



热工調节对象动态特性綜述*

林來興

引 言

随着科学和技术的飞跃发展,生产过程和设备的日益完善,調节对象的动力学以及在結構設計和自动調节系統中的应用,目前已逐漸形成一門学科。为了今后討論和确定这門学科应有的地位,本文准备就最近十多年来有关热工調节对象动态特性方面的文献进行綜述。

一、研究对象动力学的目的

根据对象的动态特性可以正确合理地选择調节方案和設計調节系統^[1],例如,設計一个自治調节系統(或不相关調节系統)时,必須准确了解調节对象的动态特性及其数学描述,因为自治調节系統的結構完全取决于对象的特性。以往經驗証明,在复杂对象的調节中,許多失敗都是由于对对象特性估計得不够正确所引起^[2]。

为了迅速和及时地投入調节系統,并保証系統在最佳和可靠的条件下工作,必須根据对象动态特性,正确地整定調节系統的参数。

研究对象动力学也是改进現有調节系統存在問題的一个有效途径。

研究对象动力学可以对結構設計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,才发现必須对设备結構进行某些改造,那就非常困难,甚至是不可能的。例如,在具有表面式減温器的鍋炉过热温度調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。然而这方面的工作将取决于設計者对动力学知識的了解。在結構設計时,設計者除了按着靜态公式进行一般性的設計外,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,才可以了解自己所設計的设备的缺点,并及时实现必要的改进,以便达到既能滿足結構的要求,也能符合自动調节(或其他任何方面)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]。

* 本文于1964年6月10日收到。

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许极限值,从而有助于避免工艺设计过大和自动化要求过高所需的额外投资。还可以估计在发生扰动后生产过程脱离规定指标的持续时间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(包括输入量和输出量):多输入量,如各种控制机构的动作和內、外扰动因素,多输出量,如压力、温度、成分、转速和功率等;

2. 多回路,并且是互相关联的:上述这些输入量和输出量之间是密切联系和相互影响的,因而形成了若干个并联的动态环节和闭合回路,而且是相互交叉的;

3. 非线性:其来源有时是由于物性的不恒定,如物质的比热、密度等,有时是由于单个变量的高阶或超越函数,如辐射传热,但引起非线性更普遍的原因,是由于非迭加性的多元函数关系;

4. 分布参数:表现在对象某些变量的动态过程是空间和时间的函数,在数学上必须由偏微分方程来描述。

一个复杂的调节对象或生产过程,往往是由几个甚至很多个具有上述这样特点的单元所组成。在这样的调节对象中,几个重要变量的时间常数可能差别很大。

由于上述特点,而使热工调节对象动力学的研究遇到许多困难。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测定和理论分析两大类。实验测定法是在实际设备上通过实验获得该对象某些参数的动态特性。一般来说,实验结果是可靠的原始资料。在某种特定情况下,这些结果允许被推广到其他类似形式的对象上。最近几年来,应用实验方法测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(或飞升曲线)法;
2. 频率法;
3. 统计法。

第一种方法是通过加入一定形式的扰动(阶跃、脉冲等)来测定对象的过渡特性。根据这些过渡特性应用数学转换关系或借助于计算机可得到对象的频率特性或传递函数。由于实验记录的误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。

为了得到准确结果,要求在较大扰动下进行上述实验,这在许多实际运行条件下往往是不允许的。但是,由于该方法简单,无需特殊附加设备,目前还是较广泛地被采用。

频率法原理简单,可以得到比较全面的动态描述。它不仅适用于分析线性系统,而且也可以推广到分析非线性系统和变参数系统。所以目前无论在研究和设计调节系统时,或

在测定对象动态特性时,频率法都获得最广泛的应用。

直接测定对象的频率特性,必须具有可变频率和振幅的正弦波发生器,此外,还需有较长的实验时间。后者在许多实际生产过程中往往难于实现。如果有可能采用具有多频率通道的正弦波发生器来测定对象的频率特性,则实验时间将随频率通道的数目成比例地减少,从而使频率法在实际应用中更为方便,并大大减少由于实验所造成的生产上的损失。众所周知,热工过程某些变量变化非常缓慢,要求正弦波发生器的最低频率大约为 10^{-4} 赫芝。由于目前高稳定的可变频率和振幅的超低频正弦波发生器还比较少,因而对于变量变化非常缓慢的过程,应用实验方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动态特性的文献比较多,但一般都缺乏对所采用的测试方法进行分析,也缺乏对各种实验方法之间的优缺点进行比较。文献[6、7]开始进行了这一方面的工作。

