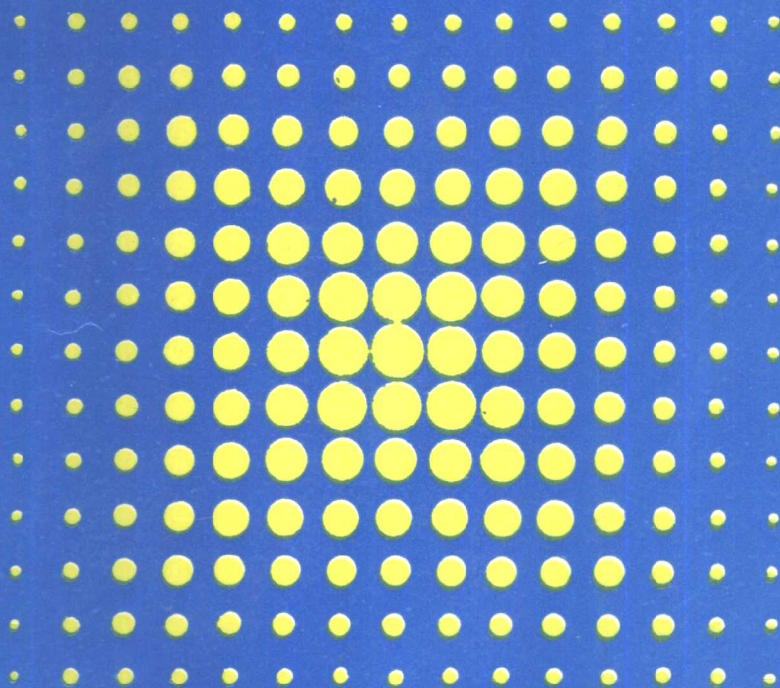


过程计算机控制丛书

过程仿真

何衍庆 编著



中国石化出版社

过程计算机控制丛书

过 程 仿 真

何衍庆 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了计算机对各类控制系统的数字仿真问题及相应的控制策略、控制算法和仿真程序。

全书共分七章,包括连续系统、离散系统、采样系统、非线性系统的数字仿真及频域分析、最优控制和离散事件系统数字仿真等内容,通用性和实用性较强。

本书可供从事工业自动控制工程研究的科研人员、工程技术人员阅读,也可作为工业自动控制专业学生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

过程仿真/何衍庆编著. —北京:中国石化出版社,1996(过程计算机控制丛书)
ISBN 7-80043-596-2

I. 过… II. 何… III. 过程控制-计算机仿真-数字仿真 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 15430 号

中国石化出版社出版发行

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码:100029)

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

787×1092毫米 16开本 18¹/₂印张 473千字 印1-3000

1996年4月北京第1版 1996年4月北京第1次印刷

定价:23.00元

序

随着科学技术的发展,计算机在控制领域的应用越来越广泛。DCS(集散控制装置)、数字调节器、可编程控制器(PLC)等在工业自动化中的应用已迅速发展。与之同时,计算机在控制系统设计、研究与教学训练中的应用也日趋普遍。对这三类应用来说,计算机仿真是一门关键技术。

与实物模型实验相比,系统仿真有着许多明显的优点。例如,对象与控制器的结构和参数可以方便地自由变更,时间标尺可以自由选择,工作点的变化范围可以自由调整,用一台计算机可以对不同类型的物理系统进行仿真等。当然,实物模型实验也仍有其必要性,特别是内在机理不清晰、行为和特性不清楚的对象,是难以进行仿真的。

由于仿真手段的高度灵活性与通用性,现代的设计、研究与教学训练中几乎没有不采用仿真技术的。大家可能回忆起,30年前是用模拟电路来构成仿真系统的,随着数字计算机的出现,模拟与数字混合型系统被认为是更好的方式,到了今天,绝大多数已被数字计算机仿真所代替。数字计算机仿真的最大特色是系统的不同结构、不同特性与不同参数都是通过软件来设置的,不需要改变具体的线路联接,因此,具有更大的灵活性与通用性。

