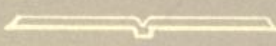


热工调节对象动态特性译文集



科学出版社

热工调节对象动态特性译文集

林 来 兴 編

科 学 出 版 社

1-9-6-5.

內 容 簡 介

本书汇集了国外发表的有关热工調节对象动态特性方面具有代表性的論文 21 篇,其中包括:热力設備(主要是汽鼓式、直流式鍋炉設備和过热器) 9 篇; 工业上各种类型热交換器 7 篇和核反应堆 5 篇。在本书序言中編者对热工調节对象动态特性的概况作了綜述。在本书附录中收集和編譯了国外近十多年来有关热工調节对象动态特性的論文专题索引四百多篇,包括十多个文种。

本书可供从事自动化的科研人員、教师及大学高年級学生等参考之用,其中一部分資料也可供有关电站、化工、石油、冶金、原子能等設備的設計和制造工程人員参考。

3106

热工調节对象动态特性译文集

林 来 兴 編

*

科学出版社出版

北京朝阳門内大街 117 号

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1965 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1965 年 4 月第一次印刷 印张: 22 插頁: 1

印数: 0001—3,800 字数: 499,000

统一书号: 15031·173

本社书号: 3164·15—3

定价: [科七] 3.10 元

序 言

随着科学技术的飞跃发展,生产过程和设备的日益完善,调节对象的动力学以及它在结构设计和自动调节系统中的应用,目前已渐渐形成一门学科。为了今后讨论和确定这门学科应有的地位,这里收集近十多年来国外有关热工调节对象动态特性论文四百多篇,编成专题索引(本书附录),并就其中选取 21 篇论文编译成本书。下面准备就热工调节对象动态特性的概况与本书内容作简要综述和介绍。

一、研究对象动力学的目的

根据对象的动态特性可以合理地选择调节方案和設計调节系统^[1],例如,設計一个自治调节系统(或不相关调节)时,必須准确了解调节对象的动态特性及其数学描述,因为自治调节系统的结构完全取决于对象特性。經驗証明:在复杂对象的调节中,許多失敗都是由于对对象特性估計得不够正确所引起的^[2]。

为了迅速和及时地投入调节系统,并保証系统在最佳和可靠的条件下工作,必須根据对象动态特性正确整定调节系统的参数。

研究对象动力学也是改进現有调节系统存在问题的一个有效途径。

研究对象动力学可以对结构设计提出正确和合理的要求。这项工作在设计阶段就应完成,因为如果在设备制成投入运行时才发现必須对设备结构进行某些改造,那就非常困难,甚至不可能。例如,在具有表面式减温器的鍋炉过热温度调节中所遇到的种种困难^[3]。此外,研究对象动力学还有助于改进设备,以便使其达到最大的生产能力和最高的效率。然而这方面的工作取决于設計者对动力学知識的了解。在结构设计时,設計者除了按着静态公式进行一般性設計外,还应在动态或非稳态基础上进行核算,也就是說不仅需用代数方程的模型来表示,而且还需用微分方程的模型来表示。只有这样,才可以了解自己所设计的设备的缺点,并及时改进,以便达到既满足结构的要求,也符合自动调节(或者其他任何方面)的需要。

很多事实証明,对象动力学的研究还有助于确定生产过程或设备的最佳运行方式。在有些生产过程中,应用断續状态生产要比应用稳定状态生产更为有利,例如:在化工过程中,間歇反应优于連續反应;萃取塔的运行方式脉冲的优于稳定的。可以看到,在这里研究对象动力学,其經濟和技术价值是很大的^[4]。

根据对象的动态特性,可以确定生产过程在各种不同扰动下运行操作的允許极限值,从而有助于避免工艺設計过大和自动化要求过高所需的額外投資。还可以估計在发生扰动后生产过程脱离規定指标的持續時間和所产生的不合格产品的数量。

二、热工调节对象的特点

作为调节对象的热工过程是目前最复杂的调节对象之一,因为这些对象大部分具有下列特点^[4-5]:

(1) 多变量(包括輸入量和輸出量): 多輸入量,如各种控制机构的动作和內、外扰动因素;多輸出量,如压力、温度、成分、轉速和功率等;

(2) 多迴路,而且是互相关連的: 上述这些輸入量和輸出量之間是密切联系和相互影响,因而形成了若干并联的动态环节和閉合迴路,而且是相互交叉的;

(3) 非綫性: 其来源有时是由于物性(如物質的比热、密度等)的不恆定,有时是由于单个变量的高阶或超越函数,如輻射传热,但引起非綫性更普遍的原因是由于非迭加性的多元函数关系;

(4) 分布参数: 表現在对象某些变量的动态过程是空間和時間的函数,在数学上必須由偏微分方程来描述。

一个复杂的調节对象或生产过程往往是由几个甚至很多个具有上述这样特点的单元所組成的。在这样的調节对象中,几个重要变量的時間常数可能差別很大。

由于上述特点,而使热工調节对象动力学的研究遇到許多困难。在实现热工过程自动化中,主要困难在于确定对象的动态特性。

三、研究对象动力学的方法

研究对象动力学的方法可分为实验測定和理論分析两大类。实验測定方法是在实际设备上通过实验获得該对象某些参数的动态特性。一般來說,实验結果是可靠的原始資料。在某种特定情况下,这些結果允許被推广到其他类似形式的对象上。最近几年来应用实验方法測定生产过程和设备动态特性的工作得到了很大开展。实验方法可分为下列三种:

- (1) 过渡特性(或飞升曲綫)法;
- (2) 頻率法;
- (3) 統計法。

第一种方法是通过加入一定形式的扰动(阶跃、脉冲等)来測定对象的过渡特性。根据这些过渡特性用数学轉換关系或借助于計算机可得到对象的頻率特性或传递函数。由于实验記錄的誤差和具体数据处理方法的局限性,借助于一般过渡特性是不可能或者难于得到高频范围的动态特性的。

