化工自动化丛书

化工动态学

王骥程 编

化学工业出版社

化工自动化丛书

化工动态学

王骥程 编

化学工业出版社

内 容 提 要

《化工动态学》是《化工自动化丛书》之一，它专门研究化工过程的动态行为。全书共分四章，第一章引论，第二章化学工程中的数学描述方法，第三章动态建模，第四章过程动态建模的其它问题。本书的特点是着眼于机理建模方法的介绍。全书多实例，涉及化工生产过程的各种基本单元和生化反应器，有利于读者举一反三，着眼于工程应用。

本书可供从事过程控制专业的工程技术人员、化工工艺专业人员以及大专院校有关专业师生参考。

全书由天津大学化工系韩建勋教授审阅。

化 工 自 动 化 丛 书
化 工 动 态 学
王骥程 编

责任编辑：刘 [illegible]
封面设计：任辉

化学工业出版社出版发行
（北京和平里七区十六号楼）
化学工业出版社印刷厂印刷
豆各庄装订厂装订
新华书店北京发行所经销
*
开本787×1092 1/32印张10 1/2字数232千字
1990年9月第1版 1990年9月北京第1次印刷
印 数 1—2,000
ISBN 7-5025-0696-9/TP·19
定 价6.00元

编 写 说 明

近年来，随着化学工业和自动化科学技术的迅速发展，化工自动化技术有了新的进展。以现代控制理论为基础的各种新型控制方法和调节系统相继成功地应用于化工生产；新型的自动控制技术工具以及电子计算机也日益广泛用于化工自动化领域。

为了总结交流我国化工生产应用自动化技术的经验，介绍新的调节理论和控制方法，提高从事化工自动化工作的工人和技术人员的理论和技术水平，促进化工自动化工作的发展，一九七五年，在炼油、化工自动控制设计业务建设会议上，决定由化工部炼油、化工自动控制设计技术中心站负责，组织有关院校、科研设计单位和工厂，编写一套《化工自动化丛书》。

《化工自动化丛书》是在普及的基础上侧重提高的一套读物，主要包括经典和现代控制理论，各类调节系统和化工单元操作控制等方面的题材。"丛书"内容力求密切反映化工应用的特点，做到理论联系实际，既阐明基本概念，作出理论分析，又叙述工程应用方法和应用实例，说明具体实施方案和现场运行经验。

《化工自动化丛书》编委会成员

主任委员　周春晖（浙江大学）

副主任委员　蒋慰孙（华东化工学院）

万学达（中国寰球化学工程公司）

王骥程（浙江大学）

沈承林（北京化工学院）

委　　员　韩建勋（天津大学）

庄兴稼（抚顺石油学院）

李乾光（化工部第一设计院）

林秋鸿（北京石油化工工程公司）

王　翼（南开大学）

徐炳华（化工部第三设计院）

钱积新（浙江大学）

俞金寿（华东化工学院）

孙优贤（浙江大学）

罗秀来（上海炼油厂）

蔡鸿雄（兰州化学工业公司对外经济协作处）

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

前　言

化工动态学是一门研究化工过程动态行为的学问，它对研究、解决化工生产过程中的实际问题具有十分重要的作用，简言之反映在以下几个方面。

1．可了解实际系统的行为。

2．过程在经受外界影响时对它的灵敏度作出估计。

3．对它的稳定性作出分析。

4．预估它的将来行为。

5．研究它的可控性。

6．设计控制系统。

7．设计保护系统等。

要精确地描述过程的动态行为离不开数学描述，人们把建立这一数学描述关系的过程称之为建模。建模的方法是多样的，基本上有依据机理建模和实验方法建模两大类，即人们所说的“白匣子”或“黑匣子”两种。“白”是清楚的意思。“黑”是不明真相之意。若将机理与实验测试两法并用，那就是一个“灰匣子”的办法了。

在本书中，作为研究化工动态学的方法采用了机理建模法。这倒并非作者的偏爱，主要是以化工动态学命名的学科若能建立在源于过程机理的模型上，则更具有说理性和内涵性。因为机理模型的好处在于，它是建立在深刻了解过程内在关系的基础之上，通过物料、能量、动量的守恒关系而得到的数学关系表达式，因此有验前性、预估性，即不必等待

