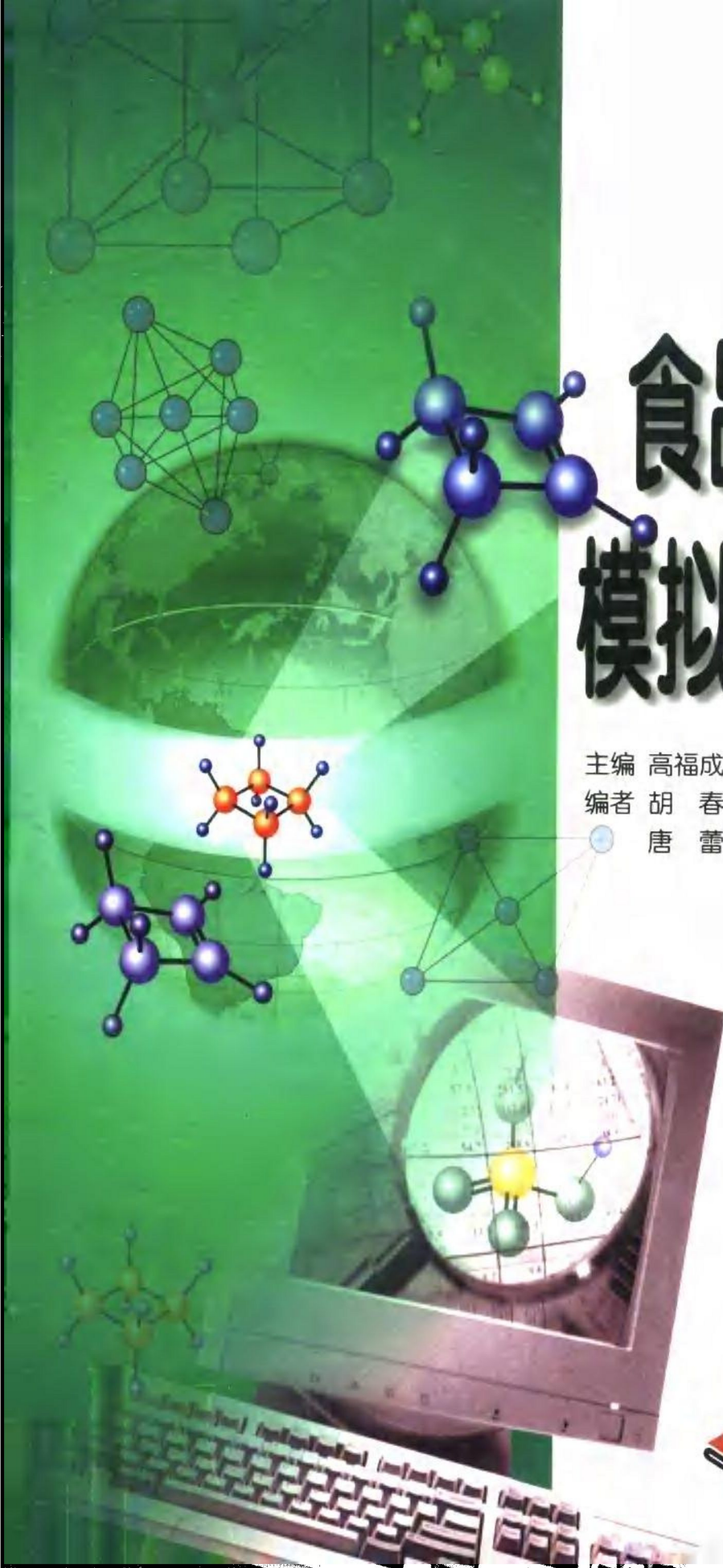


食品加工过程 模拟·优化·控制

主编 高福成 副主编 漆志文

编者 胡 春 华欲飞 刘志胜 许学勤

唐 蕾 张燕萍

 中国轻工业出版社

食品加工过程 模拟·优化·控制

主编 高福成 副主编 漆志文
编者 胡 春 华欲飞 刘志胜
许学勤 唐 蕾 张燕萍

ND20/33

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

食品加工过程模拟·优化·控制/高福成主编. - 北京: 中国轻工业出版社, 1999.6

ISBN 7-5019-2377-9

I. 食… II. 高… III. 食品加工-生产过程-概论 IV. TS205

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 03428 号

责任编辑: 熊慧珊 鲁莉蓉

责任终审: 滕炎福 封面设计: 赵朔

版式设计: 赵益东 责任校对: 方敏 责任监印: 胡兵

*

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印刷: 中国人民警官大学印刷厂

经销: 各地新华书店

版次: 1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 26.75

字数: 618 千字 印数: 1—2000

书号: ISBN 7-5019-2377-9/TS·1458 定价: 54.00 元

·如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换·

前 言

为了适应当前高等院校教学改革的需要,无锡轻工大学对原有食品专业教学计划进行了深入探讨,拟定食品专业四年制本科只设一个专业,即食品科学与工程专业。在合理利用计划学时,妥善设置食品专业必要课程和实践环节的前提下,拟定前期三年的教学进程达到该专业培养目标中最基本的业务要求,获得该专业所应具备的最基本的专业理论知识和工程师技能。这样,就有可能巧为设计四年中的最后一年,使教学计划更能适应市场经济的发展,更能符合教育和科学的同步现代化进展。

在最后的一年,对于那些兴趣偏向食品工程的本专业学生,为了充分发挥其个性,因材施教,因人制宜,充实必要的食品工程学知识和技能,实是势在必行。为此编写了一套教学参考书,以利跨学科学习相关食品技术,跟上时代的发展。此套教材包括《现代食品工程高新技术》、《食品分离重组工程技术》、《食品加工过程模拟·优化·控制》。本书即是其中最后一种。