为了得到准确的結果,要求在較大扰动下进行上述实验。这在許多实际运行条件下往往是不允許的。但是,由于該方法簡單,无需特殊附加设备,因此目前还是較广泛地被采用。

頻率法原理簡單,可以得到比較全面的动态描述。它不仅适用于分析綫性系統,而且也可以推广到非綫性系統和变参数系統。所以目前無論在研究和設計調节系統时,或在測定对象动态特性时,頻率法都获得最广泛的应用。

直接測定对象頻率特性必須具有可变頻率和振幅的正弦波发生器;此外,还需要較长的实验時間。后者在許多实际生产过程中往往难于实现。如果可能采用具有多頻率通道的正弦波发生器来測定对象的頻率特性,則实验時間将随頻率通道的数目成比例地減少,从而使頻率法在实际应用中更为方便,同时也大大減小由于实验所造成的生产上的損失。众所周知,热工过程某些变量变化非常緩慢,要求正弦波发生器的最低頻率大約为 10^{-4} 赫芝。由于目前高稳定的可变頻率和振幅的超低頻正弦波发生器还比較少,因而对于变量

变化非常缓慢的过程应用实验法直接测定频率特性还受到一定的限制。测试非常低的频率特性,如果采用机械式发生器(同步电机—减速齿轮组—凸轮或其他简谐运动装置),则在实际中可能得到更好的效果。

目前关于用实验方法测定对象特性的文献比较多,但是一般都缺乏对所采用测试方法进行分析,也缺乏对各种实验方法之间的优缺点进行比较,文献[6—7]开始进行了这方面的工作。

用统计法确定对象动态特性是目前研究和新发展的方向。它与其他实验方法相比较,最大的优点在于不需要在对象上另行加入较大的人为扰动,在某些情况下仅利用正常运行工况就可确定对象的动态特性。这方法需要较复杂的数学运算,但如果采用计算装置,则通过自动数据处理,可以较容易地获得对象动态特性。由于实际数据处理上的种种限制,用统计法所得结果的准确性往往要比前两种方法来得低。到目前为止,利用统计法在实际对象上获得可靠的动态特性还远比前两种方法少。

用实验方法测定对象的动态特性,目前还存在以下几方面问题需待研究解决^[4]:

(1) 对于一个具体生产过程,哪些变量是不可忽略的? 亦即要用多少个独立的传递函数才能很好地描述一个复杂对象的特性?

(2) 对于小偏差线性化的对象,为使传递函数不至失真,输入变量(或者扰动量)的范围应多大?

(3) 应该采用什么准则来判断对象的高频特性(或者高阶影响)是否具有重要意义?

虽然用实验方法研究动态特性具有无可怀疑的优点,但是它的应用也受到许多限制。例如,动态特性的研究必需在实际设备上进行,这和要求动态特性的研究在结构设计阶段内完成是相矛盾的;实验费用十分庞大;在实际生产过程中往往难于满足进行实验所要求的条件,从而降低实验结果的可靠性。在某些过程中,单纯依靠实验方法研究动态特性是非常困难的。

应用理论分析法研究对象动态特性能够弥补上述缺点,特别是对于新设备的研究和设计更具有重要的意义。由于计算机的出现和计算技术的日益发展,目前已有可能对任何调节对象写出比较详尽的动态数学模型,而不超过现有计算机所能求解的复杂程度。但是困难在于目前对对象的内部机理了解不够清楚(特别象热工过程这样复杂的对象)以及受到计算机的容量和计算速度的限制。在许多情况下,还必须对理论分析作一些必要的假设和简化,从而降低结果的真实性。应用小偏差线性化的理论数学模型,可使许多非常复杂的对象动态特性的理论研究成为可能。虽然在这方面已进行了许多工作,但是线性化会带来多大误差仍是一个未解决的问题。为了提高理论研究结果的准确性,调节对象的某些变量(特别是在过渡过程中会在很大范围内变化的一些变量)不宜随便采用线性化,必须实现对线性化和非线性化环节所组成的调节对象动态特性的研究。

大多数的热工过程是稳定的调节对象(具有自平衡能力),即对象受到扰动后,各种变量发生了过渡过程,最后达到了一个新的稳定状态,因而可以通过计算或实验准确地获得热工对象在不同工况下的静态特性。利用这些静态特性来修正理论研究所获得的结果(如修正传递函数的放大系数)将是提高理论研究结果准确性的一个有效的途径。

研究对象动态特性的困难还在于许多实际对象由于内部、外部各种扰动的影响,其动态特性是随机变化的。这对于应用实验方法研究对象特性将是一个很大的困难,因为即

使取得了实验结果,亦难于判断它是否具有足够的代表性。

事实上,对象特性的不稳定(随机变化)往往是由于没有考虑到复杂对象(多输入量系统)受到其他输入量(干扰因素)的影响,而企图仅用一个传递函数或一条曲线来表示一个复杂对象的全部动态特性。因此,正确的理论分析可以阐明对象特性不稳定的原因(主要干扰因素),并可对实验工作提供必要的指导。

四、计算机在研究对象动力学的作用

计算机的出现和广泛应用有力地推动对象动力学的理论研究。计算机分为模拟机和数字机两种。应用计算机研究动力学的主要关键问题在于它的容量和速度,有时要求计算速度快到这样的程度,使答案的出现比真实过程进行的更快,或者至少相同,例如,计算机是为了“在线控制”。对于调节对象来说,这取决于它本身的复杂性和反应速度,前者往往可以由描述对象运动的微分方程的阶数来表示;后者由各部分的时间常数来表示。对于模拟机来说,这直接地取决于运算元件的数量(即放大器的数量),间接地受到各元件准确度的限制。至于数字机,则取决于计算速度(或信息的处理)。描述热工过程(如动力反应堆,锅炉等)所用独立微分方程高至上百阶,而某些变量的反应速度又特别快(如中子通量),因此,即使目前最大的模拟机(具体 400 个放大器)或快速数字机(每秒几万次运算)也难于完全满足进行热工对象动态特性研究所需要的容量和速度。