真实过程建立之后才能获得其动态特性，而能“未卜先知”于设计之中。这对从事工艺或自控的工作者来说都具有极大的吸引力。再者，如果从建模的角度来看，应用辩识的办法专著颇多，把它捏在一起来写既占据篇幅，又易冲淡主题，所以本书只讲机理建模，以利于能比较深透些，并从而体现此书的特色。

化工动态学建模方法的高度概括可以归结为：“对所研究的化工过程运用能（质）量的守恒定理，根据输入与输出之差引起系统能（质）量积累变化所列写出来的表达式”。这一工作的难处是在联系实际过程时，有时内在机理本身不甚清楚，或存在着如何从工程应用的角度出发，给予合理假设加以简化来满足应用的问题。由于化工对象具有典型单元特性，所以拟多举实例，希望通过反复运用，理解和掌握方法，开阔思路，达到真正领会如何运用上述基本原理去建模的目的。示例很多也是此书的特色之一。

研究化工动态学既需要化学工程的基础知识，也需要多种数学方法。前者是指那些传热、传质、传动等传递方程、化学反应和反应动力学等关系式[1]，后者指那些采用微分方程(常或偏)、拉氏变换、z 变换、状态方程这些已为从事过程控制的人所熟悉和掌握的方法[2]。由于化工动态学涉及面颇广，若要领会它的作用和重要性，最好是在为达到某种目的而建立化工动态模型之后，求出其最终解。因此，本书将择例为之，否则必将花去大量篇幅在数学求解上。与此同时还将从合理假说，简化模型入手，以求较快地获得近似解，作为处理若干工程问题的方法之一。

从哲学观点来看，宇宙间的事物运动是绝对的，静止是相对的。因此，用静态关系处理事物（定常态）所得的数学

模型仅是一种特例。但这种描述方法人们习惯已久，所以作为如何建立数学模型的示教实例，略作介绍是有好处的。因此，这些内容将出现在“化学工程中的数学描述方法”一章之中。

化工动态学既然是研究化工过程动态行为的学问，因此了解化工生产过程的特点是十分必要的。众所周知，设计一个化工厂的目的是在合理设置并组合生产加工的单元基础上，将原料以经济合理的方式加工成所需要的产品。概括起来在考虑操作与控制方面应能满足以下要求：

1．安全。

2．满足产品规格。

3．环境控制。

4．操作在约束条件内。

5．经济（有效率）。

也就是说在安全、优化的基础上考虑优化设计、操作、控制和安全的问题。而真正要做到这一步，毫无疑问必需是建立在化工动态学研究的基础之上。

在建立机理数学模型的时候，基本上可以分为三类：

1．集中参数模型。

2．分布参数模型。

3．级联过程模型。

这些模型经数学方法处理后所得的方程式形式可归纳如下表。应该注意，由于处理方法的不同，同一个系统完全可以得到不同的表达形式，在此书的后面各章中将会给出若干例子。

以上所说都是以数量关系所表示的机理数学模型。对于一个化工生产过程，要确定其状态只有单元设备的模型是不够的，还必需有描述这些单元间相互联接的逻辑关系，可以用逻辑方程、信号流程网络图及其对应的各种矩阵形式表示

	定　常　态	动　　态
集中参数模型	代数方程	常微分方程
分布参数模型	常微分方程	偏微分方程
级联过程模型	差分方程或代数方程	差分-微分方程或常微分方程

的变量之间的因果关系来表示。因此，一个复杂的大型化工生产过程，其数学模型将是单元模型和系统逻辑关系结构模型的综合。它是研究系统工程所必需的。而本书的内容不想扩大到这种规模，将以基本的单元内容为限。

在组织化工动态学机理模型的材料时，可以设想有两种方法。即一种是按数学方程的表达形式来归类，它的好处是数学的连贯性强，而它的缺点是化工单元描述的连贯性差。另一种则是按化工单元的表达形式来归类，其利弊恰恰相反。为了吸收两种方法的优点和弥补各自的不足，在编写此书时两种方法兼而用之。例如以数学方程形式为主描述的可在第二章“化学工程中的数学描述方法”及第三章“动态建模”中的若干章节中得到反映。而第三章的其余部分和第四章“过程动态建模的其它问题”，则是以化工单元为主去建立模型的集中体现。总之，无非是希望能够博取两者之长以体现动态学的化工特色。

