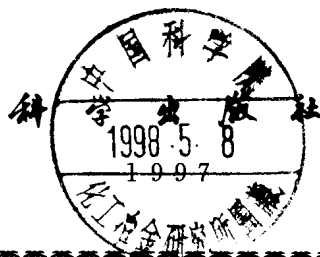


72.94
125.2

热力系统动力学及其应用

王广军 辛国华 著

34575/09



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^[1]. 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^[2].

§ 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 τ 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。

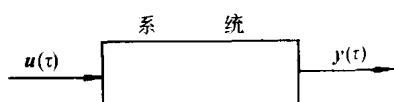


图 1-1 系统的输入与输出

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 τ ,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 τ 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 τ 时刻系统的输入有关,而且还受 τ 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 τ 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的特点:

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^[3]. 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

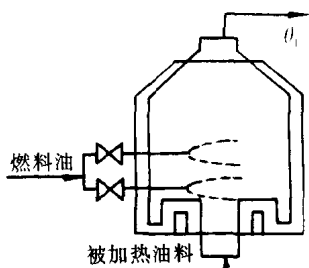


图 1-2 管式加热炉示意图

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 θ_1 . 引起 θ_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, 研究在各种非正常过渡过程中, 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进行集总参数化处理,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^[2], 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

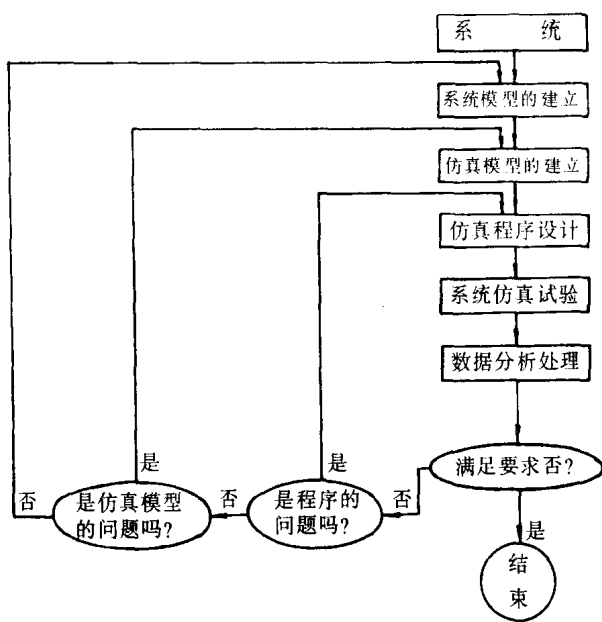


图 1-3 计算机仿真过程

作用。

1-3-2 研究热力系统动力学的工程实际意义

研究热力系统动力学的主要目的在于,揭示热力系统及其设备在运行过程中的内在规律性,并在此基础上寻求改善系统及其各组成部分的动、静态品质的技术措施和合理的控制方式。

无论是过去还是现在,火力发电工程领域的实际需要都是热力系统动力学作为一门新兴学科发生和发展的最直接的推动力。特别是最近十几年来,由于火电机组参与电网调峰任务的不断加强和超临界压力火电机组的大量投产,对机组运行的可靠性与经济性、速动性和灵活性等诸方面都提出了更为严格的要求。在这种情况下,设计和运行人员对火电机组的运行特性,尤其是对机组热力系统及设备动态特性的掌握就显得前所未有的重要。下面仅以

火电机组热力系统为例,概述研究热力系统动力学的工程实际意义.

一、控制系统及控制方式的确定

对被控制对象响应特性的掌握是设计控制系统的必要前提和基础.现代控制计算机的应用为创造完善的自动控制系统开辟了广阔的前途,但这种可能性只有在足够详细地了解被控制对象内部动态过程的基础上才能实现.经验证明,在复杂对象过程控制中,许多失败的先例都是由于对被控制对象的响应特性估算得不够而铸成的.

