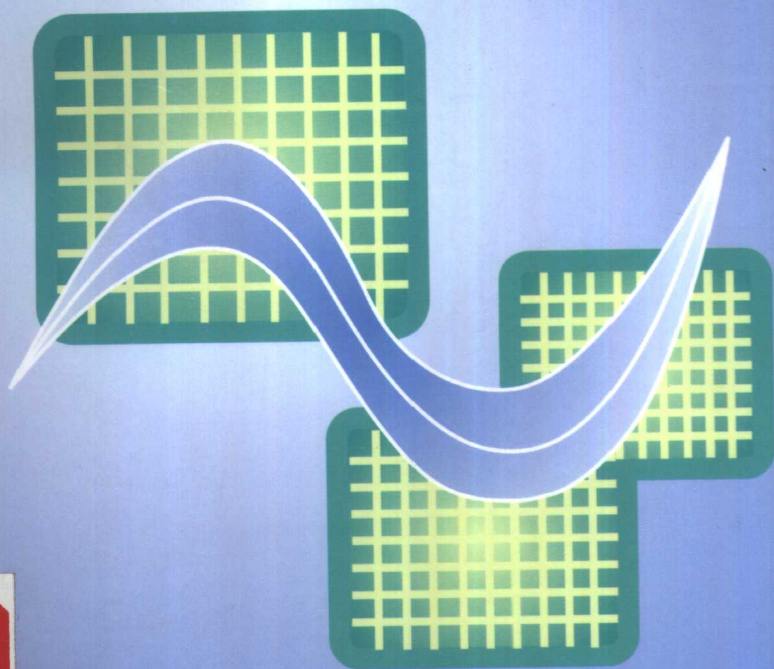


高等学校教学用书



化工过程动态

伍 沅 编



021.8

化学工业出版社

高等学校教学用书

化 工 过 程 动 态

伍 沅 编

化 学 工 业 出 版 社
· 北 京 ·

(京) 新登字039号

图书在版编目(CIP)数据

化工过程动态/伍沅编. -北京: 化学工业出版社, 1998

ISBN 7-5025-2042-2

I. 化… II. 伍… III. 化工过程-动态 IV. TQ021

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第05533号

高等学校教学用书

化 工 过 程 动 态

伍 沅 编

责任编辑: 唐旭华

责任校对: 王安达 顾淑云

封面设计: 季玉芳

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

*

开本850×1168毫米1/32 印张8½ 字数232千字

1998年5月第1版 1998年5月北京第1次印刷

印 数: 1—4000

ISBN 7-5025-2042-2/G·603

定 价: 12.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者、本社发行部负责调换

前 言

提高化工过程控制水平是我国化学工业实现现代化、提高经济效益和增强国际竞争能力亟待解决的重大课题之一，是现在和未来的化工科技工作者责无旁贷的义务。

化工过程动态是化学工程学的—个较新的学科分支，是应用一般控制理论和技术解决化工过程控制问题的桥梁。它对于提高化工过程控制水平的重要作用是不言而喻的。

小平同志提出：**教育要面向四个现代化，面向世界，面向未来。**其中“**面向世界**”是十分重要的一环。笔者以为，面向世界的重要内涵之一，是要充分了解世界，学习别人的一切长处，为我所用。就这一点而言，没有面向世界，就谈不上面向四个现代化和面向未来。

近 40 年来，尤其是 70 年代以来，西方工业发达国家化工过程控制水平迅速提高的现象是发人深省的。正如本书绪论中所说，他们成功的主要经验是：化工过程动态学的发展、科技工作中专业分工的合理变革和与此相适应的化工科技人员知识结构的改善。结合我国实际情况，可以说，化工科技人员参与共同解决控制问题，是提高化工过程控制水平的必由之路。现在已有越来越多的化工科技界同仁有此共识，这是非常可喜的现象。

在参与共同解决化工过程控制问题中，化工专业科技人员应当承担什么任务呢？显然，他们不可能在传感器、仪表、调节阀、乃至计算机接口之类的问题上发挥显著的作用，因为在这些方面他们毫无优势可言。另一方面，化工专业人员熟悉化工过程并对其中涉及的基础理论问题有深刻的理解，清楚地了解过程中各种操作参数的相互影响、可测性、可调性和操作控制的要求、以及允许和不允许出现的情况等。因此，他们承担的任务应当是：研究和建立化工过程动态模型，参与控制结构、控制规律等的设计决策。为此，他们必须掌握有关过