在前言中还需交待的最后一个问题是，也许有人会说：“用机理建模好是好，但化工对象太复杂，要获得一个既精确又比较简单、使用方便的模型太困难了。因此等于说是否机理模型没有什么实用意义呢?”回答是：“否!”化工对象有不少比较复杂是事实，但由于科学的进步，为了设计、预

估、分析的需要，这是一条迟早必需去走的道路。由于计算机的出现，从某种意义上来说，模型的复杂性在计算的难度上已有所突破，它已不再是无法运算的拦路虎了。机理模型可以为人们指出该对象的内在联系和因果关系，用以指导生产。因此，退一万步来说，正如波斯人的谚语所说，“在一个盲人的城市中，独眼龙也就很好了”。所以我们要勇敢地在前人开辟的道路上继续前进。

目　录

前　言

第一章　引论 …… 1

第一节　历史的回顾 …… 1

第二节　工艺与自控需要动态模型 …… 3

第二章　化学工程中的数学描述方法 ……28

第一节　列写的一些法则与定律 ……28

第二节　基本定律 ……30

第三节　问题的数学描述 ……48

第四节　常微分方程 ……61

第五节　线性代数 ……87

第六节　拉普拉斯方法 …… 104

第三章　动态建模 …… 113

第一节　多变量系统线性化 …… 113

第二节　分布参数系统 …… 125

第三节　数据关联法求过程特性 …… 133

第四节　集中参数系统的动态响应 …… 141

第五节　多级系统的响应 …… 149

第六节　分布参数系统的响应 …… 165

第七节　过程控制系统设计 …… 180

第八节　为控制目的建模考虑 …… 197

第九节　小结 …… 211

第四章　过程动态建模的其它问题 …… 213

第一节　流体流动系统动态行为 …… 213

第二节　混合与调和的动态模型 …… 225

第三节　传热系统的动态模型 …… 246

第四节　分离塔的动态模型 …… 276

第五节　生物反应器动态特性 …… 311

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第一章 引 论

第一节 历史的回顾

化工动态学的形成与发展离不开对化学工程学科成长过程的探讨。早在三、四十年代，从工艺操作上的要求出发，人们开始探讨所谓“暂态（过渡状态）”现象或行为了。例如对间歇精馏操作，提出了怎样才能估计在全回流的情况下塔内各盘液相组分随时间的变化关系，因为这与应在什么时候从塔顶采出的问题有关。显然对一些难以分离的物料来说，如何缩短开车时间是非常重要的。在此情况下，研究具有滞液量的塔盘，滞液量的多少是怎样影响组分浓度变化的关系将是十分必要的了。也就是说从塔盘到整塔动态行为的研究是势在必行的。又如有许多人研究传热过程的暂态行为，也是基于发觉热交换器的热容量对在非定常状态下的传热影响是一个不可忽视的因素。以上两例都表明动态学的研究首先是从工艺操作上的需要而提出来的。

在五十年代前后，由于经典控制理论的发展和应用，并把它移植应用到化工过程中来以后，进一步推动了关于化工动态学的研究工作[3]。过程控制应用了反馈理论，从而改变了过程控制设计的原貌，把原来只认为选好仪表就等于自控设计的全部这种认识，转变成为要从选表、工艺和控制三者有机结合考虑它们的动态特性的想法。实际上是要在了解三者的关系，建立起系统的动态模型，从而了解其行为的基础

上，研究系统的稳定性和根据某种性能指标实现优化控制的问题。显而易见要获得定量的结果最困难和重要的无疑是对过程动态特性的描述。不言而喻化工动态学在人们的头脑里愈来愈占据了更重要的地位。