一本介绍数字仿真技术的书的重心应该放在什么地方,这随书的目的而异。本书讨论的是各类控制系统的仿真,因此将控制系统的算法与分析的仿真作为重点,对各类控制系统、各种控制策略、各种分析方法作了比较系统和深入的介绍。因此,本书除了使读者熟悉相应的仿真方法以外,也使读者对现在常用的一些算法和分析方法有更多的了解。本书已注意和吸收了一些新的控制算法和策略。

近年以来,在计算机人机交互方面已有了很多改进。人们希望在仿真时操作更方便,显示更生动清晰,因此常常采用菜单、提示和各种窗口技术,在数据库和管理程序等方面也有许多讲究。这些技术具有一般性,不仅可用于仿真,也可用于其他方面。本书因篇幅限制,对这些很少涉及。好在今天这些方面的专门书籍已有不少,专用软件也很多。

本书的另一个特点是精选了相当数量的例题,精选了相当数量的程序,以便于读者的理解与应用。为使广大读者都能掌握与了解,这些程序采用BASIC语言编程。当然,按照不同的用途,采用C语言或其他高级语言也可能是合适的选择。

本书作者何衍庆副教授是一位基础深厚、工作细致、勤于事业的中年教师,他在理论分析、实验与仿真等方面都有很好的素养,对DCS的软件也很熟悉。为了写好这本书,他花费了大量的精力。他的这些优点,读者在本书的字里行间是不难觉察的。

为促进先进控制在过程控制领域的发展,我们组织了一套丛书,本书是其中之一。希望本书的出版有利于先进控制系统和策略的普及和推广。同时,也恳切希望读者对本书提出批评与建议。

蒋慰孙

1993年夏写于华东理工大学自动化所

ABD02/10 02

前 言

本书是计算机应用丛书之一。重点介绍各类控制系统的数字仿真,对相应的控制策略和分析方法也作了一定的介绍和分析。

本书共分七章。第一章概述。第二章和第三章是连续系统的数字仿真,介绍了用离散化求解连续系统数值解的各种方法,第三章介绍了非线性系统的数字仿真。第四章是采样控制系统的数字仿真,介绍 z 域设计法和含纯滞后的采样控制系统的各种补偿控制方案。第五章是系统的频域分析,主要介绍衰减频率特性的分析方法和多变量逆奈奎斯特阵列法。第六章是最优控制系统的数字仿真,它是控制系统数字仿真和优化算法的结合,因此,该章主要介绍了各种优化算法。第七章是离散事件系统的数字仿真,介绍了随机数的产生和变换,以及离散事件系统的数字仿真。

本书的通用性和实用性较强。针对工业生产过程普遍存在的纯滞后过程,本书作了较为详细的分析和讨论。书中还附有大量的数字仿真程序、算法和实例,介绍了它们的使用方法和改进的措施。所附程序全部用 BASIC 语言编制,因为这种语言是初学者的计算机编程语言,初学者可以比较容易从中了解程序的设计思想。因此像窗口技术、菜单技术、绘图技术等较先进的计算机显示技术都较少涉及。有兴趣的读者可根据程序的设计思想和有关计算机技术结合自行编制。本书既可作为从事工业自动控制工程研究的科研人员、工程技术人员的技术参考书,也可作为工业自动控制专业学生的教材参考书。

蒋慰孙教授、俞金寿教授十分关心本书的编写工作,提出了不少宝贵的意见和建议。蒋慰孙教授还在百忙中抽时间仔细地审阅了全书文稿,详细地提出了修改意见。本书的编写和出版工作还得到了范秀兰、华向明、钱锋、钱幸生、陈杰、陈积玉、张美琴、严镇邦、胡长顺等同志的大力帮助和支持。谨在此一并表示衷心的感谢和深切的谢意。