对食品专业本科生,本书可作为选修课的参考教材或供自学参考;对研究生,则可作为正式设课的参考教材,也可作为选修课的参考教材。

本书共分2篇8章,按章节顺序,编写分工如下:

漆志文等	第1~4章
刘志胜	第5章
许学勤	第6章
张燕萍	第7章第1节
华欲飞	第7章第2节
胡 春	第7章第3节
唐 蕾	第8章

全书由高福成统稿、主编。

本书取材来自国内外有关专著和各类文献,部分来自我校科研成果。编撰这样的教科书在国内外尚不多见,不少内容无现成可借鉴的系统资料。初次尝试,整体构架的价值及系统性肯定远不尽人意,这只能先抛砖以引玉,让广大感兴趣的学者,献出引人入胜的佳作。对本书只能恳求批评指正。

编者

内 容 提 要

本书分基础和应用两篇。基础篇分4章,即数学模型建立、过程模拟、过程优化和过程控制。取材以较易懂的基础知识为主,力求与目前国内外设计和科研现状相适应,使内容简明扼要,便于读者掌握。应用篇也分4章,将食品加工过程从简到繁分成物理加工过程、复杂加工过程、酶反应过程和微生物反应过程,并分别举出若干食品工业最新科技成果中的模拟、优化、控制典型,作为应用范例,尽量做到基础理论与应用相结合,使专业读者学了之后,既有亲切之感,又找到入门之道。

本书的读者对象主要为大专院校食品工程专业的本科生和研究生、从事食品专业科研和设计的人员、从事食品生产的工程技术人员等。

目 录

第一篇 基础篇

第一章 数学模型的建立	(1)
第一节 食品加工过程的基本概念	(1)
一、食品加工过程系统	(1)
二、食品加工过程系统的性质	(1)
第二节 模型的概念和分类	(3)
一、模型的概念	(3)
二、模型的分类	(3)
三、模型的简化	(5)
第三节 模型的建立	(6)
一、建模步骤	(6)
二、模型建立后的数学形式	(7)
第四节 食品加工过程的自由度分析	(8)
一、自由度的基本概念	(8)
二、自由变量的选择	(10)
三、物流的自由度	(12)
四、单元设备的自由度	(12)
五、工艺流程的自由度	(18)
参考文献	(20)
第二章 过程的模拟	(21)
第一节 过程系统模型	(21)
一、过程系统模拟的基本概念	(21)
二、过程系统的结构模型	(21)
三、过程系统结构模型的过程矩阵 R_p 表达法	(22)
四、过程系统结构模型的关联矩阵 R_I 表达法	(23)
五、过程系统结构模型的邻接矩阵 R_A 表达法	(24)
六、系统结构模型与单元过程数学模型的结合	(25)
第二节 过程系统模型的序贯模块法求解	(26)
一、序贯模块法的基本思想及其特点	(26)
二、系统的分隔	(28)
三、子系统的切断	(38)