为此,对复杂对象的动力学理论模型进行研究将有赖于“数字-模拟计算机”的发展。众所周知,模拟机对求解微分方程是非常胜任的,而数字机对于代数运算是快而准确的,但对求解微分方程则较为缓慢。模拟机只能具有简单的逻辑能力,而较复杂的逻辑运算,则须由数字机承担,因此“数字-模拟计算机”以综合二者的优点将可实现对高阶、快速调节对象的数学模拟。

五、热工调节对象动力学的研究现状(包括对本译文集内容的简介)

热工调节对象的种类较多,本译文集所介绍只是下列三个方面:热力设备(主要为锅炉设备),热交换器和动力反应堆。可以认为它们具有足够的代表性。下面将简要介绍这三方面的研究现状和译文集的内容。

热力设备(锅炉和汽轮机)的动力学早在几十年前就开始进行了研究^[8]。当时人们把调节对象看作是一个积分环节,因为在那时候基本上只有发动机才装上调节系统。在本世纪三十年代,大部分研究工作都把热工过程看作是集中容积的调节对象,即一阶惯性环节^[9]。但是在许多情况下,这种简单单容对象并不能表示某些过程的动态特性(尤其以温度作为主要参数的过程,必须看作是分布参数的对象)。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动态特性,但是这种表达方式也还只能局部地表示这些对象的特性。这些动态特性的参数(如时间常数,迟延时间等)大部分是由实验或部分由近似理论计算得到。从四十年代起开始研究了分布参数的热工调节对象^[10-12],对于小偏差线性化对象(如过热器)的理论研究已获得一些结果,并且分别以公式和典型图表表示,从而可能通过不复杂的计算获得近似的动态特性。最近几年开始应用模拟机研究线性化的各种锅炉(汽鼓式,直流式等)的理论数学模型^[13-14],描述对象的微分方程(经过对超越传递函数的有理化后)高达 70 阶以上,通过理论计算和实验结果相比较,证明这种理论数

学模型和某些綫性化的假設是正确的。它可以在一定条件下作为設計复杂調节系統(如設計不相关的調节系統或采用控制机的調节系統)所需要的对象数学模型。

对汽鼓鍋炉蒸汽压力和流量的动力学作了較詳細理論分析的有文献[15—16],特别是后者把鍋炉中传热过程和电路相类比,这就使得有可能把电工方面所得出的結論应用到鍋炉的传热过程。

汽鼓鍋炉水位的动力学曾經一度是热工过程动力学的主要研究課題,目前已进行了大量的研究工作,对于各种研究結果和方法在文献[17]中均作了詳細的分析和比較。

虽然結構参数对調节对象动态特性的影响是一个重要和有实际意义的研究課題,但是目前关于这方面的資料特別缺乏。在[18]中研究了过热器的某些特殊和簡單的情况。

真正的热工过程是变系数或非綫性的(如流量波动,物理常数和传热系数改变等等),但是这个問題目前还没有一般的解决办法,只是根据具体需要,用数字法^[19]或差分法^[20]以及图解法^[22]逐点进行冗长而复杂的計算。

利用数字机可以順利地进行这些計算,但是为了今后让普通工程技术人员广泛使用数字机,还必须創造一些簡易的程序編制方法,单使一般工程技术人员都可将問題置于机器上,并且很快地获得所希望的解答。

由于热交换器设备的普遍存在,几乎各个部門都有,并且又容易应用蒸汽和水进行各种运行实验,便于提供集中参数和分布参数的有效实验模型,因此目前对热交换器动力学已进行了大量的研究工作。具体地说,研究对象大概包括下列类型的热交换器:从流体流动来说,有单流程(套管式或列管式的热交换器)^[11]、多流程(或称为多管路的热交换器)^[21]、順流、逆流^[11]、橫向流动(或以任意角度流动)等;从載热剂性质来说,有冷、热两侧均为液体,液体与气体,以及液体(或气体)与固体(管壁)等,后者的典型例子为流体流经絕热管道^[19,31];从动态性质来说,有冷热侧流体皆为分布参数,或一侧为分布,另一侧为集中参数(如普通原子能发电厂蒸汽发生器),以及最簡單的两侧流体皆为集中参数等^[11]。虽然結構型式很多,但是动态特性分析方法基本上是一样的。目前对以上各种类型热交换器的动力学研究,大部分是属于綫性化的模型。流量变化时热交换器动力学的理論研究需要求解一组变系数偏微分方程。由于求一般分析解非常困难,应用差分法或图解法可以获得良好結果^[22]。在研究热交换器动力学时,真实的情况是載热剂参数发生变化(特别是大扰动时),在某些情况,这对动态特性有很大的影响。在[25]中研究了載热剂参数变化时热交换器的过渡过程。

应用模拟技术研究热交换器动力学是一项新的課題,在[23]中介绍了一种模拟具有分布参数的热交换器动态特性的簡便方法。

到目前为止,对調节对象动力学进行系統討論的书籍是很少的。在[24]中比較詳細地介绍各种生产过程(如传质、热交换过程、化工过程等)的各种理論数学模型及其动态特性的处理方法。

根据上述情况,今后开展热力设备和热交换器动力学的研究有下列几方面問題:

(1) 在同一对象上进行动态特性的理論和实验研究,并且比較和分析这两者的結果,从而验证理論分析中所作簡化假設(如綫性化)的适用范围,并且弄清这些假設的合理性。对于复杂热力设备,任何单一的研究方法(理論或实验)都难于达到預期的結果。遺憾的是,到目前为止,热工对象动力学大部分的研究工作不是偏于实验性就是偏于理論性,两

者結合是很少的。

(2) 鍋爐中兩相區域(汽和水)和某些不宜綫性化的對象的動力學研究, 直流鍋爐和自然循環鍋爐的兩相動力學目前仍然不夠清楚。這個問題的研究也有助於沸水堆的發展。鍋爐水位動力學目前已有許多研究, 它也屬於兩相動力學的范围。