由于时间和编著者水平有限,错漏在所难免,恳请读者不吝指正。

编著者

1993 年 6 月于华东理工大学

目 录

1 概述	1	2.3 数字仿真程序	29
1.1 数字仿真的基本概念	1	2.3.1 数字仿真程序的基本结构	29
1.1.1 模型的分类及建模	1	2.3.2 数值积分算法子程序	30
1.1.2 仿真的分类及仿真的基本方法	2	2.3.3 输入子程序	33
1.1.3 数字仿真的基本特征	3	2.3.4 微分方程组子程序	35
1.2 数字仿真的基本原理	4	2.3.5 主程序及输出子程序段	36
1.2.1 相似性原理	4	2.3.6 纯滞后子程序	37
1.2.2 控制理论	5	2.3.7 数值仿真程序举例	38
1.3 计算机仿真的应用实例	5	2.4 CSS 数值仿真程序包	51
1.3.1 精馏塔精馏过程仿真	5	2.4.1 CSS 程序包的基本功能	52
1.3.2 人口增长过程仿真	6	2.4.2 CSS 程序包清单及变量、数组说明	54
1.3.3 北京地铁仿真模型及仿真结果	6	2.4.3 CSS 仿真程序包的应用	70
1.4 仿真软件	7	3 基于离散化模型的连续系统数字仿真	76
1.4.1 仿真软件	7	3.1 连续系统的离散化模型	76
1.4.2 仿真语言的性能评价	7	3.1.1 采样定理	76
1.4.3 典型数字仿真语言	7	3.1.2 离散化模型	78
2 基于微分方程求解的连续系统数字仿真	9	3.2 离散化模型的特性分析	78
2.1 连续系统的数学模型	9	3.2.1 稳定性	78
2.1.1 数学模型的建立	9	3.2.2 保持器	79
2.1.2 数学模型的类型	11	3.3 离散化的方法	82
2.1.3 数学模型的转换	12	3.3.1 z 变换法	82
2.1.4 数学模型的合成	16	3.3.2 替换法	86
2.1.5 纯滞后系统的数学模型	18	3.3.3 根匹配法	87
2.2 数值积分算法	19	3.3.4 微分映射法	91
2.2.1 数值积分算法的基本思想	19	3.3.5 状态变量法	92
2.2.2 数值积分算法的一些基本概念	21	3.3.6 增广矩阵法	96
2.2.3 数值积分算法	22	3.4 非线性系统的数字仿真	99
2.2.4 算法的计算稳定性	27	3.4.1 非线性环节的类型	99
		3.4.2 典型非线性环节的数字仿真子程序	100
		3.5 离散化模型的数字仿真程序	102

3.5.1 离散化模型的合成	102	5.1.1 典型开环传递函数及其频率特性	162
3.5.2 双线性变换仿真程序	103	5.1.2 频率特性的分析方法	164
3.5.3 非线性系统数字仿真程序	107	5.1.3 控制器参数整定	166
4 采样控制系统的数字仿真	121	5.2 衰减频率特性	167
4.1 采样控制系统	121	5.2.1 衰减频率特性	167
4.1.1 概述	121	5.2.2 衰减比判据	168
4.1.2 改进 z 变换	122	5.2.3 用衰减频率特性整定控制器参数	169
4.1.3 数字控制器的描述	124	5.2.4 衰减频率特性仿真程序	173
4.2 采样控制系统的 z 域设计法	127	5.3 劳斯判据确定系统稳定性	178
4.2.1 差拍控制算法	127	5.3.1 劳斯稳定判据	178
4.2.2 大林控制算法	132	5.3.2 劳斯判据确定系统相对稳定性	179
4.2.3 卡尔曼控制算法	134	5.3.3 仿真程序	180
4.2.4 V.E. 控制算法	136	5.4 多变量频域的逆奈氏阵列法	187
4.3 含有纯滞后的采样控制系统	138	5.4.1 基本概念	187
4.3.1 史密斯预估补偿器	138	5.4.2 多变量闭环系统的稳定性	189
4.3.2 观测补偿器	141	5.4.3 补偿器的设计	191
4.3.3 解析预估补偿器	144	6 最优控制系统的数字仿真	197
4.4 采样周期	146	6.1 概述	197
4.4.1 不同采样周期对模型参数的影响	146	6.1.1 目标函数和约束条件	197
4.4.2 不同采样周期时系统稳定性分析	148	6.1.2 最优控制系统的数学描述	198
4.4.3 采样周期的选择	151	6.1.3 目标函数取极值的充要条件	199
4.5 采样控制系统数字仿真程序	152	6.2 静态最优化方法	200
4.5.1 一阶滞后环节的数字仿真程序	152	6.2.1 线性规划方法	200
4.5.2 二阶滞后环节的数字仿真程序	156	6.2.2 爬山法	207
4.5.3 史密斯预估补偿控制数字仿真程序	156	6.2.3 优选法	213
5 连续系统频域分析法的数字仿真	162	6.2.4 单纯形加速法	214
5.1 频率特性	162	6.2.5 拉格朗日乘子法	224
		6.2.6 静态优化的实例	231
		6.3 动态最优化方法	234
		6.3.1 变分法	234
		6.3.2 极大值原理	239