电站热力系统是一个高度复杂的非线性时变控制对象,同时在运行过程中各有关参量(如温度、压力、流量、水位)之间存在着强烈的耦合作用.因此,只有在对整个系统的动力学特性有了充分了解之后,才能确定出设计控制系统所需要的准则和参数.

二、为机组的设计提供优化依据

在火电技术高度发展的今天,传统的以静态校核计算为主的设计方法已日益明显地难以保证实际生产对设备性能的要求.因此,在大型火电机组的设计阶段,对机组的各种工况及各工况间的过渡过程进行全面的仿真试验研究,并在此基础上寻求改善设备动、静态品质和机组对外界负荷适应能力的有效途径,对于提高机组运行的安全性和经济性具有重要意义.

在锅炉过热系统的设计过程中,通过对存在调节作用时汽温动态特性(即系统的闭环响应)的仿真研究,可以合理地确定过热器受热面的结构参数、喷水减温器的数量及各喷水点的合适位置,以保证锅炉在运行过程中整个过热器受热面金属温度及过热汽温的最大超调量均处于所允许的范围内;在直流锅炉机组的设计过程中,对包括启动分离器在内的锅炉蒸发系统的动态特性进行全面计算分析,对于锅炉启动参数的确定、启动分离器的布置方案、分离器疏水排放能力的确定及水位控制方式的选取等均有十分重

要的指导意义;在汽轮机旁路系统的设计过程中,也必须对机组在启、停和甩负荷事故工况下的过渡过程进行仿真分析,以便合理地确定汽轮机旁路系统的通流能力;在设计汽包、分离器和工质集箱等厚壁金属元件时,还要通过不同工况下元件内部暂态温度场及应力场的计算来校核此类厚壁元件在运行过程中的安全性,这也是一个典型的热工动态学问题。

三、机组启停及运行方式的优化

随着我国电网装机容量的不断扩大和核电机组的逐步增加,供电的峰谷差矛盾日益突出,目前这一差值已达电网最高负荷的30%—50%。在这种供电形势下,大型火电机组参与电网调峰运行已成必然之势。

频繁启停是机组参与调峰运行的一个主要特征。如采用两班制或少汽无功运行方式,机组每年一般要启停150次以上。无疑地,加强机组热力系统合理启停方式的研究,对于保障调峰机组乃至整个电网运行的可靠性和经济性均有十分重要的实际意义。启动和停运是机组最重要的和最基本的过渡过程。因此,对机组在启停期间的动态品质必须予以足够的重视。机组的启停过程,实际上是一个连续加热或冷却过程。以机组启动为例,把机组的全部系统和设备从静止状态启动到正常运行状态,要经历一个缓慢的加热过程。在此期间,既要保证系统中工质流动稳定、设备加热均匀、膨胀顺畅、最小限度地消耗机组的使用寿命,又要尽量地缩短启动时间和减小启动损失以获得最大的热经济性。为此,作为制定机组启动运行操作规程的一个重要依据,必须对机组在不同启动工况(启动流量、启动压力及其控制规律、燃烧率的变动速度等)下的动态行为进行全面的仿真研究。

经常性的负荷大幅度变动和长期处于部分负荷下运行是机组参与调峰运行的另一特点。为保证机组低负荷运行的经济性及维持锅炉过(再)热汽温的基本恒定,承担部分负荷的火电机组一般倾向于采用变压运行方式或复合变压运行方式。研究机组在不同

运行方式下的工作性能,有助于选择适于电网负荷变化并能满足设备工作条件的运行方案.例如,通过对自然循环锅炉在不同扰动工况下主蒸汽压力及流量响应特性的仿真分析,可以为如何安全有效地利用设备蓄热能力服务于机组调峰运行提供指导性意见^[4];根据汽包水位、汽包压力、循环流量及汽包暂态温度场及应力场的动态特性,可以确定出机组对外界负荷的适应能力,亦即机组的调峰能力^[5];通过对直流锅炉汽温及工质相变点响应特性的计算分析,可望获得最佳的燃水比及其控制规律,以保证在负荷变动过程中过热汽温的波动幅度最小.此外,根据直流锅炉蒸发系统两相流动瞬态过程及其水动力稳定性的仿真试验结果,还可以估算出直流锅炉的最低启动压力及机组以变压运行方式参与负荷调节时所允许的最低工作压力^[6].