四、切断物流的计算方法——非线性方程组的迭代求解	(46)
五、序贯模块法解设计问题	(62)
第三节 过程系统模型的联立方程法求解	(65)
一、联立方程法的基本思想及其特点	(65)
二、方程组的分隔和切断	(67)
三、联立方程组的解法	(72)
第四节 过程系统模型的联立模块法求解	(89)
一、联立模块法的基本特点——多个流程模型	(90)
二、联立模块法对四种迭代的处理	(93)
三、二层法	(97)
第五节 流程模拟的计算机辅助技术	(100)
一、化工模拟系统的分类	(100)
二、物性数据库	(101)
三、流程模拟系统的构成	(106)
四、流程模拟系统的开发步骤	(108)
五、流程模拟系统的应用	(109)
参考文献	(110)
第三章 过程的优化	(111)
概述	(111)
第一节 有关过程优化的基本问题	(111)
一、优化问题的数学描述	(111)
二、最优化问题的类型	(113)
三、最优化问题求解的一般步骤和方法	(115)
第二节 无约束条件的最优化方法	(116)
一、无约束单变量函数最优化问题的求解法——一维搜索法	(116)
二、无约束多变量最优化问题的求解	(126)
第三节 有约束条件问题的最优化方法	(139)
一、非线性规划	(139)
二、线性规划	(150)
第四节 动态规划	(155)
一、多级串联系统最优化问题	(155)
二、食品加工过程复杂系统的优化基础	(159)
参考文献	(162)
第四章 过程的控制	(163)
第一节 自动控制系统及其组成	(163)
一、自动控制系统的基本概念	(163)
二、自动控制系统的组成	(167)
第二节 简单控制系统的设计和投运	(186)

一、简单控制系统的设计·····	(186)
二、简单控制系统的投运·····	(188)
三、调节器参数的工程整定·····	(190)
第三节 复杂控制系统·····	(192)
一、串级控制系统·····	(192)
二、均匀控制系统·····	(196)
三、比值控制系统·····	(199)
四、分程控制系统·····	(201)
五、前馈控制系统·····	(202)
第四节 典型单元操作的控制·····	(203)
一、流体输送设备的控制·····	(203)
二、传热设备的控制·····	(209)
三、锅炉设备的控制·····	(212)
四、精馏塔的控制·····	(217)
五、生化反应器的控制方案·····	(224)
第五节 计算机控制系统·····	(226)
一、计算机控制系统的特点·····	(226)
二、计算机控制系统的控制规律·····	(227)
三、计算机控制系统的组成·····	(228)
四、计算机控制系统的类型·····	(229)
参考文献·····	(232)

第二篇 应 用 篇

第五章 食品物理加工过程中模拟、优化、控制应用举例·····	(233)
概述·····	(233)
第一节 淀粉生产用微型旋流器分离过程的模拟、优化和控制·····	(233)
一、圆锥形微型旋液器性能预测模型及几何尺寸优化·····	(234)
二、圆柱形微型旋液器的模拟及优化·····	(241)
第二节 固液混装罐头食品热力杀菌过程的模拟和优化·····	(251)
一、原始模型的建立·····	(251)
二、试验材料及测试方法·····	(252)
三、试验结果与分析·····	(253)
四、特定固液混装罐头食品热力杀菌传热过程数学模型·····	(258)
五、固体冷点温度预测值误差的讨论·····	(260)
第三节 气流干燥数学模型·····	(264)
一、数学模型的建立·····	(264)
二、模型求解·····	(267)
三、试验验证·····	(269)