6.3.3 动态规划法	255	7.3 离散事件系统的数字仿真	274
7 离散事件系统的数字仿真	258	7.3.1 离散事件系统的数学模型	274
7.1 基本概念	258	7.3.2 离散事件系统的仿真策略和结构模型	277
7.1.1 随机变量	258	7.3.3 离散事件系统仿真结果分析	285
7.1.2 随机过程	260	7.3.4 方差减小技术	287
7.2 随机数的产生和变换	261	7.3.5 通用离散事件系统仿真语言	288
7.2.1 伪随机数的产生	261	参考文献	289
7.2.2 随机变量的产生	262		
7.2.3 多维随机变量的产生	268		
7.2.4 随机过程的产生	269		
7.2.5 数字仿真子程序	271		

1 概 述

1.1 数字仿真的基本概念

1.1.1 模型的分类及建模

数字仿真可广义地理解为对真实客体的形态、工作规律或信息传递规律在特定条件下用数学的形式进行描述的相似性复现。通过模型的运行来实现对实体的数字仿真是借助于数字计算机实现的。

模型是把所研究的实体作为一系列相互关联的部分所构成，各部分在整体结构中发挥一定的作用，用数学的方法来对实体进行相似性的复现。因此，建模是进行数字仿真的前提，而通过数字仿真又可以检验模型、修正模型，使之能比较真实地反映实体的特征。

从哲学的观点来分，模型可分为两大类。第一类是物质模型，它们是不以人们的意志为转移的客观存在的实体。几何模型是再现实体原型的空间形式的物质模型。例如三角形就是表示具有一定属性的几何模型。物理模型除了要求与原型空间相似外，还要求它们的物理特性相似。精馏塔、反应器及其他设备的模型都属于物理模型。数学模型则是从一定的功能或结构上进行相似，用数学的方法来再现原型的功能或结构特征。可以把真实系统看作是产生一定性状数据的一个源。而数学模型则是一些规则、指令的集合，它产生与真空系统相同的性状数据。例如，一个控制系统可以用状态方程描述的数学模型来分析。

第二类是观念模型，它是客观存在的非物质因素为原型所建立的模型。仿生学的研究使人们从鸟的翅膀形成对飞机制造的肖像模型、数理逻辑中应用的命题表达、命题演算等用符号或逻辑关系描述思维过程的符号模型及化学理论中用原子价、化学符号等符号元素描述分子结构特征的混合模型等都属于观念模型。

也可以从不同角度对模型进行分类。

按模型中时间集的取值，可分为连续时间模型——其时间集取全体实数集或实轴上的区间；离散时间模型——其时间集取固定时间整数倍的序列。按模型中描述变量之间的函数关系是否依赖于时间，可分为时不变模型——即函数关系中只包含描述变量，不包含时间变量；时变模型——函数关系中，还把时间作为自变量。

根据模型中描述变量的轨迹（在一定时间内的值的变化），可分为连续模型——它的状态变化是连续的，状态的变化率满足一定的微分方程；离散事件模型——它的时间变化虽然是连续的，但状态变化表现为在各个离散时刻的跳跃，即状态变化以事件形式出现在各个离散的、可取任意值的时刻。当模型中的描述变量不包含随机变量时，称为确定性模型；包含随机变量时，称为随机模型。