用统计法确定对象动态特性是目前研究和发展的新方向,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的动态特性。由于实际数据处理上的种种限制,用统计法所获结果的准确性往往要比前二种方法来低。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,为使传递函数不致失真,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对象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,动态特性的研究必须在实际设备上进行,这和要求动态特性的研究需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的缺点,特别是对于新设备的研究和设计,更具有重要意义。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还不够了解(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,从而降低了结果的真实性。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。虽然在这一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)是不宜随便采用线性化的,因而必须进行线性化和非线性环节所组成的调节对象动态特性的研究。

大多数的热工过程都是稳定的调节对象(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,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方面的作用

计算机的出现和广泛应用有力地推动了对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计算机的容量和速度要很大,有时要求它的计算速度快到应使答案的出现要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,前者往往可由描述对象运动的微分方程的阶数来表示,后者则由各部分的时间常数来表示。对于模拟机来说,这直接取决于运算元件的数量(即放大器的数量),间接受到各元件的准确度的限制。至于数字机,则取决于计算速度。描述热工过程(如动力反应堆、锅炉等)所用独立微分方程的阶次高达上百阶,而某些变量的反应速度又特别快(如中子通量),因此,即使是目前最大的模拟机(具有400个放大器)或者快速数字机(每秒运算几万次),也难于完全满足进行热工对象动态特性研究所需的容量和速度。

为此,对复杂对象的动力学进行理论模型的研究,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,而数字机对代数运算是快而准确的。模拟机只能具有简单的逻辑能力,而较复杂的逻辑运算,则需由数字机承担。因此,发展“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

热工调节对象的种类较多,这里所谈的只是热力设备(主要为锅炉设备)、热交换器和动力反应堆。可以认为它们是具有足够代表性的。下面将简要介绍这三方面的研究现状。

热力设备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有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,这种简单的单容对象并不能表示某些过程的动态特性(特别是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延迟时间来表示复杂热工调节对象的动态特性,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、延迟时间等)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。最近几年来,开始应用模拟机研究线性化的各种锅炉(汽鼓式、直流式等),描述对象的理论数学模型^[13,14]的微分方程阶次(经过对超越传递函数的有理化后)高达七十以上。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线性化的假设是正确的。在一定条件下它可作为设计复杂调节系统(如设计不相关的调节系统或采用控制机的调节系统)所需对象的数学模型。

文献[15-16]对汽鼓锅炉蒸汽压力和流量的动力学作了较详细的理论分析,特别是文献[16],把锅炉中的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结论应用到锅炉的传热过程。

汽鼓锅炉水位的动力学曾经一度是热工过程动力学的主要研究课题,目前已进行了大量的研究工作,对于各种研究结果和方法,在文献[17]中均作了详细的分析和比较。

虽然结构参数对调节对象动态特性的影响是一个主要和有实际意义的研究课题,但是目前关于这方面的资料还特别缺乏。文献[18]研究了过热器的某些特殊和简单的情况。

真正的热工过程是变系数或非线性的(如流量波动、物理常数和传热系数改变等),但是这个问题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计算。

利用数字机可以顺利地进行这些计算,但是为了今后让普通工程技术人员广泛使用数字机,还需创造一些简易的程序编制方法,俾使一般工程技术人员都可将问题置于机器上,并能很快地获得所希望的解答。

由于热交换器设备的普遍存在,又便于利用蒸汽和水进行各种运行实验,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:从流体流动情况来分,有单流程(套管式或列管式)^[11]、多流程(或称多管路)^[21]、顺流、逆流^[11]等;从载热剂的性质来分,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绝热管道^[19,31];从动态性质来分,有冷热侧流体皆为分布参数,或一侧为分布参数另一侧为集中参数(如普通的原子能发电厂蒸汽发生器)以及最简单的两侧流体皆为集中参数^[11]等。虽然结构型式很多,但是所采用的分析方法,则基本上是一样的。目前对以上各种类型热交换器的动力学研究,大部分是属于线性化的模型。流量变化时热交换器动力学的研究,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的结果^[22]。在研究热交换器动力学时,真实的情况是载热剂参数发生变化(特别是在大扰动情况下),在某些情况下,这对动态特性有很大的影响。在文献[25]中,研究了载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,是一项新的课题。在文献[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简便方法。

到目前为止,对调节对象动力学进行系统讨论的书籍还是很少的。在文献[24]中,比较详细地介绍了各种生产过程(如传质、热交换过程、化工过程等)的理论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,约有下列几方面的课题:

1. 在同一对象上,进行动态特性的理论和实验研究,并且比较和分析这两者的结果,从而验证理论分析中所作简化的适用范围,并弄清这些简化的合理性。对于复杂的热力设备,任何单一的研究方法(理论或实验)都难于达到预期的结果。遗憾的是,到目前为止,热工对象动力学的大部分研究工作,不是偏于实验性,就是偏于理论性,两者结合是很少的;

2. 研究锅炉中两相区域(汽和水)和某些不宜线性化的对象的动力学。直流锅炉和自然循环锅炉的两相动力学,目前仍不够清楚。这个问题的研究,也有助于沸水堆的发展。锅炉水位动力学,目前已进行了大量的研究,它也属于两相动力学的范围;

3. 改善热力设备动态特性的实验测试方法,特别是应研究一些能够满足热力设备实际运行要求的实验方法^[35]。与此同时,应该生产高质量的实验测试所需特殊设备;

4. 研究单流程或多流程列管式热交换器管间的流体动态特性,以及研究载热剂流量或物理参数变化时动态特性的计算方法。

下面介绍一下反应堆动力学的国外研究情况(仅介绍与热工联系较多的某些问题)。

在科学史上,还没有过象由于发现核分裂而引起的这样快的一系列的科学技术发展。1939年开始发现了因俘获中子而产生铀分裂的核反应。1942年出现了在世界上第一个核反应堆。二十年来,各种核反应堆,特别是核动力反应堆获得了巨大的发展。反应堆动力学的研究几乎和反应堆的发展同时进行。有关反应堆动力学的研究,是从“中毒”效应开始的。在早期,曾发现有些反应堆经过短暂时间的运行后会自行停止工作。经过对氙-135动态特性的研究,确定了这种所谓中毒效应。与此同时,还发现许多反应堆都具有负温度系数特性,即具有自调节性,因此,研究反应堆动力学对于设计控制和安全保护系统以及对于反应堆的安全运行,都具有特别重要意义。

1940年索达克(Soodak)首先把反应堆空腔效应集中为一点(即把反应堆看作是集中参数的系统),并导出中子动态方程^[26]。以后对中子动态方程进行许多解算工作,并建立了专用计算装置。

1951年哈里尔(Harrer)等在阿贡实验室以实验方法测试了CP-2反应堆中子通量的动态特性(以控制棒的位置为输入量,以中子通量为输出量,棒的移动方式接近于正弦波,在小偏差时,棒的位置和反应性的变化可以近似地看作是线性关系)。实验结果表明,上述中子通量的动态方程和理论模型是正确的^[27]。

1950年开始研究了具有负温度系数的动力反应堆的动力学。第一次建立了一个十三阶微分方程来描述一个压水堆的有关热和水力学的动态特性,并提出温度变化对反应性的影响。为了进一步研究动力反应堆的动态特性而建立了模拟装置。当时对反应堆固有稳定性的分析,也象在分析控制系统一样,采用频率法,而对过渡过程的分析,则借助于

模拟机和数字机。

近几年来开始进行了分布参数反应堆动力学的研究。核反应堆的动态特性是以时间和空间为自变量的偏微分方程来描述,因而导出的传递函数是超越的。为了应用模拟机进行研究,往往又把这些超越传递函数以有理函数和纯迟延来近似^[28]。应用数字机可以直接对描述反应堆动力学的偏微分方程组求解。目前已求出三维空间数学模型的反应堆动态特性的数字解。

在实际中,反应堆中子通量沿着轴向的分布接近正弦波。考虑到这种空间分布对反应堆动力学的影响是很有意义的,例如,反应堆燃料和冷却剂产生最高温度的位置,在动态过程中将向出口方向移动。当发热率产生阶跃扰动时,燃料的最高温度发生在入口到全长三分之二的地方^[29]。

最近反应堆动力学的研究又有了新的发展,这主要表现在对沸水堆动力学的研究。

过去(至少是在 1954 年以前)沸水堆被看作是一种不稳定的反应堆,因为当时人们对作为减速剂的普通水一部分化为蒸汽,产生气泡,而对减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负蒸汽系数,在一定条件下不仅具有很高的稳定性,而且还具有很好的自调节性。

沸水堆动力学的正式研究是在实验沸水堆 EBWR 上开始的。通过实验测试了它的动态特性,得出在各种不同运行条件下的传递函数,并将之进一步推广到较高的功率水平^[30]。为了解释和分析实验所得到的结果,近来进行了许多理论研究,并创立了沸水堆(包括 EBWR)的某些数学模型^[30,37,41-43]。文献[38、39]对沸水型动力反应堆的动力学进行了详细的研究。