四、建立机组运行实时仿真系统

随着火电机组向着大容量、高参数和机、炉、电集中控制的方向发展,机组运行自动化程度逐步提高.高度自动化的倾向减少了运行人员对机组运行的干预机会,甚至取消了运行人员的某些基本操作,从而使得运行人员进行现场训练和教育的时间变得越来越长,而且往往收效甚微.一方面,为保证机组运行的高度安全性和高度经济性,要求运行人员具有更高的技术修养.国内外电力工业统计表明,发电机组 20%—30%的安全性问题取决于系统的设计和设备的维修,其余的 70%—80%则依赖于运行操作人员技术水平的提高.震惊世界的三哩岛和切尔诺贝利核电站事故,其中一个重要的事故原因就是操作人员违反操作规程和核电厂安全运行准则,以及操作人员判断失误造成事故后果的扩大^[7].另一方面,传统的现场培训方法已明显地难以满足这一高度自动化了的生产过程对操作人员的严格要求.

为了有效地提高运行人员的专业知识、操作技能和事故应变能力,从本世纪 60 年代开始,研究人员探索出采用脱离实际发电现场的电站实时仿真系统对机组运行人员和技术管理人员进行培

训,经过几十年的努力,目前火电机组计算机实时仿真技术在工业发达国家已日趋成熟,并已取得了重大的经济效益和显著的社会效益。

五、热力系统的故障诊断及故障分析

系统故障诊断技术的主要任务包括故障检测、故障分类及故障定位、故障分析(或评价)和未来操作决策等方面。

火电机组运行过程故障诊断是保障电力生产过程安全性和经济性的重要手段,因而也一直是引人瞩目的一个研究方向。

由于过程本身的高度复杂性,人们在进行电厂热力系统故障诊断时所面临的首要任务在于,如何确定所检测出的过程征兆对于各类典型故障的隶属度,即过程的故障分类和故障定位问题。为此,就必须对系统在各种输入扰动及故障工况下的响应特性进行全面的仿真分析,确定出系统的各有关可观测参量与上述各种扰动及故障程度间的定量关系。

故障评价的主要任务在于,分析所检测出的故障将如何影响系统的工作过程,从而为系统的未来操作提供决策。因此,从本质上讲,系统的故障评价即意味着对系统在某些特定扰动(故障)作用下的响应特性作出预报。

§ 1-4 热力系统动力学的发展及现状简介^[8]

迄今为止,人们对热工控制对象动态特性的理论研究已有半个多世纪的历程。半个多世纪来,随着科学技术的不断发展和工程界需求的日益增长,人们在这一领域的科研工作,无论是从方法上还是在内容方面均发生了并正在发生着根本性的变化,并逐渐形成了一门新兴的交叉学科——热力系统动力学。

在本世纪 40 年代,大部分研究工作都把热工过程看作是集总容积的调节对象,即一阶惯性环节。但在许多情况下,这种简单的单容环节并不能表示某些过程(尤其以温度为主要参数的过程)的

动态特性. 虽然以后采用了多容环节和纯迟延时间来表示复杂热工调节对象的动态特性,但这种表达方式也还只能局部地反映这些对象的特性. 许多动态过程参数(如时间常数、迟延时间等)大部分是由实验得到的.