程控制的基本知识,懂得过程控制需要什么样的数学模型,了解在不同的控制作用下过程状态将如何变化。化工高等教育应当满足未来化工科技工作者在这些方面的知识需求。

以上就是在化学工程专业开设《化工过程动态》课和编写这本教材的基本指导思想。

编者从1990年秋起为化学工程专业本科和硕士研究生讲授《化工过程动态》课。本书就是在当时为所在学校开设这门课程编写的内部试用教材的基础上改编、修订而成的。

国外大多数高等学校化学工程专业开设《化工过程控制》或《化工过程动态和控制》课已有30多年历史。美国麻省理工学院荣誉教授G. Stephanopoulos编著的CHEMICAL PROCESS CONTROL——An Introduction to Theory and Practice^[1]一书凝聚了著者多年为化工专业学生讲授这门课程的经验,是国外最有代表性和最有影响的教科书;也是编写这本教材的重要参考文献。

《化工过程动态》课最初开设时曾得到化学工业部主管领导的大力支持。听过这门课的本科生、硕士研究生和青年教师对这本教材的改编、修订作出了重要贡献——他们有的对课程的方向和基本内容给予肯定和鼓励,有的提出改进意见和建议,也有的指出了试用教材中存在的某些错、漏;他们提出各式各样的问题则更促进了笔者不断的思考。其结果,导致文字和数学处理方面都作了许多重要的修改。书稿最后承浙江大学王骥程教授审阅。在此一并致以衷心的感谢!

限于编者的水平;加之,化工专业开设《化工过程动态》课在我国毕竟是一件新的工作,没有经验可言。因此,书中难免存在各种性质的缺点甚至错误。竭诚欢迎批评指正,俾有所前进。

伍 沅

1997年8月于杭州

内 容 提 要

本书是高等学校化学工程与工艺专业教学用书。主要内容包括化工过程控制基本知识的简要介绍，化工过程动态数学模型的构成及其建立的基本原理和方法，用于控制的数学模型处理特别是线性化方法，拉普拉斯变换、反演及其应用，化工过程动态特性分析，受反馈控制化工过程动态分析方法和各种控制作用及控制器参数对受控过程的影响，受控过程稳定性分析和判据，以及其他控制结构基本原理及其控制作用的简要介绍等。

除作为本科教材外，本书还可以用作本科未学过该课程的硕士研究生教材；也可供化工及自控专业科技人员和教师参考。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 化工过程动态学的范畴	1
1.2 研究化工过程动态的目的意义	2
1.3 化工过程动态学的发展	4
1.4 本课程的基本内容	7
第二章 化工过程控制导论	10
2.1 化工过程控制的目的和基本要求	10
2.1.1 抑制外部干扰的影响	11
2.1.2 保证过程的稳定性	14
2.1.3 优化技术经济指标	16
2.2 控制系统设计的基本概念	17
2.2.1 化工过程变量分类	17
2.2.2 控制系统设计要素	19
2.2.3 复杂化工过程控制问题简介	25
2.3 控制系统的硬件和计算机应用	28
2.3.1 控制系统的硬件	28
2.3.2 数字计算机在过程控制中的应用	30
习题	33
第三章 化工过程数学模型化	36
3.1 化工过程数学模型的构成	37
3.1.1 状态变量和状态方程	37
3.1.2 数学模型的其他组成部分	39
3.1.3 数学模型化的困难	40
3.2 数学模型的自由度	41
3.2.1 自由度的意义	41

3.2.2 自由度与控制器设计	45
3.3 某些化工过程数学模型实例	47
3.3.1 气体缓冲罐	47
3.3.2 连续搅拌槽反应器(CSTR)	48
3.3.3 混合过程	51
3.3.4 喷雾干燥出塔气体温度	53
3.3.5 轴向流动反应器	55
3.3.6 理想二元精馏塔	57
3.3.7 纯滞后过程	62
3.3.8 结语	63
习题	63
第四章 以控制为目的的数学模型处理	66
4.1 输入-输出模型	66
4.2 非线性系统的线性化	71
4.2.1 单变量系统的线性化	73
4.2.2 偏差变量及其应用	76
4.2.3 多变量系统的线性化	79
习题	85
第五章 拉普拉斯变换及其反演	87
5.1 拉普拉斯变换的定义和性质	87
5.1.1 拉普拉斯变换的定义	87
5.1.2 拉普拉斯变换的基本性质	88
5.1.3 导数和积分的拉氏变换	89
5.1.4 终值定理和初值定理	90
5.2 某些基本函数的拉普拉斯变换	92
5.2.1 指数函数	92
5.2.2 斜坡函数	92
5.2.3 三角函数	93
5.2.4 阶跃函数	93
5.2.5 平移函数	94