(3) 改善熱力設備動態特性的實驗測試方法, 特別應該研究一種能夠滿足熱力設備實際運行要求的實驗方法^[35], 同時也應該生產高質量實驗測試所需特殊設備。

(4) 研究單流程或多流程列管式熱交換器管間的流體動態特性, 以及研究載熱劑流量或物理參數變化時動態特性的計算方法。

下面介紹一下反應堆動力學的國外研究情況(僅介紹與熱工聯繫較多的某些問題)。

在科學史上從來還沒有過象由於發現核分裂而引起的這樣快的一系列的科學技術發展。1939 年開始發現由於俘獲中子而產生鈾分裂的核反應, 1942 年出現了世界上第一個反應堆, 二十年來各種核反應堆, 特別是動力反應堆獲得巨大的發展。反應堆動力學的研究幾乎和反應堆的發展是同時進行的。有關反應堆的動力學研究是從中毒效應開始的。在早期曾發現有些反應堆經過短暫時間的運行後, 會自行停止工作。經過對氙-135 動態特性的研究, 確定了這種所謂中毒效應。與此同時還發現許多反應堆都具有負溫度系數特性, 即具有自調節性, 因此, 研究反應堆動力學對於設計控制和安全保護系統, 以及對於反應堆的安全運行都具有特別重要的意義。

1940 年索達克 (Soodak) 首先把反應堆空間效應集中為一點(即把反應堆看作是集中參數的系統), 並導出中子動態方程^[26]。以後對中子動態方程進行許多解算工作, 並建立了專用計算裝置。

1951 年哈里爾 (Harrer) 等在阿貢實驗室通過 CP-2 反應堆以實驗方法測試中子通量的動態特性(以控制棒的位置為輸入量, 中子通量為輸出量, 棒的移動方式接近於正弦波, 在小偏差時, 棒的位置和反應性的變化可以近似看作是綫性關係)。實驗結果證明: 上述中子通量的動態方程和理論模型是正確的^[27]。

1950 年開始研究具有負溫度系數的動力反應堆的動力學, 第一次是建立一個十三階微分方程來描述一個壓水堆的熱和水力學的動態特性, 並提出溫度變化對反應性的影響。為了進一步研究動力反應堆的動態特性而建立了模擬裝置。當時對反應堆固有穩定性的分析, 也象在分析控制系統一樣, 採用頻率法, 而對過渡過程的分析則借助於模擬機和數字機。

近几年開始進行分布參數反應堆動力學的研究。反應堆動態特性是以時間和空間為自變量的偏微分方程來描述, 因而導出的傳遞函數是超越的。為了應用模擬機進行研究, 往往又把这些超越傳遞函數以有理函數和純遲延來近似^[28]。應用數字機可以直接地對描述反應堆動力學的偏微方程組求解, 目前已求出三維空間數學模型的反應堆動態特性的數字解。

在實際中, 反應堆中子通量沿軸向的分布是接近正弦波的。考慮這種空間分布對反應堆動力學的影響是很有意義的。例如, 反應堆燃料和冷卻劑最高溫度發生的位置在動態過程中將向出口方向移動。當發熱率產生階躍擾動時, 燃料最高溫度最終發生在入口到全長大約三分之二的地方^[29]。

最近反應堆動力學的研究有了新的發展, 這主要表現在對沸水堆動力學的研究。

过去(至少在 1954 年以前)沸水堆被認為是一种不稳定的反应堆,因为当时人們对作为減速剂的普通水一部分化为蒸汽,产生汽泡,而对減速作用是否稳定发生怀疑。后来根据在实验沸水堆 Borax-1 上进行动态特性的实验,才了解沸水堆由于具有負蒸汽系数,在一定条件下不仅具有很高的稳定性,而且具有很好的自調节性。

沸水堆动力学的正式研究是在实验沸水堆 EBWR 上开始的。通过实验测试了动态特性,得出在各种不同运行条件下的传递函数,并进一步推广到較高的功率水平^[36]。为了解释和分析实验所得到的結果,近来进行許多理論分析,并創立沸水堆(包括 EBWR)的理論模型^[30,37,41-43]。文献[38,39]对沸水型动力反应堆的动力学进行了較詳細的研究。

沸水堆功率对反应性最大的反饋作用是由于在活性区产生汽泡所引起的。在沸水堆上除了有可能产生反应性不稳定外,还有水力学不稳定的各种模型也会出现,因此沸水堆的稳定性主要取决于流体两相动力学^[31]和水力学效应的研究。

当反应堆采用二氧化鈾为燃料元件时,則燃料温度将对动态特性发生巨大的影响,燃料(固体)温度动力学的研究基本上是属于求解一个傅里叶热传导方程的性质^[40]。

許多研究者目前已开始利用反应堆噪声来获得反应堆的动态特性。

日益增多地应用模拟机来研究反应堆动力学和控制、安全保护系統。在[32]中介绍应用大量放大器(約 200 个)和相应函数发生器模拟反应堆一維空間和某些非綫性函数的动力学。当对模拟机和数字机的計算結果进行比较,发现两者是十分符合的。

在繼續发展反应堆的固有自調节性方面,今后反应堆动力学在理論和实验研究上还存在許多重要課題,如核-热-水力学相互作用效应,多普勒(Doppler)效应,反应堆噪声和随机波动等^[33]。

所有上述有关热工調节对象的特点、对象特性的研究目的和方法以及存在問題和今后发展趋向,在这本譯文集中将大部(如热力設備)或部分(如核反应堆)地得到了反映。这里集中反映了国外在应用理論分析方法研究热工調节对象动力学的某些成果。

对于某些較重要而分析方法又具有普遍意义的論文,我們引入必要的附录,如直流鍋炉单相和双相区域动力学,以及典型热交换器传递函数的推导。一般來說,其推导方法也适用于处理其他类似的分布参数对象动态特性。

* * *

本书的編譯工作是在楊嘉墀、方崇智、錢鍾韓等先生热情帮助和指导下进行的。第一部分热力設備动态特性的譯稿由方崇智先生負責审閱。

本书在編譯过程中,曾經得到有关方面积极支持和帮助,特此表示謝意。

由于時間和水平所限,在編譯工作上不免存在缺点,希望讀者批評指正。

編 者

1964. 5. 于北京

参 考 文 献

- [1] В. Л. Лоссиевский, О задачах автоматизации производственных процессов, Сб. "Автоматизация производственных процессов", вып. II, Изд-во АН СССР, 1958.
- [2] И. Н. Вознесенский, О регулировании машин с большим числом регулируемых параметров, А и Т, № 4—5, 1938.
- [3] Е. П. Стефани, Об улучшении динамических характеристик релюлируемых участков котельных агрегатов, Изв. ВТИ, № 8, 1950.