当人们从事化工动态学的研究时，可从两种不同的领域入手：

1．微观的过程动态学，它涉及局部或小规模的现象，例如研究流体力学中湍流和扩散现象等。

2．宏观的过程动态学，它涉及一些大规模或者是过程设备的总体行为。

宏观的研究方法对控制系统的设计来说则显得更为重要一些。而微观的研究方法对于进一步深化了解工艺过程有时也是十分重要的，因此需作相互补充。

六十年代前后，在科学技术上出现了一些新的突破，那便是数字控制机在工业上的应用和现代控制理论的出现，使得过程控制的问题随着大生产的发展，已经超越昔日以常规仪表为硬件，以单输入单输出结构形式为主体的孤立思考问题的控制策略。过渡到必需考虑控制回路间具有内部相互联系，以多输入多输出为结构方式的控制策略设计思想[4]。七十年代石油危机发生以后，为了更有效地利用能源，在工艺上通过精心设计使得耗能设备与供能设备更紧密地联系在一起了，使得设备之间的耦合关系加深了。为了消除其影响，了解对象的动态特性的重要性就更为迫切了。

近年来更随着微机的普遍应用和生产过程的优化控制的需要，各种考虑化工过程所具有的特性，如非线性和时变特性，进而采用自适应控制等策略都提出来了。在化工生产方面不仅出现了更大规模的生产过程，另一方面间歇批量生产

方式因能更好地满足市场需要又重新为人们所重视。为了保证生产的安全，例如用人工智能、专家系统来实现防止事故的故障诊断系统等都离不开对于化工动态学的研究，因此新技术在生产上的应用将成为研究化工动态学的强大动力[5]。

第二节　工艺与自控需要动态模型

在本书的前言中曾经谈到化工动态学的研究可为解决化工生产中的许多实际问题作出贡献，其作用很大。下面将通过几个实例来说明建立化工动态模型工作的重要性。

例 1-1　间歇精馏的操作问题[6]

众所周知，间歇精馏是一种批量、周期性的生产过程。一个完整的生产周期应包括以下内容：

开车——将需要分离的物料加入精馏塔后，在全回流的情况下使之达到某一给定的顶馏出液浓度指标值。

顶馏物采出——当塔顶组分浓度达到规定值后通常可按恒定回流比或变回流比的方式操作，以获得尽可能多的合格馏出液。

塔底液纯化——为了使塔底产品（或排液）达到规定要求，还需一段去除低沸物的纯化时间。

从工艺要求角度来看，为了获得合格产品，整个操作周期所花的时间应愈短愈好。于是就提出了研究过程暂态行为的问题。我们知道精馏是一种分离过程，在气液两相之间存在着物质传递，假若传递过程迅速能够达到平衡，那么引起暂态行为的主要原因便存在于回流罐、塔盘和塔釜内滞液量中液相组分渐变过程中。