5.2.6	脉冲函数	95
5.2.7	理想单位脉冲	96
5.3	拉普拉斯变换的反演——部分分式展开法	97
5.3.1	拉普拉斯变换式的部分分式展开	98
5.3.2	分母多项式有相异实根	98
5.3.3	分母多项式有相异虚根	101
5.3.4	分母多项式有重根	103
附表	某些常用基本函数的拉普拉斯变换	107
习题		110
第六章	拉普拉斯变换的应用	111
6.1	求解线性微分方程	111
6.1.1	一阶线性常微分方程	112
6.1.2	二阶线性常微分方程	113
6.1.3	二元一阶线性常微分方程组	118
6.1.4	一阶常系数线性偏微分方程	120
6.2	停留时间分布分析	122
6.2.1	分布函数和响应的拉普拉斯变换表述	122
6.2.2	RTD 的实验测定	123
6.2.3	某些流动系统的 RTD 分析	125
6.3	传递函数和输入-输出模型	128
6.3.1	单输出过程的传递函数	129
6.3.2	多输出过程的传递函数矩阵	132
6.3.3	传递函数的极点和零点	136
6.3.4	系统响应的定性分析	137
习题		140
第七章	化工过程动态特性分析	142
7.1	一阶系统动态特性	142
7.1.1	一阶系统的定义及其基本参数	142
7.1.2	纯容量过程的动态响应	146
7.1.3	一阶滞后系统的动态响应	147

7.1.4	可变参数的一阶系统	150
7.2	二阶系统动态特性	152
7.2.1	二阶系统的定义及其基本参数	152
7.2.2	二阶系统的动态响应	153
7.2.3	一阶过程串联系统	159
7.2.4	附加控制器导致的二阶系统	165
7.2.5	本征二阶系统	167
7.3	高阶和其他复杂系统的动态特性	169
7.3.1	多容量串联系统	169
7.3.2	具有纯滞后的动态系统	170
7.3.3	具有反向响应的系统	172
	习题	174
第八章	受反馈控制的化工过程动态	178
8.1	基本概念	178
8.1.1	反馈控制结构及其硬件	178
8.1.2	反馈控制器的类型及其传递函数	181
8.2	方块图和闭环传递函数	185
8.3	比例控制对受控过程响应的影响	191
8.3.1	一阶系统	191
8.3.2	二阶系统	197
8.4	积分微分和组合控制作用的影响	199
8.4.1	积分控制作用的影响	200
8.4.2	微分控制作用的影响	202
8.4.3	组合控制作用的影响	204
8.5	受反馈控制过程的稳定性	206
8.5.1	稳定性的概念	206
8.5.2	控制器参数对受控过程稳定性的影响	207
8.5.3	稳定性判据	211
8.5.4	劳斯-赫尔维茨分析法	212
8.5.5	根轨迹分析法	215

习题	216
第九章 其他控制结构简介	219
9.1 大纯滞后和反向响应过程的补偿反馈控制	219
9.1.1 具有大纯滞后过程的补偿反馈控制	219
9.1.2 有反向响应过程的补偿反馈控制	222
9.2 多回路反馈控制	225
9.2.1 串级控制	225
9.2.2 选择性控制	228
9.2.3 分程控制	230
9.3 前馈和比值控制	231
9.3.1 前馈控制	232
9.3.2 前馈-反馈控制	236
9.3.3 比值控制	240
9.4 适应性控制和推断控制	242
9.4.1 适应性控制	242
9.4.2 推断控制	247
习题	249
参考文献	252
符号表	254