四、应用实例·····	(270)
本节符号说明·····	(271)
第四节 冷冻干燥过程的模拟、优化和控制·····	(272)
一、冷冻干燥的一般描述·····	(272)
二、单升华面冷冻干燥数学模型·····	(275)
本节符号说明·····	(281)
参考文献·····	(282)
第六章 食品复杂加工过程中模拟、优化、控制应用举例	
——食品蒸煮挤压过程·····	(284)
概述·····	(284)
第一节 挤压机及其建模方法与类型·····	(284)
一、单螺杆挤压机·····	(285)
二、双螺杆挤压机·····	(287)
三、挤压机的建模·····	(290)
第二节 单螺杆挤压机淀粉糊化模拟·····	(294)
一、淀粉糊化模型的建立·····	(295)
二、模型的求解·····	(298)
三、结果与讨论·····	(301)
第三节 双螺杆挤压机物料传输模拟·····	(305)
一、建模原理与假设·····	(305)
二、传送区段的模型·····	(305)
三、熔化泵送区模型·····	(307)
四、捏和桨和反向螺旋元件区段的模型·····	(309)
五、模孔处的模型·····	(309)
六、滞留时间与能量·····	(310)
七、理论结果与实验数据的比较·····	(311)
第四节 同向双螺杆食品挤压机中的传热模型·····	(314)
一、双螺杆挤压机中的传热·····	(314)
二、边界层理论·····	(314)
三、Yacu 挤压机传热模型·····	(315)
四、LU 模型·····	(317)
五、粘性模型·····	(319)
六、传热模型实验·····	(319)
第五节 食品挤压机的放大·····	(321)
一、用于热塑性材料的单螺杆挤压机的放大·····	(322)
二、双螺杆挤压机的放大·····	(324)
三、模孔的放大·····	(325)
四、食品挤压过程的放大·····	(325)

五、放大实验	(326)
参考文献	(327)
第七章 食品酶反应过程模拟、优化、控制应用实例	(328)
第一节 碳水化合物酶解化学机制和动力学模型	(328)
一、淀粉的酶法水解	(328)
二、麦芽糖、异麦芽糖和麦芽三糖的糖化酶法水解和合成动力学模型	(337)
三、纤维素的酶法水解—纤维素与纤维素酶的吸附作用及微晶纤维素酶的水解动力学模型的新研究	(339)
第二节 蛋白酶水解过程的模拟	(342)
一、蛋白酶水解基本概念	(342)
二、有关食品蛋白酶水解的测定方法和实验方法	(345)
三、蛋白酶水解的控制以及各种酶-底物体系的特征	(347)
四、蛋白酶水解动力学	(354)
五、蛋白质水解过程的控制	(356)
六、酶法制取 ISSPH 工艺的优化	(367)
第三节 超氧化物歧化酶及其活性的模拟	(372)
一、自由基的基本知识	(372)
二、氧自由基的生理作用及其调控	(376)
三、超氧阴离子歧化酶	(382)
四、SOD 活性的人工模拟	(386)
参考文献	(393)
第八章 食品微生物反应过程模拟、优化、控制应用实例	(395)
第一节 微生物反应过程操作	(395)
一、分批培养	(396)
二、流加培养	(397)
三、连续培养	(398)
第二节 微生物反应过程的质量、能量平衡	(399)
一、微生物反应过程的质量衡算	(399)
二、微生物反应过程的能量衡算	(402)
第三节 微生物反应过程的优化控制	(403)
一、微生物反应过程参数及其监控	(403)
二、微生物反应过程的数学模型	(406)
三、计算机技术在微生物反应过程中的应用	(407)
第四节 微生物反应过程优化控制的应用实例	(410)
一、氨基酸的代谢控制	(410)
二、有机废水的生物处理	(414)
参考文献	(416)

第一篇 基础篇

第一章 数学模型的建立

为了实现对一个食品加工过程的模拟和操作、设计、控制的最优化,首先必须用定量的方式即用数学式来表达系统的构造以及系统中各单元的输入和输出间的关系,即建立过程的数学模型(下称模型)。

本章主要讲述模型建立的有关问题,包括自由度分析及设计变量的选择等。

第一节 食品加工过程的基本概念

一、食品加工过程系统

食品加工过程是将食品原料及半成品进行一系列化学和物理的处理,生产出预期的产品,并获得附加值的过程。

系统是由相互联系、相互作用的若干组成部分结合而成的具有特定功能的总机体。按一定目的组织起来的食品单元过程所构成的食品生产过程整体称为食品加工过程系统。

一个食品厂包括有好几套生产装置,投进一种或几种原料,生产出多种产品,各套装置之间有物料和能量的联系,这整个食品厂就构成了一个系统;一套食品加工设备,用一定的原料生产出一定的产品,构成这套装置的所有设备也组成了一个食品加工系统。

二、食品加工过程系统的性质

食品加工过程系统是由物流、能流和信息流组合叠加而成的。它具有三方面性质。

(一) 阶层性和相对性

食品加工过程系统是一个多阶层的综合系统,如图 1-1 所示。图中最高阶层是联合企业,它拥有若干个食品厂作为子系统,它接受一次原料,通过一系列子系统生产出多种产品。同时,联合企业拥有若干辅助设备,以协调和服务于各子系统,如公用工程(水、电、汽)设备、运输队、仓库等。各个食品厂之间有物流和能量流的关系,一个工厂的产品可以是另一个工厂的原料。生产装置则是由分离器、换热器、泵、风机、干燥器等单元设备作为其子系统。单元又可分为若干部件,但通常以单元设备作为基本