关于这个问题曾经有人根据机理模型，通过计算机的仿真研究作过比较深入的分析。精馏塔的模型是按机理逐盘列

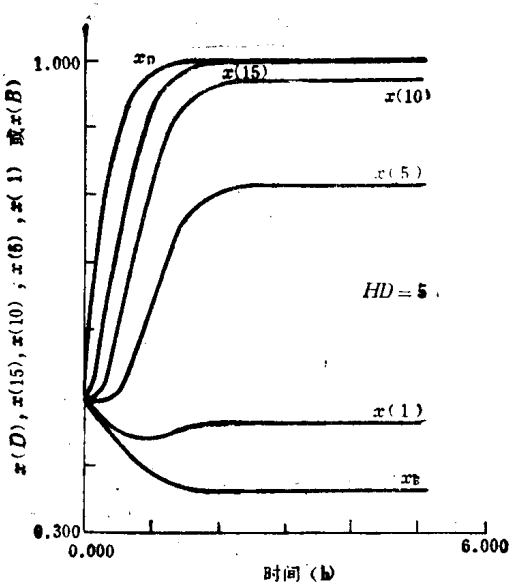

图 1-1　全回流开车至平衡

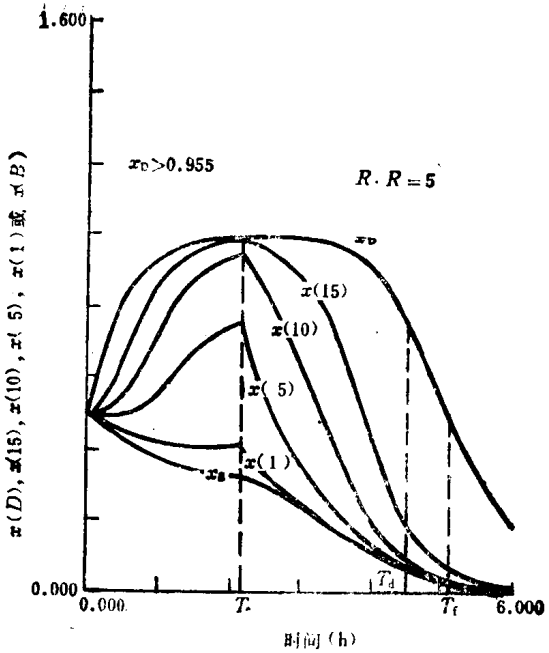

图　1-2　塔盘浓度对时间变化关系

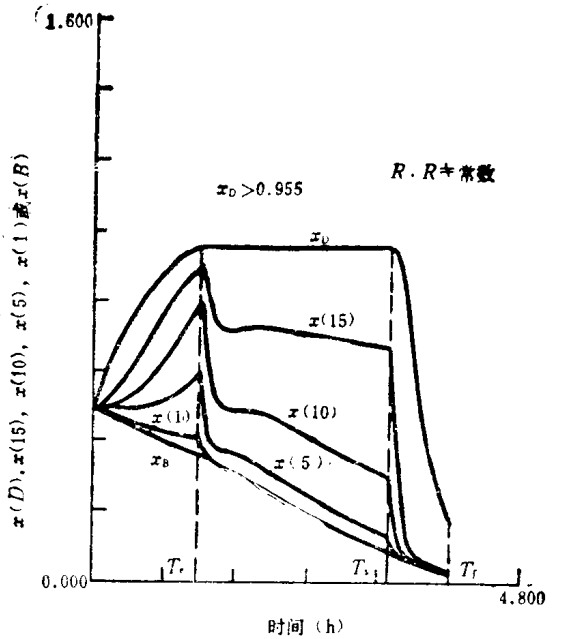

图 1-3　塔盘浓度随时间变化关系

写的，仿真时假设被分馏物为双组分理思溶液．精馏塔具有20块塔盘，气液平衡关系采用了相对挥发度 $\alpha=1.5$ 的表示法，塔盘效率为100%，上升气量依照 100mol/h，每批处理量为100mol，塔盘滞液量为1mol．回流罐滞液量为5mol。

图1-1表明了在全回流情况下塔顶和塔底以及几块代表性塔盘溶液浓度的变化情况。曲线表明处于塔中部的塔盘液相组分达到稳定的时间最长，也可看出各盘液相组分达到稳定所需的时间。

图1-2表示当以全回流操作使 x_D达到 0.955（时间 T_c）后，改用保持回流比为 5 操作至T_d，从而获得馏出液的平均

浓度合格$x_{AD}=0.95$所需的时间，从T_d至T_f则是塔底液纯化所需的时间。

图1-3是表示在全回流操作情况下使x_D达到0.955，然后以变回流方式始终保持馏出液$x_D=x_{AD}=0.95$直至T_e，最后以T_e至T_f的时间来完成塔底液的纯化工作。

由于操作方式的不同，从而获得了不同的浓度变化曲线和不等的T_f时间。由于一开始都采用全回流操作，所以图1-2与图1-3中T_e值相同。

在这一示例中，不拟再详细列写方程和进一步叙述计算机的仿真工作了，这些内容将留待以后各章节中去详细介绍。此例所要说明的观点是，当你能深入了解精馏的机理，并能建立一组正确的数学表达式，那么完成了建模工作以后，你就有可能透彻了解间歇精馏的全过程，从而改进生产操作方式，使生产处于最优情况之下。这就是从工艺角度来理解研究化工动态学的重要意义。

例 1-2 均匀调节的讨论与分析

图1-4是一个典型单回路均匀调节方案。均匀调节的作用有三：

1．平衡输入流量Q_i与输出流量Q_o。

2．平滑输出流量Q_o的变化。

3．要保持液面在上下限（ΔH_T）内浮动而不超限。

从而可为以后的生产工序创造稳定的工况。假如工艺上还要求在无干扰的情况下，使液面保持在贮罐的中间高度，这样调节器就应选用具有PI作用的。现在要讨论的问题是，如何根据工艺的要求来整定调节器参数值，并且分析调节器参数整定值是怎样影响系统的稳定性的。图中还表示了罐压P_1、阀的前后压力P_2与P_3和输出管线的出口压力P_4。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com