第一章 绪 论

1.1 化工过程动态学的范畴

化工过程动态学研究存在外部干扰或(和)干预时化工过程的动态行为,即受外界干扰或(和)干预时化工过程的状态随时间变化的规律。

所谓干扰,是指人们不希望发生、通常也难以预见的外界因素变化。例如管道发生部分或全部堵塞致使进料或出料流量变化,进料组成或温度变化等。干预则是根据需要由操作人员或控制机构施加给过程系统的人为变化,例如调节控制阀门的开度以改变进料或出料流量,接通加热器电源给工艺物料加热等等。

在化学工程的其他分支学科,例如传递过程和化学反应工程中,通常把化工过程分为“稳态”和“非稳态”两类。在稳态过程中,系统中任何空间点处的状态,如温度、压力和组成等,都不随时间变化,或者说,任何状态变量的时间导数值均为 0。反之,如果过程系统中的状态随时间变化,该过程就是非稳态过程。严格说来,实际化工生产中不可能有绝对意义上的稳态过程。状态变量总会不同程度地随时间而变化,至少会在较小范围内波动。但是,如果状态变化的幅度很小,对时间的统计平均值又基本上恒定,那么,稳态的处理就能够给出非常接近真实情况的结果;而处理方法却可以大大简化。因此,“稳态”这一理想化的概念对于分析研究化工过程的性质和基本规律是非常有用的。

上面所说的稳态和非稳态,是根据化工过程本身的性质定义的。它们都表示在不存在外界干扰和干预的情况下化工过程本身的性质。例如,在图 1.1(a)所示的连续搅拌槽反应器(CSTR)中进行放热反应 $A+B \rightarrow R$, 反应物 A 和 B 连续加入反应槽,同时连续地从槽中移出反应混合物 P。反应放出的热量由夹套水冷却连续移走。如果单位时间内 A 和 B 的加料量及混合物 P 的排放量都保持恒定,且后者恰

好与前两者之和平衡, 冷却水 W 的流量和温度也保持恒定, 则在开车运行一段时间后, 反应槽中的所有状态, 包括温度和组成等, 都将保持恒定, 不再随时间变化。这时, 我们称反应槽中的过程为稳定过程, 或者说, 该过程处于稳态。在这里, 对该过程给予稳态定义的前提是: 反应物 A 、 B 和混合物 P 的流量以及冷却水 W 的流量和温度都保持恒定, 即不存在外界干扰和干预。

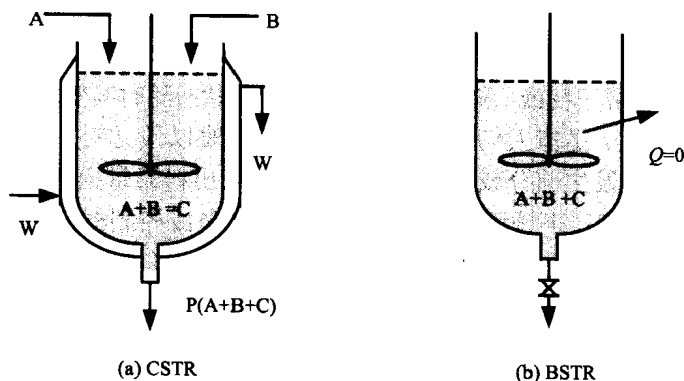


图 1.1 稳定过程和不稳定过程

如果上述反应在图 1.1(b)所示的间歇绝热搅拌槽反应器(BSTR)中进行, 反应物 A 和 B 在反应开始前一次投入, 那么, 反应开始后槽中混合物的组成和温度都将随时间连续变化, 直到停止操作卸料为止。显然, 这是非稳态过程。该过程中并不存在外部干扰和干预。换言之, 该过程的非稳态行为并不是外部干扰或干预引起的, 而是由过程系统本身的性质决定的。

由前面定义的范畴可知, 化工过程动力学研究的对象是过程系统的非稳态行为。然而, 与化学工程的其他分支学科不同, 过程动力学主要关心的是由于外部干扰或(和)干预造成的非稳态行为, 而不是由过程系统本身性质决定的非稳态行为。