单元。以后所述系统中均是以单元设备为基础的。

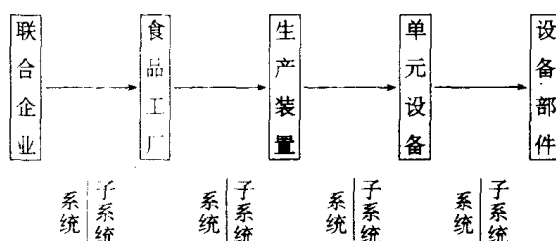


图 1-1 食品加工过程系统的阶层

系统与子系统是相对的，某一系统对较高层的系统而言是其子系统，即是下级，但对较低层的系统而言，则是这些子系统的上级。

(二) 复杂性

食品加工过程系统是一个庞大而又复杂的系统。主要表现为：系统的变量数很多，描述这些变量之间关系的方程组庞大；变量之间相互交联强，且大多为非线性关系。为了更好地了解过程的复杂性，可以分析一下基本单元的特性及各单元间连接关系（即系统结构）的特性。

1. 基本单元特性

不同食品厂所组成的系统，其组成的单元为换热器、混合器、精馏塔、吸附柱、浸出器，有的还有反应器。在这些基本单元中进行着热量、质量或动量的传递及化学反应过程。这些过程有可能同时发生，相互关联。描述这些过程的数学模型大多是非线性的，涉及的变量数很多。

2. 过程系统结构特性

系统结构是指组成系统的子系统间的连接方式，它和基本单元的特性一起决定了整个系统的特性。任何系统，其结构必为以下五种结构形式中的一种或几种组合而成，见图 1-2。

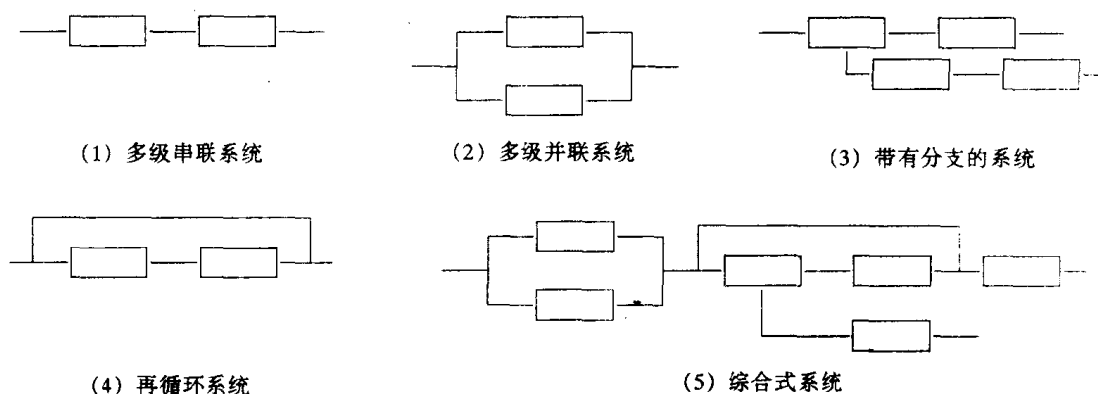


图 1-2 过程系统的结构

很多复杂的过程系统，为了充分利用副产品，便成为多系列的具有分支的结构；又为了充分利用原料及溶剂，系统中便含有再循环回路；另外，为了充分利用热能，整个系统各部分便组成了一个统一的热能回收网络，通过该网络，系统各部分被紧密地联系

起来，充分地体现了综合性的特点。

过程系统的复杂性还在于系统具有许多不确定因素，例如，原料组成的变化、换热器中传热系数的变化及冷却水进口温度的变化等等。这些不确定的因素对系统的设计、操作管理等均有很大影响。

(三) 整体性

食品加工过程系统虽然复杂，但是它是由许多子系统有机地构成的，是一个整体，它把预定的任务分配给各子系统来完成。子系统必须在系统的约束条件下进行自身优化，称为局部优化。而整个系统的优化称为整体优化。整体最优时，其子系统必定最优，但子系统的局部最优的简单叠加不一定整体最优。