- [4] T. J. Williams, Process Dynamics and its Applications to Industrial Process Design and Process Control, Second International Congress of IFAC on Automatic Control, 1963.
- [5] 錢鍾韓, 汽鼓鍋爐—汽輪機聯合系統在汽壓調節方面的動態特性, 南工學報, 1963 年 第三期.
- [6] О. М. Минина, Определение динамических характеристик и параметров типовых регулируемых объектов, Изд-во АН СССР, 1963. 呂武軒譯, 典型調節對象動態特性和參數的計算方法, 科學出版社, 1965.
- [7] А. А. Вавилов, А. И. Солодовников, Экспериментальное определение частотных характеристик автоматических систем, Госэнергоиздат, 1963.
- [8] Д. К. Максвелл, И. А. Вышнеградский, А. Стодола, Теория автоматического регулирования (линеаризованные задачи), Изд-во АН СССР, 1949.
- [9] G. Neumann, Regler (Teil. A, B, C, D), *Arch. f. d. Eisenhüttenwesen*, 1932—1935, Mitt. 168, 171, 188, 193.
- [10] P. Profos, Dynamik der Überhitzerregelung, *Regelungstechnik*, 6 (1958), No. 7, 239—246.
- [11] Y. Takahashi, Transfer Function Analysis of Heat Exchange Processes, Automatic and Manual Control, Tustin, A. Butterworths Scientific Publications, New York, N. Y., 1952, p. 235.
- [12] А. А. Таль, О динамических свойствах однофазных участков пароводяного тракта котла, *Изв. АН СССР. Отд. тех. наук*, 1957, № 2, 49—58.
- [13] K. L. Chien, E. I. Ergin, Dynamic Analysis of a Boiler, *Trans. ASME*, 80 (1958), No. 8.
- [14] В. А. Дементьев и другие, Исследование динамики блока котел 67-2СП-турбогенератор К-50-90, *Теплоэнергетика*, 1962, № 8.
- [15] P. Profos, Dynamics of Pressure and Combustion Control in Steam Generators, *Combustion*, Mar., 1957, p. 34.
- [16] В. Д. Миронов, О динамических свойствах барабанных котлов по давлениям и расходам пара, *Теплоэнергетика*, 1955, № 12, 14—21.
- [17] В. И. Сенькин, В. С. Поборчий, Анализ уравнений динамик барабанного парового котла с естественной циркуляцией, Сборник ЦКТИ, Книга 36, Автоматическое регулирование, Машгиз, 1960.
- [18] S. Jaromir, Vliv Konstrukčních parametru na dynamiku přehřívěku, *Automatizace*, 1961, No. 9.
- [19] G. M. Dusinberre, Pa, Statecollege, Calculation of Transient Temperatures in Pipes and Heat Exchangers by Numerical Methods, *Trans. of the ASME*, 76 (1954), No. 3, p. 421.
- [20] С. Ф. Чистяков, Расчет динамических характеристик тепловых регулируемых объектов, Мет-изд., 1959.
- [21] 増淵正美, 多管路熱交換器の自動制御, 日本機械學會論文集, 1958 年, 第 24 卷, 第 139 號和第 147 號.
- [22] 高橋安人, 流量變化に対する熱交換器の應答, 自動制御, 1959 年, 第 6 卷, 第 1 號.
- [23] М. Д. Агеев, О моделировании теплообменных аппаратов, Доклады 4 Межвузовской конф. по применению моделирования, Сборник № 3, Применение методов матем. моделирования в инженер. исследованиях, МЭИ, 1962.
- [24] D. Campbell, Process Dynamics, John Wiley, N. Y., 1959.
- [25] А. А. Арманд, Расчет переходных процессов в теплообменниках при переменных параметрах теплоносителя, Сб. ВТИ, "Повышение параметров пара и мощности агрегатов в теплоэнергетике", Госэнергоиздат, 1961.
- [26] H. Soodak, E. C. Campbell, Elementary Pile Theory, John Wiley and Sons, Inc., New York, N. Y., 1950.
- [27] J. M. Harrer, et al., Transfer Functions of the Argonne CP-2 Reactor, *Nucleonics*, 10 (1952), 32—36.
- [28] E. P. Gyftopoulos, H. B. Smets, Transfer Functions of Distributed Parameter Reactors, *Nuclear Sci. and Eng.*, 5 (1959), No. 6.
- [29] 楊文偕, 空間的に正弦波發熱をする單管熱交換器の過渡應答——特に不均質原子爐における正弦波的發熱に対する應答, 日本機械學會論文集, 1962 年, 第 28 卷, 第 192 號.
- [30] A. Kirchenmayer, On the Kinetics of Boiling Water-reactors, *Journal of Nuclear Energy, part A, Reactor Science*, 12 (1960), No. 1—4.
- [31] 金井務, 川合敏雄, 永井將之, 沸騰水形原子爐における二相流の動特性, 日立評論別冊論文集, 日立製作所中央研究所創立二十周年紀念論文集, 1962, p. 175.
- [32] W. G. Proctor, et al., The Representation of a One-dimensional Model of a Nuclear Reactor on an Analogue Computer, *Nuclear Power*, 8 (1963), No. 81—82.
- [33] M. A. Schultz, J. N. Grace, Nuclear Reactor Plant Kinetics and Control, *Processings IRE*, May, 1962.
- [34] J. W. Rizika, et al., Thermal Lags in Flowing Systems Containing Heat Capacitors, *Trans. of the ASME*, 76 (1954), N. 3, 411—420.