1.2 研究化工过程动态的目的意义

研究化工过程动态的主要目的, 是合理、可靠地控制化工过程。

近半个多世纪以来,化学工业发展极为迅速。就全世界而言,目前全部化工产品的产值已占国民生产总值的10%以上;个别国家和地区几乎达到一半。化学工业如此迅速的发展,与化工过程控制问题的解决是分不开的。生产过程的安全运行、保证产品质量优良稳定、优化操作条件、降低消耗、提高经济效益等,无不有赖于合理可靠的操作控制。随着化工生产大型化、连续化和高技术化,单纯依靠经验的手工操作控制,已很难达到预期的目的。自动控制系统,尤其是应用数字计算机的控制系统,不仅可以节省人力,还可以在上述各个方面达到非常有效的控制,给化学工业带来巨大的经济效益。

要合理可靠地控制化工过程,首先必须深入了解过程的规律,解决下述问题。

(1) 过程在什么条件下进行?在没有外部干扰和干预的情况下过程系统行为的基本规律如何?对于连续过程,没有外部干扰和干预条件下的行为就是稳态行为。稳态也称静态。

(2) 哪些因素或变量可能干扰化工过程的正常操作?当这些干扰发生时过程行为的基本规律如何?怎样克服有害的外部干扰对过程的不利影响,也就是如何确定过程控制的对策?

一般说来,经过化学研究和生产工艺技术的开发,前一类问题应当是已经解决了的,否则不可能进行工业化生产。而要解决后一类问题,就必须在深入了解化工过程的基础上建立过程的动态数学模型,用经过实践检验证明是可靠的动态模型来模拟、分析和研究在外部干扰或(和)干预作用下过程动态行为的定量规律,为过程控制系统的设计提供基本的依据。这些就属于化工过程动态学研究的范畴。

显然,掌握化工过程动态行为的规律,是正确、合理地设计化工过程控制系统的基础和前提。被某些西方国家誉为“化工过程动态学之父”的 Campbell^[2] 曾经说过:“如果控制系统的设计人员只把注意力集中在仪表和控制机构方面,忽略了过程装置是最基本的核心问题,那就不能指望过程控制取得重大进展。在过程控制问题上,关于过程行为的知识是第一位的”。只有把握了化工过程动态行为的基本规律,才有可能正确地决定实施控制的过程变量和为过程控制提供信

息的测定方案,选择恰当的控制结构和控制规律,进而合理地设计化工过程控制系统。

要正确地掌握化工过程的动态行为、建立可靠的动态模型,就必须深入了解化工过程中的各种物理、化学现象。它们涉及化学、物理化学、化工热力学、反应动力学、传递过程、以及产品工艺学等多种化工学科的知识。因此,化工过程动态学实际上是与化学工程科学和实践密切相关而又相对独立的学科领域,而不是任何其他工程学科蜕变的产物。

早在本世纪 40~50 年代初,控制理论和技术就已高度发展。对于化工过程控制而言,这些理论和技术当然是可以借鉴的。只要建立起合理可靠的化工过程动态模型,控制问题就不难解决。从这个意义上说,化工过程动态学的发展是提高化工过程控制水平的关键。

除了用于控制以外,过程动态学的方法在其他领域也有较广泛的应用。各种加工装置中物料停留时间分布(RTD)的研究就是一个典型的例子。此外,在反应动力学研究、催化反应和干燥等过程操作中也有采用动态学的方法。这类应用还有日益增长的趋势。

1.3 化工过程动态学的发展

化工过程动态学的发展与控制问题的解决密切相关。

工业发达国家化工过程控制水平的迅速提高主要是在最近 40 多年。化工过程动态学的出现和发展也是比较晚的。

化学工业发展的最初几十年间,人们主要致力于生产过程的机械化,用机器代替繁重的手工劳动。在西方工业国家,也就是当时化工产品的主要生产国家,机械化的任务在 30 年代末至 40 年代初就已基本完成。大多数需要笨重体力劳动的工序已经改用机器。至少可以说,机械化在技术上是是可以实现的;是否实施,仅仅取决于投资、生产成本和收益的权衡。实现机械化当然也需要一定的理论基础,比如,必须知道生产过程的基本原理,并能用数学描述有关的物理学关系。但相对而言,这些理论和数学关系毕竟是比较简单的。

化学工业的机械化导致了现代化大型生产装置诞生。在大型化的

同时,化工过程强烈地趋向于连续操作;相应地,各种量之间的关系都需要用稳态的方法来处理。化工过程中各种稳态关系的建立,是化工工艺、单元操作、机械和数学等方面的专家们共同努力的结果。这大约是在 30 年代至 50 年代初完成的。由于化学工业本身的复杂性,当时建立的这些关系绝没有达到象电工学关系那样精确可靠的程度,经验型关系式占有很大的比重。随着化学工程科学的发展,各种稳态关系式不断有所改进。事实上,对化学工程中现有的稳态数学处理方法的改进和提高,至今仍然是热门的课题之一。