考虑外界对实际系统是否有影响，模型可分为自治模型——不考虑输入变量，即外界影响；非自治模型——包含输入变量，考虑外界对系统的影响。输入和输出变量均不包含的模型称为封闭模型；反之，包含输入或输出变量，或二者均包含的模型，称为开放模型。

建立模型应遵循下列原则：

①**精确性** 精确性是模型与真实客体的相似程度的标志, 根据所研究问题的目的、内容的不同对模型的精确度有不同的要求。建模的方法、测试数据的精确度、模型的结构都对模型的精确度造成影响。因此, 应从工程实际要求出发, 确定合适的模型精确度。

②**合理性** 模型是对被研究实体在特定条件下的相似性复现。因此, 在模型建立前, 合理地提出模型适用条件是十分必要的。例如, 建立换热器的模型时, 若被加热物料和加热物料都是均匀搅拌的, 那么, 建立的模型就是集中参数模型。若随着物料的移动, 物料温度随着距离而变化, 则建立的模型是分布参数模型。

③**复杂性** 在所需模型精确度的前提下, 应对模型进行合理的简化。降低模型的阶数和简化模型结构是降低模型复杂程度的常用方法。为了研究的需要, 对被研究的实际系统进行分解是必要的, 但不应认为分得越细越好。相反, 在一些场合, 通过必要的简化, 不仅可以使程序简单, 而且也节省了大量的仿真时间。

④**应用性** 建立模型的目的是通过对模型的仿真, 应用于实际系统的分析和研究。因此, 对模型中描述变量的选择应该从实际应用出发, 遵循输入变量可测性准则。

⑤**鲁棒性** 模型的适应性不仅与模型的精确性有关, 而且还与模型的结构、参数等有关。一个鲁棒性好的模型不仅在所假设的工况条件下是适用的, 而且当工况条件在假设条件以外的一定范围内也是适用的。这对于仿真结果的外推十分必要。

模型的建立有各种方法。常用的方法是机理模型、回归模型或两者的结合方法。

机理模型的建立是通过对系统的机理分析、演绎而获得的。回归模型的建立是通过系统输入输出数据的分析、回归而得到的。通过机理分析及实测数据的回归确定机理模型中的参数, 这种方法是混合建模的方法。

1.1.2 仿真的分类及仿真的基本方法

根据模型的不同, 仿真的方法也不同。

几何模型是以几何相似为其出发点的, 几何仿真的研究实际上是几何学研究的课题。例如, 通过三角形的几何模型, 可以获得三边中线交于一点, 此点是三角形的重心的结论。

物理模型以物理系统为模型。通过对该物理模型的仿真可以获得与该物理系统有相似物理特性的系统的仿真结果。风洞试验就是对飞机的空气动力学特性的物理仿真。通过对用运算放大器组成的一阶惯性环节的物理仿真来研究液位贮槽中进料量与液位的关系则是应用了物理特性的相似性进行仿真的例子。

数字仿真是对系统的数学模型进行研究, 模拟实际系统中变量的变化, 获取系统输出变量特性的仿真方法。对于简单的数学模型, 通过解析的方法可以直接进行研究, 但对复杂的系统, 通常是通过计算机对数学模型进行研究和试验的。因此, 计算机数字仿真常简称为数字仿真。

在有些系统的研究中, 把计算机和实际的一些物理系统相联接, 把数字仿真和物理仿真结合起来, 这种仿真称为混合仿真, 或称数学——物理仿真。

根据被仿真系统的不同, 仿真的类型可以分为连续系统仿真、离散系统仿真、采样系统仿真、分布参数系统仿真、离散事件系统仿真等。

随着数字仿真内涵的扩展, 根据数字仿真的任务不仅包含系统的分析、研究, 还包括系统的设计和操作人员的培训仿真器。因此, 一些计算机辅助设计的内容及仿真语言的开发等也越来越为数字仿真的研究者所重视。数字仿真的内容已涉及到下列各方面:

①**仿真计算机和仿真系统** 模拟计算机、数字计算机、模拟——数字混合计算机、微处

理机阵列机、并行多处理机系统。

②仿真方法 模拟仿真方法、数字仿真方法、模拟——数字混合仿真方法、离散事件系统仿真方法、蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 法。