第二节 模型的概念和分类

一、模型的概念

用来描述系统或单元的数学表达式称为模型。

模型是一个系统或单元的近似表示。它本质上是一组数学方程，可以是一组代数方程，也可以是一组微分方程或积分、差分方程，通过其各变量间的相互关系，可以在一定程度上表示系统或单元的特征。

系统模型是对整个过程系统的数学描述，比如一整套食品加工过程装置。

子系统模型是系统中各组成部分的数学描述。所谓组成部分，可以是一个车间、一个工段或一个单元操作设备乃至某个单元设备中的局部构造。

数学描述是将系统或者系统中有关的各部分变量（设计变量、操作变量、设备参数等）、系统或子系统的输入与输出之间的关系，用数学形式表达出来。因此，数学模型是由描述过程的数学方程组及其限制条件组成的，其构成表示为图 1-3。

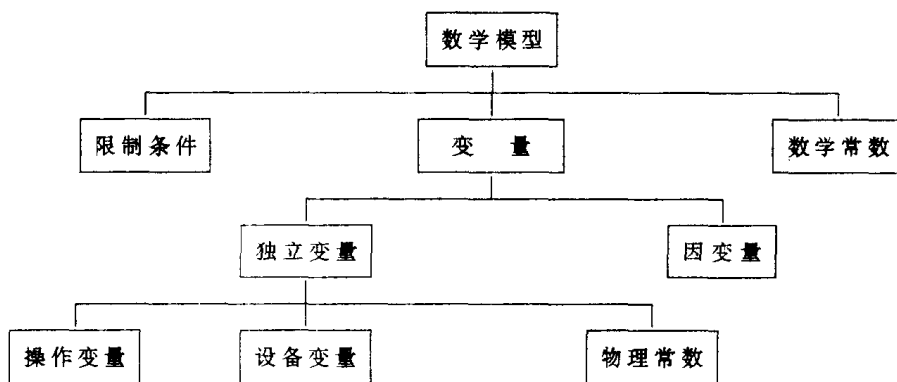


图 1-3 数学模型的构成

求取数学模型中变量值的过程称为模型识别或模型化。

二、模型的分类

模型的分类有不同的标准，常用的分类有以下四种：

(一) 机理模型、经验模型和混合模型

1. 机理模型

从过程机理出发，经推导得到，并经实验验证而建立起来的描述过程的方程组的数学模型称为机理模型。这种数学方程组有明确的物理意义，是实际过程本质的反映，具有较大范围的适用性，因而其结果可以外推。

2. 经验模型

由小试实验数据、中型或大型工业装置实测数据，通过数据回归分析而得到的过程各参变量之间的函数关系式，称为经验模型。比如流体输送中所描述的 Nu 数与 Re 、 Pr 数之间关系方程：

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \quad (1-1)$$

它描述了在湍流状态下传热过程各参数间的数学关系。

经验模型与过程的机理无关，它是根据实验中输入与输出各变量之间的关系，通过分析方法整理而得到的。式 (1-1) 即是通过因次分析，由实验数据关联得到的。由于实验条件的限制，经验模型的局限性很大，因为它只在实验范围内有效。

3. 混合模型

对实际过程进行抽象概括和合理简化，然后对简化的物理模型加以数学描述而得到的数学关系式称为混合模型。

混合模型是为了克服机理模型和经验模型的局限性而提出的。机理模型虽然对过程进行直接描述，但由于过程方程复杂，且边界条件众多，要准确地描述一个过程，其方程组的求解很难进行。这种困难，使机理模型在实际的过程处理中，用处极为有限。经验模型视过程为“黑箱子”。经验公式没有什么物理意义，而且众多参变量之间的取舍都取决于个人对过程的理解，难免有失真的情况。在实际中，纯粹的经验模型也不多，它只是针对简单过程而提出的。

目前，在过程的数学模拟中，混合模型是应用得最广、也是最有实用价值的模型。混合模型的建立是对过程的简化，避免使用过于复杂的数学求解过程。模型的主要特征是对客观过程的物理实质进行抽象、概括和合理的简化。模型简化的目的是使建立的模型能够用现有的数学工具进行求解，或者说能比较简便地求解。然而，这种简化是建立在对客观过程确切理解的基础上，先对物理过程本身进行合理的抽象、概括，再建立简化的物理模型。可见，混合模型方法的本质是首先进行物理上的简化，然后对这种简化加以数学描述。