沸水堆功率对反应性最大的反馈作用,是由于在活性区产生汽包所引起的。在沸水堆中,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。

当采用二氧化铀作为反应堆的燃料元件时,则燃料温度将对动态特性发生巨大的影响,燃料温度动力学的研究基本上是属于求解一个福里哀导热方程的性质^[40]。

许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,并日益增多地应用模拟机来研究反应堆动力学和控制、安全保护系统。在文献[32]中介绍了应用大量放大器(约 200 个)和相应的函数发生器模拟反应堆一维空间和某些非线性函数的动力学。当对模拟机和数字机的计算结果进行比较,发现两者是十分符合的。

在继续发展反应堆的固有自调节性方面,今后反应堆动力学在理论和实验研究上还存在许多重要课题,如核-热-水力学相互作用效应,多普勒效应,反应堆噪声和随机波动等^[33]。

所有上述有关热工调节对象的特点、研究对象特性的目的和方法以及存在问题和今后发展趋向,将大部分(如热力设备)或部分地(如核反应堆)反映在即将出版的“热工调节对象动态特性译文集”(科学出版社出版)中。在这本译文集的附录中,收集和编译了国外近十几年有关热工调节对象动态特性论文的专题索引,因此,这里就无需引用更多的参考文献。

本文在编写过程中,曾得到杨嘉墀、钱钟韩、方崇智三位先生的热情帮助和指导,谨致

深切的感謝。

参 考 文 献

- [1] Лоссиевский, В. Л., О Задачах автоматизации производственных процессов, Сб. "Автоматизация производственных процессов", вып. II, Изд-во АН СССР, 1958.
- [2] Вознесенский, И. Н., О Регулировании машин с большим числом регулируемых параметров, *А и Т*, № 4—5, 1938.
- [3] Стефани, Е. П., Об улучшении динамических характеристик релулируемых участков котельных агрегатов, *Изв. ВТИ*, № 8, 1950.
- [4] Williams, T. J., 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动态特性, 南京工学院学报, 1963年, 第三期.
- [6] Миника, О. М., Определение динамических характеристик и параметров типовых регулируемых объектов, Изд-во АН СССР, 1963.
- [7] Вавилов, А. А., Солодолников, А. И., Экспериментальное определение частотных характеристик автоматических систем, Госэнергоиздат, 1963.
- [8] Максвелл, Д. К., Вышнеградский, И. А., Стодоло, А., Теория Автоматического регулирования (линеаризованные задачи), Изд-во АН СССР, 1949.
- [9] Neumann, G., Regler, (Teil. A, B, C, D), *Arch. f. d. Eisenhüttenwesen* 1932—1935, Mitt. 168, 171, 188, 193.
- [10] Profos, P., Dynamik der Überhitzerregelung, *Regelungstechnik*, 6 (1958), No. 7.
- [11] Takahashi, Y., Transfer Function Analysis of Heat Exchange Processes, Automatic and Manual Control, Butterworth Scientific Publications, New York, N. Y., 1952.
- [12] Таль, А. А., О динамических свойствах однофазных участков пароводяного тракта котла *Изв. АН СССР, Отд. тех. наук* (1957), № 2, 49—58.
- [13] Chien, K. L., Ergin, E. I., et al., Dynamic Analysis of a Boiler, *Trans. ASME* (1958), No. 8.
- [14] Дементьев, В. А. и другие, Исследование динамики блока котел 67—2СП-турбогенератор К-50-90, *Теплоэнергетика* (1962), № 8.
- [15] Profos, P., Dynamics of Pressure and Combustion Control in Steam Generators, *Combustion, Mar.*, 1957, p. 34.
- [16] Миронов, В. Д., О динамических свойствах барабанных котлов по давлениям и расходам пара, *Теплоэнергетика*, 1955, № 12, 14—21.
- [17] Сенькин, В. И., Поборчий, В. С., Анализ уравнений динамик барабанного парового котла с естественной циркуляцией, Сб. ЦКТИ, Книга 36, Автоматическое регулирование, Машиз, 1960.
- [18] Jagomir, S., Vliv Konstrukčnich parametrů na dynamiku přehříváku, *Automatizace*, 1961, No. 9.
- [19] Dusinberre, G. M., Statecollege, P. A., Calculation of Transient Temperatures in Pipes and Heat Exchangers by Numerical Methods, *Transactions of the ASME*, 76 (1954), No. 3, p. 421.
- [20] Чистяков, С. Ф., Расчёт 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 (第1, 2 報), 日本機械学会論文集, 1958年, 第24卷, 第139号, 147号.
- [22] 高橋安人, 流量変化に対する熱交換器の応答, 自動制御, 1959, 第6卷, 第1号.
- [23] Агеев, М. Д., О Моделировании теплообменных аппаратов, Доклады 4 Межвузовской конф. по применению моделирования, Сборник № 3, Применение методов матем. моделирования в инженер. исследованиях, МЭИ, 1962.
- [24] Campbell, D., Process Dynamics, John Wiley, N. Y., 1959.
- [25] Арманд, А. А., Расчет переходных процессов в теплообменниках при переменных параметрах теплоносителя, Сб. ВТИ "Повышение параметров пара и мощности агрегатов в теплоэнергетике", Госэнергоиздат, 1961.
- [26] Soodak, H., Campbell, E. C., Elementary Pile Theory, John Wiley and Sons, Inc., New York, N. Y., 1950.
- [27] Harrer, J. M., et al., Transfer Functions of the Argonne CP-2 Reactor, *Nucleonics*, 10 (1952), p. 32—36.
- [28] Gyftopoulos, E. P., Smets, H. B., Transfer Functions of Distributed Parameter Reactors, *Nuclear Sci.*