- [35] O. Schafer, W. Feissel, Ein Verbesserter Verfapren zur Frequenzgang-Analyse Industrieller Regels-trecken, *Regelungstechnik*, 1955, H. 9.
- [36] J. D. De Shong, Jr., Power Transfer Functions of the EBWR Obtained Using a Sinusoidal Reac-tivity Driving Function, *ANL-5798*; January, 1958.
- [37] S. G. Margolis, and S. Kaplan, Transfer Functions for Boiling Reactor Stability Calculations, *Trans. Am. Nuclear Soc.*, **3** (1960), 124—125.
- [38] J. MacPhee, The Relative Stability of Boiling and Pressurized Light Water Moderated Reactors, *IRE Trans. on Nuclear Science*, 1957, NS-4, 25—29.
- [39] J. A. Fleck, Jr., The Influence of Pressure on Boiling Water Reactor Dynamic Behaviour at Atmo-spheric Pressure, *Nuclear Sci. and Eng.*, **9** (1961), 271—280.
- [40] В. С. Ермаков и другие, Исследование процессов переноса тепла в тепловыделяющих элементах, *Журнал ИНЖ-Физ.*, **1** (1958), № 9, № 12, **3** (1960), № 4, **4** (1961), № 1, № 5.
- [41] J. A. Thie, Dynamic Behaviour of Boiling Reactors, *ANL-5849*, 1959.
- [42] A. Kirchenmayer, Dynamik des Siedewasser-Reaktors mit Naturumlauf, *Nukleonik*, **4** (1962), No. 3, 122—137.
- [43] P. K. M'Pherson, and M. Muscettola, A Study of the Dynamics of Steam Voids in Boiling Water Nuclear Reactors, Paper 366, Second International Congress of IFAC on Automatic Control, 1963.

目 录

序言	v
----	---

第一部分 热力设备动态特性

锅炉的动态分析	1
蒸汽锅炉的汽压与燃烧调节动力学	18
锅炉 67-2CII—汽轮发电机 K-50-90 单元机组动力学的研究(附录: 单、两相区域 传递函数的推导和单元机组模拟)	32
汽包锅炉蒸汽压力和流量的动态特性	74
自然循环汽鼓锅炉动态方程式分析	85
过热器调节动力学	111
锅炉汽水管段单相区域的动态特性	123
结构参数对过热器动态特性的影响	133
进行工业调节对象频率特性分析的一个改进的方法	143

第二部分 热交换器动态特性

热交换过程传递函数分析(附录: 各种型式热交换器传递函数的推导)	151
多管路热交换器的动态特性	169
热交换设备的模拟	185
管道和热交换器的动态特性	190
用数字方法计算管道和热交换器温度的过渡过程	206
热交换器在流量变化下的动态特性	216
载热剂参数变化时热交换器过渡过程的计算	223

第三部分 核反应堆动态特性

分布参数核反应堆系统的传递函数	243
具有空间正弦波分布内部热源的单管式热交换器的阶跃响应和频率特性	260
沸水堆动力学	281
沸水堆中两相流动的动态特性	290
核反应堆一维模型在模拟机上的表达法	302

附录 热工调节对象(热力设备、热交换器和核反应堆)动态特性专题索引	320
-----------------------------------	-----

鍋 炉 的 动 态 分 析*

在鍋炉动态分析中,采用某些近似假定,可以把非线性的偏微分方程简化为以时间为独立变量的线性常微分方程,从而可以得到鍋炉上許多参数的时间变化函数。这样求出的一组线性微分方程可用电子微分分析仪来求解。作为一些例子,本文中举出了汽鼓压力和水位对于不同輸入量(給水量、燃料供应量和蒸汽消耗量)的开环特性。此外,还以同一台鍋炉的线性调节过程为例,給出模拟解,并說明本方法的灵活性。上述分析和模拟方法的应用并不只限于初步近似分析;如果利用计算机的帮助,还可以加以推广,使精确度更高。鍋炉的动态模拟还可以用来研究当鍋炉结构尺寸或传热和传质的常数等发生变化时所引起的影响,并可以用来核对在开始分析时对于整个系统的动态性质所作的某些基本假设是否正确。

符 号 表

p_B = 汽鼓压力;	h_s = 过热器出口蒸汽的焓;
p_s = 过热器出口压力;	h_{fg} = 相应于 p_B 的蒸发热(汽化潜热);
p_w = 泥鼓压力;	Q_s = 从过热器管壁传给过热蒸汽的热流量;
ρ_B = 相应于 p_B 的饱和蒸汽重度;	Q_{gs} = 从烟气传给过热器管壁的热流量;
ρ_s = 过热器出口蒸汽重度;	Q_B = 从上升管壁传给沸水的热流量;
ρ_w = 相应于 p_B 的饱和液体重度;	Q_{gB} = 从烟气传给上升管壁的热流量;
x = 上升管出口汽水混合物的干度;	w_s = 过热器出口的蒸汽重量流量(負荷);
ρ = 上升管出口汽水混合物的重度;	w_F = 燃料重量流量;
T_i = 給水温度;	w_i = 給水重量流量;
T_B = 相应于 p_B 的饱和蒸汽温度;	w_w = 下降管重量流量;
T_s = 过热器出口蒸汽温度;	w = 上升管重量流量;
T_w = 汽鼓和下降管中液体温度;	w_e = 汽鼓水面上的蒸发速度;
$T_{s,w}$ = 过热器管壁温度;	w_B = 从汽鼓进入过热器的蒸汽重量流量;
$T_{B,w}$ = 上升管管壁温度;	M = 汽鼓內的液体重量;
T_{gs} = 过热器管束处的平均烟气温度;	M_s = 过热器管束的金属重量;
T_{gB} = 上升管束处的平均烟气温度;	M_B = 上升管束的金属重量;
T_{cs} = 进入过热器管束的烟气温度**;	V_B = 汽鼓內的蒸汽容积;
T_{cB} = 进入上升管束的烟气温度**;	V = 整个汽鼓容积;
h_B = 相应于 p_B 的饱和蒸汽的焓;	y = 汽鼓水位;
h_{wB} = 相应于 p_B 的饱和液体的焓;	A = 汽鼓內液面(汽水分界面)面积;
h_w = 汽鼓和下降管中液体的焓;	L_s, L_B, L_D = 过热器、上升管和下降管的管道长度***;
h = 上升管出口汽水混合物的焓;	

* 本文原载于 *Trans. ASME*, **80** (1958), No. 8.