(二) 稳态模型与动态模型

按时态本质划分可分为稳态模型与动态模型。

1. 稳态模型

过程对象的参数不随时间的变化而变化。这种模型目前应用较广，比较符合过程稳态操作的特点，从数学上讲只涉及到代数方程组。本书所介绍的大部分过程均属于此类型。

2. 动态模型

考虑过程对象的参数随时间的变化的关系，主要用到微分方程组。如间歇操作过

程，开、停车过程及有扰动操作过程。

(三) 集中参数模型和分布参数模型

1. 集中参数模型

当过程参数在整个系统中是均一时，称为集中参数。这样建立的模型中，各参数数值与空间位置无关。数学上表现为代数方程组或常微分方程组。如搅拌釜中，由于搅拌作用，釜内各点的温度、浓度、压力及组成可视为均一。

2. 分布参数模型

过程参数在整个系统中变化，为空间位置的函数时，称为分布函数。数学上表现为偏微分方程式。如一个吸收塔沿塔高变化，各点浓度也发生变化。

(四) 确定模型和随机模型

1. 确定模型

每个参变量均对任意一组给定的条件取一个确定的值或一系列确定值时，称为确定模型。

2. 随机模型

用来描述一些不确定性的随机过程，过程输入与输出关系的参变量取值无法准确确定的模型，称为随机模型。这时过程服从统计概率规律。

三、模型的简化

前已述及，数学模型的特征是力求用简化的数学表达式来模拟实际过程的变量关系。其近似程度的关键是简化的合理性。而合理性是相对的，同一过程，可以根据不同的简化程度建立从简到繁一系列的数学模型，以适应不同的需要。也可对过程的不同侧面进行简化，建立具有不同特性的数学模型。简化应遵循以下四条原则。

(1) 简化但不失真 一个模型基本反映过程实质是最重要的。造成失真的原因主要是对过程的实质理解得不确切。模型本质上必须真实，或在某一条件下符合事实。恰当的简化可以认为它既可使复杂的过程简化，又反映了过程基本的数量关系。一般来讲，模型不可能在很大范围内具有普遍性，只要求在有限的意义和目的下与实际过程等效。

(2) 简化但能满足应用要求 模型经过简化，精确度受到影响，要求怎样的精确度，由模型的应用目的决定。

(3) 简化使之能用实验来检验和估计参数 一般来讲，简化后的模型，要通过实验来检验其可靠性并估计其参数值。有时由于实际情况的限制，实验条件和测量技术都跟不上要求，要建立较精细的模型，往往难以实现，因为既无法知道其可靠性，又无法确定模型参数的值。

(4) 简化使之能适应计算机计算能力 过程模拟是通过计算机进行的，建立模型时，要兼顾到计算精度的要求和计算机的能力，要考虑到计算机的速度和容量。

可见，在满足应用的前提下，要力求使模型简单。精细的模型可能更精确地反映了过程，但它复杂，同时实验条件难以满足其参数确定的要求。在实际应用中，应将模型化作为一种方法，自觉地、普遍地加以运用。

第三节 模型的建立

模型的建立可分为模型识别和参数估计两个方面。

模型识别是指模型方程形式的确定，特别是当有多种形式可供选择的时候，还要从中选择出最能反映实质的一种来。建立经验模型，靠回归实验数据来完成；建立混合模型，模型识别主要靠运用物料衡算、热量衡算的基本关系及“三传一反”的基本规律，对有关理论进行理论分析，来找出能表达该过程特征的关系。

对混合模型来说，往往由于对有关过程的机理尚未完全理解，最初只能提出多种属可能的合理假设，并推导出各种模型，从中识别出最好的一种来。通常也要依靠实验数据的帮助，才能作出合理的抉择。凡是借助于实验数据时均要十分注意实验范围的外推问题。

