶金及机械制造等行业的科研和工程技术人员参考,也可作为热能工程专业、电厂热能动力工程及其自动化专业及工程热物理专业的本科生及研究生的选修教材或教学参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

热力系统动力学及其应用/王广军,辛国华著. —北京:科学出版社, 1997. 9

ISBN 7-03-006062-8

I. 热… II. ①王…②辛… III. 热力系统-动力学-研究  
IV. TK123

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第12666号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

北 京 双 青 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1997年10月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1997年10月第一次印刷 印张:6 1/8

印数:1—1 200

字数:220 000

定价:20.50 元

## 前 言

热力系统是由若干热交换器、动力机械、压力容器、连接管路和其他辅助机械组成，并用于实现能量转换、热量传递，或完成某些特殊反应过程的系统，它在能源、电力、机械、冶金及石油化工等国民经济的重要部门和技术领域都有着十分广泛的应用。

随着国民经济和科学技术的迅速发展，特别是近几十年来火力发电技术的迅速发展以及原子能技术和和平利用进程的不断加快，以蒸汽发生系统为代表的热力系统日趋大型化、高参数化和复杂化。同时，对热力系统运行的可靠性与经济性，速动性和灵活性，以及热力过程自动控制水平等诸方面，都提出了更高和更为严格的要求。在这种情况下，设计和运行人员对热力系统和热力设备的运行特性，尤其是系统动态特性的掌握就显得前所未有的重要。而计算机技术的迅速发展又为复杂热力系统运行特性的定量分析奠定了坚实的物质基础。工程实际的迫切需求和现代计算机技术的不断进步赋予了这一研究领域新的使命和活力，从而吸引着国内外大批科技人员从事着范围相当广泛的热动力装置运行分析领域的科学研究与实践活动，取得了一批富有成效的研究结果。以此为基础，业已形成了一门新的交叉学科分支——热力系统动力学。

热力系统动力学是系统动力学、工程热物理与能源利用科学、自动控制理论及计算机仿真技术等相关学科间的一个综合性交叉学科分支，它主要研究热力系统及其设备的过渡过程，即研究在动态工况下热力系统中物质及能量的储存、释放、传递、迁移及流动等过程在时（间）空（间）域中的变化规律，从而为热力系统的优化设计、运行和控制提供理论基础，并能进一步揭示复杂

热工过程的内部机理，相应地还可以为热力系统的故障诊断提供依据。热力系统动力学的首要任务在于建立对象的数学模型并给出切合实际的分析方法。

本书较为系统地总结了国内外研究工作者特别是作者本人在热力系统动力学过程建模、数字仿真及其应用等方面的最新研究成果。全书共分六章。第一章概述了热力系统的主要特点、热力系统动力学特性的主要研究方法以及研究热力系统动力学特性的工程实际意义。第二章首先介绍了分析流体动力学过程的某些基本概念和基础方程，在此基础上建立了描述分布参数热工环节动力学过程的数学模型，并讨论了该模型在单、双相换热器中的具体形式。第三章为热工对象的集总参数动力学模型，重点论述了实际集总参数热工环节的建模方法及分布参数热工环节动力学模型的集总参数化方法。第四章为流体网络建模方法，借助于网络理论和流体力学基本定律对流体网络中各节点的压力及支路流量的瞬态特性进行了整体的概括和数学描述，并讨论了复杂流体网络的等效简化方法。第五章阐述了热力系统动力学模型的数值仿真方法。本章重点结合分布参数热流体系统自身的特点，介绍了一种行之有效的数值仿真方法——动态过程流体微元追踪计算方法，详细讨论了该方法在热力系统动力学特性实时仿真与工程分析间的通用性及在热力系统动、静态特性分析方面的通用性，并给出了具体的应用实例。第六章是本书前述内容的具体应用。利用前述的热力系统动力学模型及数值仿真方法对锅炉蒸发系统的水动力特性进行了较为全面的计算分析与综合，重点介绍了有关直流锅炉蒸发系统汽、液两相流不稳定性的数值分析结果。