热力设备线性化分布参数模型的研究大约始于 50 年代中期. 1957 年, А. А. Таль 基于分布参数模型推导了描述锅炉汽水系统单相受热面动态特性的传递函数^[9]. 1958 年 Chien 等人利用线性化差分方程模型首次在模拟计算机上对自然循环锅炉的动态过程进行了分析^[10]. 自 1961 年开始, В. М. Рущинский 及其合作者对锅炉单、双相两类受热环节在分布参数意义下的传递函数进行了详细的研究,并先后借助于电子模拟装置和电子计算机分析了锅炉-汽轮机热力系统在小扰动范围内的动力学特性^[11-13],为改善单元机组热力系统的设计性能、设计和优化控制系统提供了理论依据. 1962 年, M. Enns 以锅炉的过热器为例,对单相分布参数受热环节建模过程中的几种简化方法进行了计算分析并得出了一些十分有价值的结论^[14],对这一课题的研究作出了重要的贡献.

60 年代末期,随着火电机组容量的不断提高和机组参与电网调峰任务的加强,特别是在采用滑参数运行方式的超临界压力火电机组相继投产以后,设计和运行人员对机组热力系统在全工况范围内的动态品质的掌握程度,业已成为能否保证机组安全经济运行的一個关键因素. 为此,人们在火电机组热力系统非线性数学模型及其数值仿真方法等方面进行了日益广泛的深入研究^[15-19],并为发电机组全工况实时数字仿真培训系统的研制与开发奠定了必要的理论基础. 1979 年 3 月美国三哩岛核电厂事故从根本上改变了公众和电力部门对核电厂运行人员的培训态度,从而研制核电厂专用仿真培训系统的热潮开始兴起,并持续至今日. 为保证仿真培训系统运行的实时性,在建立复杂热力系统动力学模型时,均倾向于采用集总参数化的简化条件.

经过 30 余年的努力,目前发电机组(包括火电机组和核电机组)计算机仿真培训技术在工业发达国家已日臻完善,同时利用理

论模型和计算机仿真技术对电厂热力系统的运行性能进行全面的定量分析已愈来愈引起研究人员的高度重视,并已获得了令人鼓舞的进展,显示了日益诱人的应用前景。

美国 EPRI(Electrical Power Research Institute) 在火电机组运行性能分析领域进行了大量的研究工作,于 1984 年成功地开发出 MMS(Modular Modelling System),并被用于火电机组的动态特性分析以及评价各种扰动工况对机组运行的影响^[20,21]。在近十几年,建立可靠的数学模型和分析方法,利用仿真技术对火电机组运行性能进行定量评价,从而为机组的设计和运行提供优化依据,一直成为 EPRI 研究发展规划中的一项主要内容^[22,23]。

70 年代末期,德国 Stuttgart 大学开发了一种适于火电机组大状态变动工况下运行特性分析的非线性数学模型及相应的计算机软件,并于 1984 年获得了阶段性的试验验证^[24]。据报道,这一研究项目的远期目标主要用于机组部件的应力分析及寿命管理,并为机组的启动及故障停机提供可靠的操作指导。

在此期间,原苏联的中央锅炉-汽轮机研究所(ЦКТИ)和全苏热工研究所(БТИ)等部门,在过去几十年所积累的实践经验和理论研究成果的基础之上,积极地进行包括蒸发系统两相流动不稳定性在内的超临界压力火力发电机组运行性能分析数学模型的研究工作^[25-27]。

在国内,以建立火电机组仿真培训系统为契机,在热力系统建模与仿真方面完成了大量卓有成效的研究工作。继 1983 年我国第一台自行研制的 200MW 燃煤机组仿真培训系统研制成功之后,300MW 和 600MW 火电机组及 300MW 核电站模拟培训系统先后投入运行。但从总体上讲,热动力装置模块化建模及仿真系统的研究在我国还刚刚起步。例如,结合 200MW 火电机组模拟培训系统及催化裂化装置的能量回收系统模块化建模进行了大量的工作,但在功能(能用于动、静态特性分析及性能优化)、通用性(适于不同的应用目的)及模型的求解方法等方面还有大量的内容有待研究。针对这种状况,近几年来国内有关方面在热力系统通用数学