** 原文在符号表中只有 T_{cs} , 没有 T_{cB} ; 在正文中又把 T_{cs} 写成 T_c [式(28)], 今统一把 T_c 改成 T_{cs} , 并在表上补入 T_{cB} 的说明——译者注。

*** 原文符号表中缺少关于下降管的各符号(L_D, A_D, D_D, f_D)的说明。今根据正文中所用的符号, 补入上表——译者注。

A_s, A_B, A_D = 过热器、上升管和下降管的管
道内部总截面*;
 D_B, D_D = 上升管和下降管的内径**;
 C_s, C_B = 过热器和上升管的金属比热;
 C_g = 烟气的平均比热 $\times$ (空气/燃料)重量比;
 C_{ps} = 过热蒸汽的平均比热;
 k_{gs}, k_s = 从烟气到过热器管壁, 和从过热器

管壁到蒸汽的传热系数;
 k_{gB}, k_B = 从烟气到上升管壁, 和从上升管
壁到沸水的传热系数**;
 k_e = 汽鼓水面的蒸发速度常数;
 f_s, f_B, f_D = 过热器、上升管和下降管的摩擦
系数**。

引 言

随着高压锅炉结构的复杂化, 锅炉调节的要求变得越来越严格, 无论从安全运行或从经济角度来看都是如此。动力厂各部分设备在运行中不是孤立的, 而是一个整体, 因此必须首先对整个系统的动态特性有了正确的了解和描述, 才能确定在综合调节系统时所必需的准则。工程和研究人员的目的是提供一个系统(调节对象+调节器), 使它能够通过“最好的”方式来完成一项指定任务。所谓“最好”, 有时是由经济因素来决定, 有时是由动态反应来决定, 有时对于这两方面都要考虑。我们可以设计出一个十分复杂的调节器, 但是, 如果生产过程的特性并不能由于这种复杂性而得到显著的改善, 那末它的价值就有限了。

根据这些考虑, 可见在调节系统的分析中, 首先必须对于调节对象(生产过程)有充分的了解。这种了解称为对象的动态分析, 它是从生产流程中的物理和化学变化着手, 先把这些现象加以描述; 再进而求出调节对象的传递函数, 即输入量(调节作用或扰动作用)和输出量(被调参数)之间的时间函数关系。只有在对系统的动态作出数学描述之后, 才能够用分析方法来对调节器与锅炉的基本方案和设计数据作出合理的选择, 而不是依靠试凑法来试图解决问题。例如锅炉的自正调节系统(noninteracting control system)——它在改变负荷时可以不影响汽压或水位——就可以在上述理论分析的基础上设计出来。

本文试图对汽鼓锅炉进行分析并加以数学描述, 以便取得锅炉和调节器的设计资料。虽然分析并不严格, 但是所得到的结果在定性上是与实际测试的结果一致的, 这就表示在分析和解算中所作的一些简化假定是合理的。例如, 即使在汽鼓内不产生气泡时, 仍然可以预见负荷的变化将引起虚假水位现象; 同样地, 当蒸汽量、燃料量、给水量改变时, 得到上升管和下降管中的压力、温度和流量的瞬变过程也是可能的。

过去对锅炉所进行的动态分析, 一般只限于若干局部过程, 这是由于整个系统十分复杂, 它包括许多变量, 数学描述和求解方程的步骤已很繁重; 而各种非线性因素和对某些现象的规律没有确切掌握, 在工作中更增加了不少困难。为了便于这一问题的解决, 必须对真实系统作出某些简化假定。如果简化得不够, 就会使求解所需的时间和费用增加到不合理的程度; 而如果简化得过分, 又会使解答不能正确反映系统的动态性质。简化假定可以分为两类: (a) 某些物理和化学现象很复杂, 不能加以严格的数学描述, 必须采用半

* 见上页注***。

** 原文关于上升管的一些符号比较混乱, 如 w 和 ρ 不加角码; 其他很多有关的符号则用角码“B” (如 $A_B, M_B, C_B, f_B, Q_B, Q_{gB}, K_{gB}, T_{gB}, T_{Bw}$ 等); 此外还用了 L_r, D_r (在符号表中漏去) 和 K_g 等。今把有关上升管的某些符号 L_r 改为 L_B, D_r 改为 D_B, K_g 改为 K_B , 以求与多数符号取得统一, 便于认识。

此外亦要注意, 还有少数用角码“B”的符号 (w_B 和 v_B) 是指汽鼓的参数而不是指上升管。另一些符号 (如 $\rho_B, T_B, \rho_B, h_B, h_{wB}$ 等) 则代表饱和蒸汽的参数, 因此它们既适用于汽鼓, 又适用于上升管——译者注。

經驗的近似公式。例如在传热現象中的核心沸騰,汽鼓中的蒸发和凝結,烟氣对受熱管壁的湍流传热等,都属于这一类。(b)在解算过程中,还必须对原来的一組方程式作进一步的簡化。流动方程式一般都是非綫性的納維爾-斯托克斯 (Navier-Stokes) 型偏微分方程式,在一般条件下要想求出它的精确解是有困难的。但我們可以对流动的性质作某些假定(例如无粘性或不可压缩),亦可以設法取消非綫性和偏微分(例如应用差分法或数字分析法)。在本文中联合运用了这些簡化方法,最后做到了用一組綫性常微分方程来描述鍋炉的动态。即使在做了这些簡化以后,所得到的方程組用笔算来求解还是很困难的,还必须利用计算机来帮助求解。