东南大学章臣樾教授对书稿作了详尽的评审，提出了很多有益的改进意见。东北电力学院杨善让教授曾对本书的编写工作给予热情的关怀、鼓励和支持。在本书的编写过程中，东北电力学院有关领导和同事们也给予作者以各种支持和帮助。作者愿意借此机会向上述同志表示衷心的感谢。本书的出版及书中的部分研究内容还得到了东北电力学院博士基金的支持和资助。

由于对象本身的复杂性，热力系统动力学过程建模及仿真方法目前仍然是人们继续研究的一个重要课题。限于作者的水平和时间，书中难免存在这样或那样的缺点和不足，敬请读者鉴谅并不吝指正。

王广军 辛国华

1997. 5. 15 于东北电力学院

# 目 录

## 前言

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| <b>第一章 概论</b> .....             | 1  |
| § 1-1 系统的静力学特性和动力学特性 .....      | 1  |
| § 1-2 热力系统及热力系统动力学 .....        | 3  |
| 1-2-1 热力系统的主要特点 .....           | 3  |
| 1-2-2 热力系统动力学及热力系统的一般建模方法 ..... | 6  |
| § 1-3 热力系统动力学特性的计算机仿真 .....     | 8  |
| 1-3-1 系统的计算机仿真过程 .....          | 9  |
| 1-3-2 研究热力系统动力学的工程实际意义 .....    | 10 |
| § 1-4 热力系统动力学的发展及现状简介 .....     | 14 |
| 参考文献 .....                      | 17 |
| <b>第二章 分布参数环节动力学特性</b> .....    | 19 |
| § 2-1 概述 .....                  | 19 |
| § 2-2 流体力学过程的基础方程 .....         | 20 |
| 2-2-1 流体动力学特性的描述方法 .....        | 20 |
| 2-2-2 流体体系和控制体 .....            | 24 |
| 2-2-3 流体动力学基础方程 .....           | 26 |
| § 2-3 单相热工环节一维动力学模型 .....       | 31 |
| 2-3-1 无相变热交换器的一维简化物理模型 .....    | 32 |
| 2-3-2 单相换热管的一维动力学模型 .....       | 33 |
| 2-3-3 影响单相受热管动态过程的主要因素 .....    | 36 |
| § 2-4 双相热工环节一维动力学模型 .....       | 41 |
| 2-4-1 双相热工环节动力学过程的主要特点 .....    | 42 |
| 2-4-2 两相流动体系数学模型简述 .....        | 43 |
| 2-4-3 两相热工环节动力学过程均相模型 .....     | 44 |
| 参考文献 .....                      | 50 |
| <b>第三章 热工对象的集总参数动力学模型</b> ..... | 51 |
| § 3-1 单相集总参数对象动力学模型 .....       | 52 |
| 3-1-1 对象的物理模型 .....             | 52 |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| 3-1-2 单相集总参数对象数学模型 .....        | 54        |
| § 3-2 两相集总参数对象动力学模型 .....       | 56        |
| 3-2-1 概述 .....                  | 56        |
| 3-2-2 两相集总参数环节中的压力变动 .....      | 58        |
| 3-2-3 两相集总参数环节中的液位变动 .....      | 61        |
| 3-2-4 两相集总参数环节动力学过程分析 .....     | 62        |
| § 3-3 分布参数热工对象的集总参数化动力学模型 ..... | 71        |
| 3-3-1 分布参数系统的集总参数化建模方法 .....    | 71        |
| 3-3-2 单相受热管焓-温通道的集总参数化模型 .....  | 77        |
| 3-3-3 不同集总参数化模型的比较 .....        | 81        |
| § 3-4 环节能量方程的简化及金属的当量质量 .....   | 84        |
| 3-4-1 热工环节的蓄热能力 .....           | 84        |
| 3-4-2 受热面单热容简化模型 .....          | 86        |
| 3-4-3 能量方程的修正及金属的当量质量 .....     | 89        |
| § 3-5 燃烧室传热及压力变动集总参数化数学模型 ..... | 91        |
| 3-5-1 炉内传热的集总参数化模型 .....        | 91        |
| 3-5-2 燃烧室压力变动过程集总参数化模型 .....    | 93        |
| 参考文献 .....                      | 96        |
| <b>第四章 流体网络建模方法 .....</b>       | <b>97</b> |
| § 4-1 流体网络的基本概念 .....           | 98        |
| 4-1-1 网络的支路与节点 .....            | 98        |
| 4-1-2 流体网络与电网络的类比 .....         | 99        |
| 4-1-3 网络的关联矩阵 .....             | 103       |
| § 4-2 不可压缩流体网络数学模型 .....        | 105       |
| 4-2-1 节点流量方程 .....              | 105       |
| 4-2-2 节点压力方程 .....              | 107       |
| 4-2-3 不可压缩流体网络基本方程 .....        | 108       |
| § 4-3 不可压缩流体网络的等效 .....         | 109       |
| 4-3-1 纯阻力流体环节的等效 .....          | 110       |
| 4-3-2 纯阻力流体环节中节点的等效移动 .....     | 112       |
| 4-3-3 含有泵或风机的流体环节的等效 .....      | 114       |
| 4-3-4 复杂流体网络等效分析实例 .....        | 116       |
| § 4-4 可压缩流体网络的数学模型 .....        | 121       |