随着机械化问题的解决,技术革新不再受人类体能的限制,人的创造能力大大地增强了。生产装置的大型化和操作的连续化,使得化工企业创造的价值急剧增长;然而,风险也随之而增大——偶尔操作不慎就有可能造成巨大的损失。这么重大的责任,依靠人工操作控制是难以承担的。于是不得不求助于失控报警系统;同时也提出了自动控制的要求。当控制的功能转交由新出现的自动控制机构来执行时,化工生产过程自动化的进程就开始了。

在化学和石油化学工业中,生产过程向自动化的转变大约经历了 30 多年,比其他工业的自动化所经历的时间要短一些。这是因为,化工过程的自动化有其他工业自动化的技术和经验可以借鉴。

毫无疑问,在 40~50 年代,实施自动控制需要解决的主要问题是使受干扰的连续过程恢复稳态操作。因此,必须考虑过程受到干扰或(和)干预后非稳态行为的数学描述。遗憾的是,直到 50 年代初,在非稳态过程的数学分析方面工作做得很有限。讨论这一问题的论著很少;即使有少数论著涉及这一论题,也缺乏系统的、一般化的理论基础。更突出的问题是其结果不适用于过程控制系统设计的目的。在这样的情况下,控制问题自然不可能很好地得到解决。最好的控制系统也多半是根据定性的考虑设计的。操作人员必须具备关于这类控制系统性能的知识 and 经验,又熟悉化工过程,才能实施比较成功的控制。复杂化工过程的控制问题当然就更难解决了。与此成对照,在当时的机械工业中已经有了严格遵循预定程式的极其精密的控制系统。问题的实质是:需要充分研究和掌握化工过程的动态行为,建立合理可靠

的动态模型。否则将难以前进。

尽管生产实践的需要呼唤化工过程动态学，但它发展的道路还是曲折的。在化工生产向自动化转变的初期，化学工程师们认为解决控制问题不是自己的事，而是受过充分的电气、电子和机械学训练的控制专家们的工作。当时的分工模式也正是这样：化工过程自动控制的任务，包括过程动态行为的研究，全部由自控专业人员承担。诚然，要应用于控制，描述化工过程行为的各种关系式最终都必须转换为机械学和电学关系。根据已获得的基础训练，自动控制专家有充分的能力完成这种转换。然而，控制专家对化工过程的了解很难达到建立动态模型所需要的深度和广度。于是，化学工程师与控制专家之间的密切合作就成为必不可少的了。在工业发达的国家，这种合作大致从 50 年代初开始。它是化工过程控制科学技术发展的一个里程碑。

化学工程师与控制专家合作进行化工过程动态的研究，最初是有障碍的。首先，这两类专家没有受过共同的基础训练。不同的教科书可能用性质和结构完全不同的数学关系式来描述相同的过程系统。其次，他们习惯使用的技术语言很不相同，甚至对于对方的知识结构和工作方式等，相互间也缺乏基本的了解。虽然当时的控制理论和技术已经高度发展，但严酷的事实是：只有那些能适应控制论中已有的数学工具、又能正确地反映化工过程规律的关系式，才能用于化工过程控制系统的设计。这意味着，化学工程师必须学习和掌握过程动态和控制的技术语言，用过程动态学中标准的或者说习用的数学工具来描述化工过程。化学工程和控制领域的专家们通过相互学习、共同努力克服了这些障碍。其结果，产生了《化工过程动态学》。这方面最早的著作当推 D. P. Campbell 的 *Process Dynamics* (1958) 一书。

化学工程师与控制专家的合作，实质上也是化工过程控制科技工作调整专业分工的开始。《化工过程动态学》的产生和发展加速了专业分工的变革，促进了化工过程控制水平的提高。

50 年代是化学工业迅速发展的年代，也是化学工程科学技术突飞猛进的年代。由于过程控制在保证安全生产和提高经济效益等方面起着重要的作用，解决控制问题的需求急剧增长。然而，随着生产规模和产品品种