- and Eng.*, **5** (1959), No. 6.
- [29] 楊文偕, 空間的に正弦波发热をする单管热交換器の过渡応答 (特に不均質原子炉における正弦波の发热に対する応答), 日本機械学会論文集, 1962, 第 28 卷, 第 192 号.
- [30] Kirchenmayer, A., On the Kinetics of Boiling Water-Reactors, *Journal of Nuclear Energy, Part A, Reactor Science*, **12** (1960), No. 1—4.
- [31] 金井 秀、川合敏雄、永井将之, 沸騰水形原子炉における二相流の動特性, 日立評論別冊論文集, 日立制作所中央研究所創立二十周年紀念論文集, 1962.
- [32] Proctor, W. G., 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] Schultz, M. A., Gracet, J. N., Nuclear Reactor Plant Kinetics and Control, *PIRE*, May, 1962.
- [34] Rizika, J. W., Thermal lags in Flowing Systems Containing Heat Capacitors, *Transactions of the ASME*, **76** (1954), N. 3, p. 411.
- [35] Schäfer, O., Feissel, W., Ein Verbessertes Verfahren zur Frequenzgang-Analyse Industrieller Regelstrecken, *Regelungstechnik*, 1955, H. 9.
- [36] De Shong, J. D. Jr., Power Transfer Functions of the EBWR Obtained Using a Sinusoidal Reactivity Driving Function, *ANL-5798*, January, 1958.
- [37] Margolis, S. G. and Kaplan, S., Transfer Functions for Boiling Reactor Stability Calculations, *Trans. Am. Nuclear Soc.*, **3** (1960), p. 124—125.
- [38] MacPhee, J., The Relative Stability of Boiling and Pressurized Light Water Moderated Reactors, *IRE Trans. on Nuclear Science*, **NS-4** (1957), p. 25—29.
- [39] Flack, J. A. Jr., The Influence of Pressure on Boiling Water Reactor Dynamic Behavior at Atmospheric Pressure, *Nuclear Sci. and Eng.*, **9** (1961), p. 271—280.
- [40] Ермаков, В. С., и другие, Исследование процессов переноса тепла в тепловыделяющих элементах, *Журнал ИИЖ-Физ*, **1** (1958), № 9, 12, **3** (1960), № 4, **4** (1961), № 1, 5.
- [41] Thie, J. A., Dynamic Behavior of Boiling Reactors, *ANL-5849*, 1959.
- [42] Kirchenmayer, A., Dynamik des Siedewasser-Reaktors mit Naturumlauf, *Nukleonik*, **4** (1962), No. 3.
- [43] M'Pherson, P. K. and Muscettola, M., A Study of the Dynamics of Steam Voids in Boiling Water Nuclear Reactors, Second International Congress of IFAC on Automatic Control, 1963.

A SURVEY OF THERMAL PROCESS DYNAMICS

LIN LAI-XING

第 2 卷 第 4 期 勘 誤 表

页	行	误	正
232	倒 4	0.12 毫伏/安·高斯	1.2 毫伏/毫安·高斯
235	3	1276 厘米/伏·秒	1276 厘米 ² /伏·秒