|                                     |                                 |            |
|-------------------------------------|---------------------------------|------------|
| 4-4-1                               | 可压缩流体网络节点流量方程 .....             | 121        |
| 4-4-2                               | 可压缩流体网络节点压力及支路阻力方程 .....        | 122        |
| 4-4-3                               | 可压缩流体网络支路的连续性方程 .....           | 123        |
| 参考文献 .....                          |                                 | 124        |
| <b>第五章 热力系统动力学模型的求解 .....</b>       |                                 | <b>126</b> |
| § 5-1                               | 集总参数模型的求解 .....                 | 126        |
| 5-1-1                               | 几种常用的数值积分方法 .....               | 126        |
| 5-1-2                               | 数值积分方法的选择 .....                 | 129        |
| § 5-2                               | 分布参数流体环节模型的通用数值方法 .....         | 132        |
| 5-2-1                               | 概述 .....                        | 132        |
| 5-2-2                               | 热力系统动态过程 Lagrange 描述法数学模型 ..... | 133        |
| 5-2-3                               | 单相受热面通用动态计算模型 .....             | 137        |
| 5-2-4                               | 双相受热面通用动态计算模型 .....             | 143        |
| 5-2-5                               | 热力系统中两类受热环节动态计算的统一模式 .....      | 144        |
| § 5-3                               | 热力系统流体环节动、静态过程一体化计算方法 .....     | 149        |
| 5-3-1                               | 锅炉单相受热面动、静态一体化计算方法 .....        | 150        |
| 5-3-2                               | 锅炉蒸发受热面动、静态一体化计算方法 .....        | 155        |
| 参考文献 .....                          |                                 | 160        |
| <b>第六章 蒸发系统两相流体水动力特性的数值分析 .....</b> |                                 | <b>161</b> |
| § 6-1                               | 概述 .....                        | 161        |
| § 6-2                               | 自然循环蒸发系统水动力特性计算分析 .....         | 163        |
| § 6-3                               | 强制流动单流道蒸发系统水动力特性的计算分析 .....     | 166        |
| 6-3-1                               | 通用动力学模型可靠性的验证 .....             | 166        |
| 6-3-2                               | 直流锅炉蒸发系统整体脉动的计算分析 .....         | 170        |
| § 6-4                               | 多流道强制流动蒸发系统水动力特性计算分析 .....      | 177        |
| § 6-5                               | 沸腾流道水动力特性的综合 .....              | 184        |
| 参考文献 .....                          |                                 | 186        |

# 第一章 概 论

热力系统动力学是系统动力学的一个重要分支。

系统是由相互联系、相互制约、相互作用的各部分组成的具有一定整体功能和综合行为的统一体<sup>[1]</sup>。我们习惯上把组成系统的各部分称为子系统或环节。系统动力学是研究系统在外界作用下的运动规律及变化行为的一门综合性学科,其主要内容可以概括为两个方面:

(1) 根据系统的输入及所建立的系统数学模型确定系统的运行状态和系统的输出,即系统分析问题;

(2) 给定系统的输出和系统的数学模型确定系统的输入规律,即系统控制问题。

本书仅限于讨论上述第一方面的内容,即热力系统的建模及分析问题。关于第二方面的内容,感兴趣的读者可参阅有关文献<sup>[2]</sup>。

## § 1-1 系统的静力学特性和动力学特性

任何一个实际的物理系统(图 1-1)均有两种运行状态。如果系统没有受到任何来自外界的干扰且组成系统的各环节的输入向量  $u(\tau)$  及输出向量  $y(\tau)$  处于平衡(质量平衡、能量平衡及力平衡)状态,那么系统内部各状态参数及系统的输出向量  $y(\tau)$  不会随时间  $\tau$  而变化,整个系统处于稳定的平衡状态,即静态(稳态)。在静态工况下,系统的输入、输出及各状态参数间的制约关系就是系统的静力学特性(静态特性),相应地把这种关系的定量数学描述称为系统的静力学模型(静态数学模型)。当系统受到来自外界的干扰或输入量发生变化后,系统原来的平衡状态遭到破坏,系统中各

组成部分的输入输出量以及系统内部所储存的物质与能量都将相继发生变化,这时称系统处于动态.在动态工况下,系统各状态参数及系统输出的变动规律就是系统的动态特性,描述这种变动规律的定量关系式就是系统的动力学模型(或动态数学模型).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.

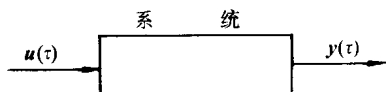


图 1-1 系统的输入与输出

系统动力学模型与静力学模型间的主要差别在于,前者含有时间变量 $\tau$ ,后者则与时间无关.如果系统本身是稳定的,随着时间的

推移,动态系统将逐步趋于一个新的稳定的平衡工况.系统从一个静态工况到达另一个静态工况的历程,称之为系统的过渡过程.从理论上讲,实际物理系统的过渡过程时间为无限大,但在工程上,当系统的各状态参量的变动速度可以忽略不计时,就可以认为系统的过渡过程已经结束.

系统的动力学模型和静力学模型分别反映了系统在动态和静态工况下输入输出间的传递关系.根据输入输出关系上的某些特点,又可将系统分为两类,即有记忆系统和无记忆系统.

一个系统,如果它在任一时刻 $\tau$ 的响应(或输出) $y(\tau)$ 唯一地决定于同一时刻系统的输入 $u(\tau)$ ,即

$$y(\tau) = y[\tau, u(\tau)] \quad (1-1)$$

则表明,系统在任一时刻的响应对同时刻的输入始终保持确定的关系,而对过去的输入没有记忆作用,称之为无记忆系统.

相应地,如果系统在任一时刻的响应 $y(\tau)$ 不仅与 $\tau$ 时刻系统的输入有关,而且还受 $\tau$ 时刻以前的所有输入作用的影响,即

$$y(\tau) = y[\tau, u_{(-\infty, \tau]}] \quad (1-2)$$

则称之为有记忆系统.式(1-2)中的 $u_{(-\infty, \tau]}$ 代表系统在时刻 $\tau$ 及以

前的所有输入作用。

当系统参数不随时间变化时,即对于非时变系统,则式(1-1)及式(1-2)可简记为

$$y(\tau) = y[u(\tau)] \quad (1-1a)$$

$$y(\tau) = y[u(-\infty, \tau)] \quad (1-2a)$$

系统的记忆能力越强,说明系统对输入作用的响应速度越慢,即系统的惯性越大。

真实物理系统中状态的变化,总是通过系统中存在着的物质与能量的转换或传递来体现的。这种转换或传递显然不能瞬时完成,因此严格地说,一切真实物理系统均具有记忆能力。但是,如果系统中某些环节的记忆能力(或惯性)与其他部分相比可以忽略不计并对分析整个系统的行为也没有重大影响的话,则可以假设其中状态的变化是随着产生状态变化的原因而瞬时地出现的,即认为这些环节动态过程的过渡时间为零,且其动态特性与静态特性均可用式(1-1a)所示的静态模型(实际上为瞬态平衡模型)来描述。这也是在复杂系统分析过程中经常采用的一种重要的简化方法。