动态分析是指鍋炉在稳定工况附近的变化性质。由于采用了差分法,可以把变系数改成常系数。但是在不同的稳定工况(初始条件)下所采用的常系数亦是不同的。因此每一組綫性常微分方程式的适用范围都有一定的局限性,而这里的初始条件就具有特别重要的意义。

簡化假定

图1表示一个鍋炉的簡化系統图。从图中可以看出,这个系統是划分成为四个部分来进行分析的:(1)过热器,(2)下降管-上升管水循环迴路,(3)汽鼓,(4)烟氣側。还有第五个部分——从鼓风机入口到烟囱頂的气流通道。在本文中不准备对气流部分进行分析,但应该指出,这个部分有較大的時間常数,因此对整个系統的动态特性会起决定性的影响*。

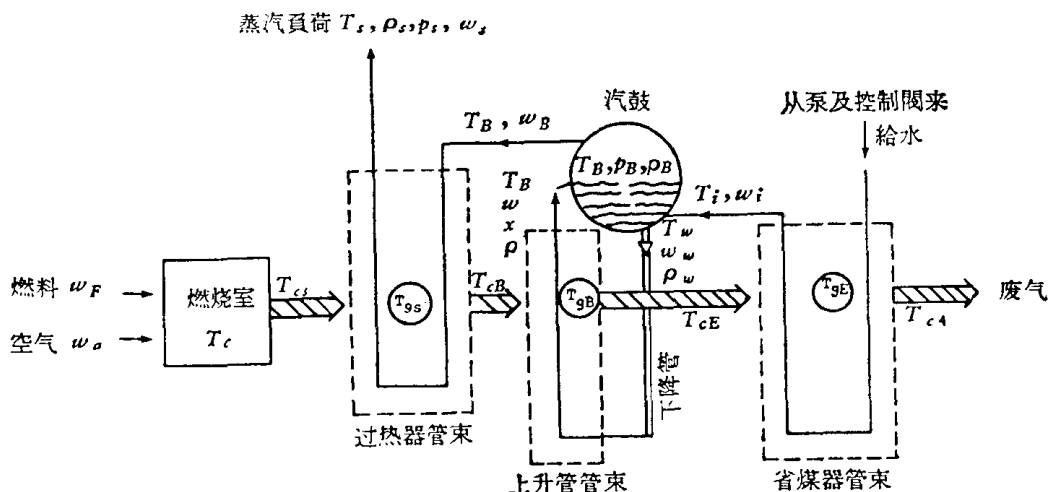


图1 簡化的鍋炉系統图

对上述四部分的物理現象分別作了下列一些簡化假定。

1. 过热器

(a) 流动方程的慣性項可以忽略,即只把过热器管道看作是一系列的容量和阻力,而且在初步分析中,只采用了最簡單的单段模型,即假定它是一个集中容量,在汽鼓側和在負荷側各有一个阻力。在其他分析中,亦曾对过热器采用了更复杂的两段模型(两个集中容量和三个阻力),但本文中不詳述。

* 图1中还有第六部分——省煤器,但在本文分析中未加考虑——译者注。

- (b) 不考虑減温器。
- (c) 負荷扰动是指蒸汽流量的变化。

2. 下降管-上升管水循环迴路

- (a) 在下降管中沒有沸騰。
- (b) 只有自然循环。
- (c) 在上升管中汽泡和水的流速相同。
- (d) 从上升管管壁到沸水的传热强度与两者之間的溫差的三次方成正比(参考[4])。
- (e) 上升管中液体温度永远是相应于汽鼓压力的飽和温度;因此,当汽鼓压力改变时,上升管中就突然发生蒸发现象。
- (f) 上升管中汽水混合物的干度均匀不变(即汽水混合物有集中参数)。
- (g) 下降管中液体温度与汽鼓中液体温度相等(不一定飽和)。

3. 汽鼓

- (a) 汽鼓中蒸汽温度是均匀的,即相应于汽鼓压力的飽和温度。
- (b) 由于受到攪拌作用,汽鼓中液体温度是均匀的,但在汽水分界面有一个极薄的边界层,这里有很大的温度梯度。
- (c) 汽鼓水面上的蒸发或凝結速度,与液体和飽和蒸汽之間的溫差成正比。
- (d) 由于汽鼓內在水面下形成汽泡而引起的水位变化可以忽略。
- (e) 給水温度不变。

4. 烟氣側

- (a) 空气-燃料比率不变。
- (b) 进入过热器管束的烟氣温度与燃料流量成正比。
- (c) 把水冷壁管和其他蒸发管束合并考虑。
- (d) 在每种管束里(过热器,上升管等),传热强度决定于管壁温度和烟氣平均温度之間的差別,而烟氣平均温度則是进口烟氣温度和这个管束所吸收的热量的函数。
- (e) 烟氣流动的慣性可以忽略,即烟氣流速可以突然改变。
- (f) 烟氣热容量所造成的迟延可以忽略,即烟氣温度可以突然改变。
- (g) 烟氣側传热都是在湍流状态下进行的。

5. 一般假定

(a) 本文中不考虑省煤器对整个系統的动态特性的影响,因此就假定了进入汽鼓的給水温度不变。但在分析中如果要把省煤器包括进去,并无特殊困难,而且亦不会改变解答的基本性質。

(b) 蒸汽的状态方程式,即在一定范围内的压力、温度和重度之間的近似綫性关系,是从蒸汽表上有关的数据求出,并分別适用于飽和蒸汽和过热蒸汽。

(c) 烟氣側和蒸汽側的湍流传热强度由經驗公式求出。公式中的常数是按照稳定工况下的数据計算出来的。

分 析 方 法

在分析中所用到的基本方程式有四类:

1. 流动方程式: 这些是适用于一維层流的納維尔-斯托克斯方程式。由于忽略了粘