一、建模步骤

建模步骤一般如图 1-4 所示。下面按步骤介绍。

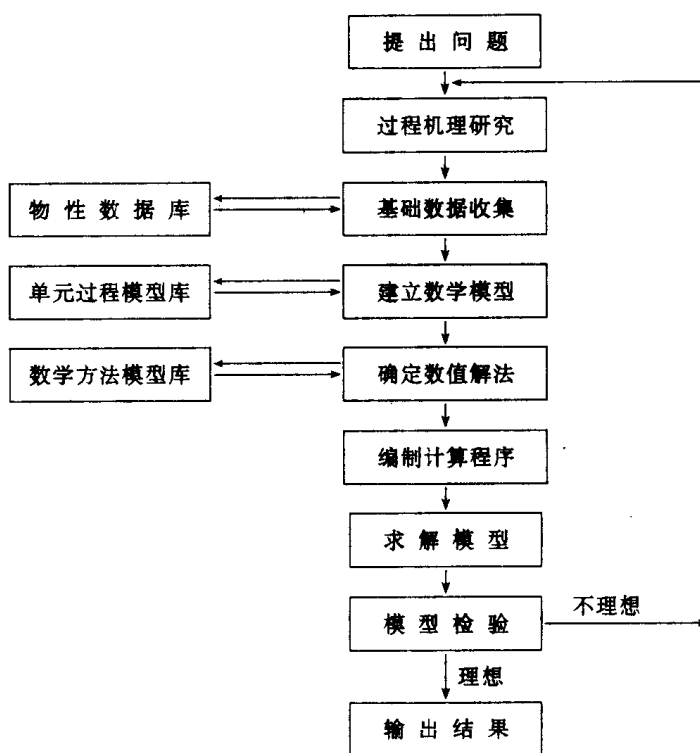


图 1-4 建立数学模型的一般步骤

(一) 提出问题

提出问题要抓住主要矛盾，抓得正确、恰当，这是最有决定意义的一步。

(二) 概括和简化过程实质

基于对过程的确切理解，对过程物理实质进行概括和合理简化，得到物理模型，这一步决定模型的质量。

(三) 收集和整理基础数据

基础数据包括物性数据、该单元操作的过程数据及成本核算数据。有的数据可直接来源于资料，有的则要根据数据的求算方法编程供计算时用。

(四) 建立数学模型

要善于忽略次要影响，尽量减少变量和方程式数目，用一组简化的数学方程及其边界条件来描述主要参变量之间的关系。对于一个过程，也许可找到不少已建好的模型。为判断哪一种更合适，有个“模型识别”的问题。

(五) 选择合适的模型解法

对一般的解法，大多可以从数学方法程序库中找到。特殊过程则编写合适程序求解。

(六) 求解模型并进行检验

由于真实过程的复杂性和数学方法的限制，开始开发的数学模型往往是很不理想的。所作的简化是否已足够准确地反映了过程的有关特性，可依据判别，如不理想，加以修正，直到得到理想的模型。

模型参数个别可由机理导得，大部分需通过实验确定。实验确定分两类：一类可用现有实验技术独立确定，另一类难以或不能独立确定，要通过模型的总结果与实验数据相比较反推得到。如果一个模型的参数太多，则模型的合理性将无法鉴别，其确定工作将难以进行，因为此时它与经验模型没有区别，而实验数据可适应任何模型。因此，建模时参数应尽量减少，特别是不能独立测定的参数。

二、模型建立后的数学形式

将一个实际过程抽象到数学的意义，最后的实际过程系统就只剩下自变量（如时间坐标 t 、空间坐标 x 、 y 、 z ）、因变量及它们的关系。典型的模型可见表 1-1。

表 1-1 过程的数学模型与数学表达式关系

模 型	典型数学表达式	参数类型	状态与变量
代数方程	$X = f(u, K)$	集中参数	无自变量
差分方程	$X(t_{K+1}) = f[X(t_K), u(t_K), t_K, K]$	集中参数	状态及变量均离散
差分微分方程	$X(t) = f[X(t), \dot{X}(s), t, K]$ 其中 s 为一组小于 t 的值	集中参数	状态离散变量连续
常微分方程	$\dot{X}(t) = f[X(t), u(t), t]$	集中参数, 分布参数	状态、变量均连续
偏微分方程	$\frac{\partial X(t, s)}{\partial t} = f(X, t, s, \frac{\partial X}{\partial s}, \frac{\partial^2 X}{\partial s^2})$	分布参数	状态、变量均连续
积分-微分方程	$X = f[t, \dot{X}(t), \int_a^t K(t, s) X(s) ds, u(t), K]$	分布参数	
积分方程	$X = f[X(t), \int_0^t K(t, s) X(s) ds, u(t), K]$	集中参数非定态 分布参数	

从表 1-1 中可以看到，最简单的模型是代数方程式，没有导数，不考虑任何空间中