## § 1-2 热力系统及热力系统动力学

### 1-2-1 热力系统的主要特点

热力系统是由若干动力机械、压力容器、连接管路和其他辅助机械组成,并用于实现能量转换、热量传递或完成某些特殊反应过程的系统。热力系统中各组成部分之间存在着机械、气动、热力、传热传质及其他多种形式的联系。

热力系统在能源、电力、机械、冶金及石油化工等领域有着十分广泛的应用,主要包括:

- (1) 锅炉-蒸汽轮机动力系统;
- (2) 核电站蒸汽发生器系统;

- (3) 燃气轮机动力系统;
- (4) 热流体网络系统;
- (5) 各种联合循环系统;
- (6) 各种能量回收动力系统;
- (7) 冶金、化工和石油化工等大型企业中与工艺过程密切联系在一起的复杂热力系统。

这些热力系统通常由高温、高压和高速设备有机地结合在一起。一台设备、一个过程的改变都会造成多方面的影响。系统的稳定工作是各部分相互匹配、平衡的结果。

随着国民经济和科学技术的进步,热力系统不断地向大型化、复杂化方向发展。这不仅对热力系统运行的安全性、经济性、机动性等方面提出了更为严格的要求,而且还要求热力系统具有最大的可用率。因为大型电厂停止运行一天,或大型石化、化工、冶金企业停止生产一天,都会导致巨大的经济损失和严重的社会影响。为此,就必须大力加强热力系统运行分析方面的研究工作。

热力系统一般均具有以下几个方面特点:

### 一、分布参数

热力系统一般占有很大的空间,其中常常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。因此,系统的热工状态参数既是时间的函数,也是空间的函数。描述系统状态的控制方程一般均由偏微分方程组成。

### 二、工作过程复杂并相互影响

在热力系统中包含着各种复杂的物理化学过程,从简单的机械运动,到各种热学现象和质能迁移以及复杂的化学反应。例如,在锅炉炉膛(燃烧室)内同时进行着燃料的燃烧放热、燃料及燃烧产物的湍流扩散、传热传质及受热面污染等各种复杂的物理化学过程,且各种过程又相互制约、相互影响。其中的许多过程,如炉内

燃烧的化学动力学过程及气固多相流动与传热过程的机理,目前尚不甚清楚.

### 三、系统的刚性问题

热力系统中各种过程的时间常数可能相差很大. 首先,系统中机械运动过程的惯性一般远小于系统中热量迁移过程的惯性. 例如,汽轮机转子转速变化的时间常数与不稳定热传导过程中转子温度场变化的时间常数相比几乎可以忽略不计;在拥有换热器的流体通道中,压力及流量的变动传递得很快,而温度(或焓)的变化过程却很慢. 其次,即使是同一类变化过程,对于系统中不同的工作介质而言,其变动速度也可能存在着很大差别. 例如,锅炉烟气侧焓和温度的变化速度要比锅炉汽水侧焓和温度的变化速度快得多<sup>[3]</sup>. 这种特点决定了所建立的热力系统动力学模型必然是一个严重的数学刚性系统.

### 四、系统的非线性

描述热力系统中工作介质动态过程的质量守恒方程、能量守恒方程和动量守恒方程都是非线性微分(或偏微分)方程. 此外,与上述守恒方程密切相关的流体热力学状态方程及传热方程也都具有典型的非线性. 因此,严格地说,热力系统的动力学特性在不同的初始工况下是不同的,亦即不符合叠加原理.

### 五、多变量多回路

大型热力系统一般都有许多控制量和许多输出量(被控量). 例如,一台电站锅炉约有十几个主要输入操作量和几十个输出量. 这些输入量和输出量间相互联系、相互影响,形成了若干并联、串联和交叉影响的闭合回路. 即使是一些结构上比较简单的热工环节,其被调量及影响被调量的因素(控制量)一般也可能很多,下面以管式加热炉(图 1-2)为例加以说明.

管式加热炉是石油工业中的一个重要装置. 它的任务是把原

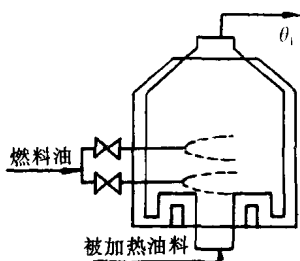


图 1-2 管式加热炉示意图

油或重油加热到一定的温度以保证下一道工序(分馏或裂解)的顺利进行. 燃料油经蒸汽雾化后在炉膛内燃烧, 被加热油料流过炉膛四周的排管后, 被加热到出口温度  $\theta_1$ . 引起  $\theta_1$  改变的扰动因素很多, 主要有:

- (1) 燃料油方面的扰动(燃料油的组成及调节阀前的油压);
- (2) 雾化蒸汽压力扰动;
- (3) 被加热油料方面的扰动(流量及入口温度);
- (4) 配风及炉膛漏风方面的扰动.

### 1-2-2 热力系统动力学及热力系统的一般建模方法

热力系统动力学(或热工动态学)是系统动力学、工程热物理与能源利用科学、自动控制理论及计算机仿真技术等相关学科间的一个综合性交叉学科分支. 它主要研究热力系统及其设备的过渡过程, 即研究在动态工况下热力系统中物质及能量的储存、释放、传递迁移及流动等过程在时(间)空(间)域中的变化规律. 它以描述宏观物理现象的力学、热力学、传热传质学及气体动力学等的基本定律为基础, 借助于控制理论方面的分析方法和计算机仿真技术, 研究在各种非定常过渡过程中, 不同热力系统的输入变量、状态变量及输出变量之间的相互依赖关系, 从而为热力系统的优化设计、运行和控制提供理论基础, 并能进一步揭示复杂热工过程的内部机理, 相应地还可以为热力系统的故障诊断提供依据.

热力系统动力学的首要任务在于, 建立对象的数学模型并给出切合实际的分析方法.

热力系统动态过程的建模方法分为两类, 即理论分析方法和实验测定方法. 由此得到的过程数学模型, 分别称之为理论解析模型和经验归纳模型.

所谓经验归纳建模,就是根据系统的实际输入量和输出量的变化情况确定系统的数学模型。显然,经验归纳建模方法只适用于已经建成并投入运行的设备或系统。由于热力系统一般具有较多的输入变量和输出变量,经验归纳方法建模的工作量十分繁重,且所得到的数学模型的通用性较差。对于指定的热力系统或设备,经验归纳模型的精度主要取决于取得原始数据的广泛程度以及进行数据处理的方法和手段。这种建模方法已经成为一门专门的学科——系统辨识与参数估计。本书对此类方法不予讨论。

理论解析建模方法是从系统的内部物理过程出发,建立系统动力学过程方程组(即动力学模型),然后通过动力学模型的求解确定系统的动力学特性。这是本书将要论述的主要内容。

由于对象本身的复杂性,在利用理论解析方法建立热力系统动力学模型时,常常涉及到下面几种分析简化方法:

### 一、系统分解

系统分解是复杂大系统研究过程中的一种重要分析方法或设计思路,即先暂时完全“切断”系统中各子系统(或设备)间的状态关联,将大系统分解为若干相对简单的子系统(或环节),利用相应的基础理论分别建立起各子系统(或环节)的动力学模型,然后把这些局部模型综合起来,构成描述复杂大系统动力学过程的数学模型。例如,在研究锅炉-汽轮机热力系统动力学过程时,可首先将其分解为锅炉和汽轮机两个子系统,而其中的锅炉子系统又可按汽水流程分解为省煤器、蒸发受热面、过热器及再热器等若干个环节。整个系统的数学模型因此具有模块式结构。

### 二、过程分离

过程分离是解决刚性系统问题的一种有效方法。它实际上是一种简单的奇异摄动处理技术。首先将热力系统的状态变量分为快变量和慢变量两种,由相应变量所发生的过程组成快、慢两类系统(即双时标系统)。若重点研究慢过程,则可将有关的快过程视为

一种无记忆能力系统,其过程数学模型可以足够精确地用静态瞬时平衡模型替代;若主要目的是研究系统的快过程,则慢过程变化常可略去;若两者都是研究的目标,则可组成不同的通道(或子系统)再予以分别处理。

### 三、集总参数化

热力系统中的许多设备或装置都可以足够精确地看作集总参数环节,如锅炉的汽包、分离器、混合式反应器等。此外,在对模型精度要求不太严格的一些应用场合(如控制系统设计和建立热力系统仿真培训装置时),还常常将某些典型的分布参数环节(如管式换热器及长距离输送管道)看作由若干个集总参数环节串联而成,有时甚至可以将其简化为一个集总参数环节。对这些具有典型分布参数特性的热工环节究竟是否需要集总参数化处理,以及在集总参数化时应将其简化为多少个集总参数环节,应根据对模型精度及运算速度的要求及所采用的计算工具的性能等情况确定。对此类分布参数环节建立简单适用又具有足够精度的动力学模型,近几十年来一直成为人们在热力系统动力学领域中的一项重要研究工作。

## § 1-3 热力系统动力学特性的计算机仿真

系统的建模和仿真是研究系统动力学特性的两个密不可分的基本内容。

系统动力学模型确立之后,系统分析的主要内容就归结为系统动力学模型的求解与分析问题。这种利用模型(物理模型或数学模型)来研究实际系统的方法叫做系统模拟或系统仿真,简称“仿真”(Simulation)。采用物理模型来模仿实际系统,通常称之为“物理仿真”;相应地则把采用数学模型来模仿实际系统的研究方法称为“数学仿真”。

由于数学仿真的主要用具是计算机,因此一般又称数学仿真

为计算机仿真. 计算机仿真可分成三种: 用模拟计算机进行仿真的, 称之为模拟仿真; 用数字计算机进行仿真的, 称之为数字仿真; 用数字计算机和模拟计算机联合进行仿真的, 称之为混合仿真. 本书以后章节中所说的“计算机仿真”, 特指数字仿真.

### 1-3-1 系统的计算机仿真过程

对一个系统进行数学仿真, 就是建立该系统的过程数学模型并在模型上进行试验. 由此可知, 系统、模型和仿真三者之间有着密切的关系. 简言之, 系统是我们研究的对象, 模型是系统的某种描述, 仿真则为模型上的试验, 而计算机仿真则是利用数学模型在计算机上所进行的试验研究过程.

根据以上关系, 在对一个实际系统的动力学特性进行仿真研究以前, 必须首先建立起描述该系统动力学过程的数学模型, 即系统的一次建模过程. 有了描述系统动力学特性的数学模型后, 还必须将其转换为计算机能够接受, 亦即能在计算机上运行的所谓仿真模型才能进行仿真试验, 这个转化过程也称为系统的二次建模过程. 图 1-3 中给出了系统计算机仿真过程的主要流程.

一般地讲, 对于指定的系统, 当仿真试验的目的不同 (如建立实时仿真培训系统和建立工程设计分析仿真系统) 时, 所采用的数学模型的类型及系统的简化条件也不尽相同. 相应地, 模型的求解方法也应有所差别.

随着科学技术的不断进步, 尤其是计算机技术的迅速发展, 在各个工业领域, 甚至社会科学领域, 系统建模及计算机仿真方法显得日益重要. 据报道<sup>[2]</sup>, 德国科研部门已把这项技术列入 21 世纪重点发展的关键技术之一.

目前, 系统建模及计算机仿真已差不多覆盖了现代社会的各个主要方面, 如能源、交通、航空、航天、冶金、化工、生态、环境, 以及军事、人口、经济运行和金融运作等. 伴随着人们对物理过程理解的逐步深入和计算机软件、硬件技术的发展, 系统建模及计算机仿真技术必将不断地细化、深化, 在更加广泛的领域中发挥更大的