③仿真程序和仿真语言 各种类型的仿真程序和仿真语言、图形仿真、仿真数据库。

④仿真研究 多次运行、参数寻优、函数寻优。

⑤辅助设计 单变量、多变量系统的辅助设计、时域和频域的辅助设计、最优化设计。

⑥仿真器 用于各种应用领域的训练、培训用仿真器。

⑦仿真基准问题 生物学基准、科学混合基准。

系统仿真是根据系统的数学模型, 转化为计算机可以实施计算的仿真模型, 并在仿真模型上进行分析、研究。仿真的基本方法是建立仿真模型和编程、仿真运算。可用图 1-1 表示数字仿真的基本步骤。图中, 虚线框内的部分就是数字仿真的内容。

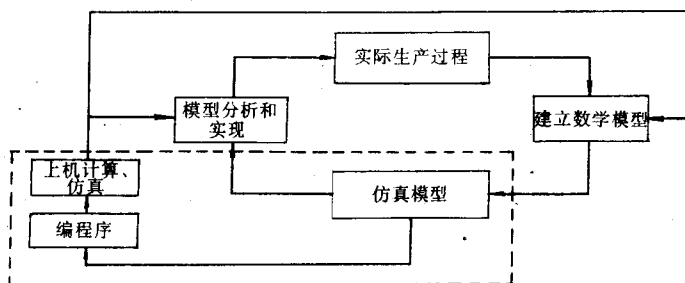


图 1-1 数字仿真步骤

1.1.3 数字仿真的基本特征

数字仿真是一门数值计算技术。它包含了计算数学、计算机技术、控制论、概率统计学等方面的知识, 它以过程辨识和建模为基础, 用于对过程的仿真模型进行分析、研究和设计。因此, 数字仿真技术是一门新兴的综合性技术课程。

数字仿真的基本特征是:

①对于真实客体的研究, 往往由于它的复杂性, 难于直接进行研究, 为了深入地对这种过程进行研究、提出改进方案或者作出正确评价和论证, 常常要花费大量的人力、物力, 财力和时间。而且对于有些过程实体的研究, 会因为危险或不易实施某些条件而无法进行。采用计算机进行数字仿真就可以避免上述问题, 可以通过对仿真结果的分析, 作出正确判断, 并能利用系统现有信息, 预测未来, 为系统的改进、利用提供有用信息。

②对于新系统、新方案的设计, 可以不急于无根据地花费大量投资去实际实施, 而可以通过计算机仿真, 对新系统、新方案进行分析、研究, 作出正确评价和论证。

③计算机仿真可以应用于自然科学和技术的研究、分析, 也可以应用于社会科学等领域的研究、分析。计算机仿真技术的出现将改变人们的观念, 改变社会生产和生活方式, 使各学科间相互交汇, 推动社会进步。

④在控制和决策时, 可以利用计算机对具有不同控制变量、决策变量、状态变量及有关参数进行多种方案仿真, 制订出最优控制和决策。

⑤通过数字仿真, 可以在一个较长时间内对系统进行研究, 时间和被考虑的因素由于计算机的大容量存贮和高速度运算而不必简化, 从而发现系统的有用信息。而且通过系统运行规律的分析、研究, 还可以预测未来系统可能的运行轨线。

⑥对于系统中含有的不确定因素、随机因素可以利用计算机仿真方法产生随机数，利用统计方法和模糊数学的有关规则对系统进行仿真。

⑦计算机仿真只能提供系统在某一特定条件下的特解，不能象解析分析方法那样可以得到解析解。此外，为了寻优，需在计算机上进行大量的重复运算，才能按一定规则找到可行解中的最优解。

⑧为了确定系统的初始运行条件，常常要收集大量运行数据，分析比较，花费大量时间，占用计算机内存和影响仿真速度。

1.2 数字仿真的基本原理

1.2.1 相似性原理

相似性的概念最早出现在几何学里，两个三角形的相似是指这两个三角形的对应边成比例，或者对应角相等。这种相似，称为形状的几何相似。当我们对同一类现象中的某一种现象进行研究，获得了有关信息和规律，并应用于这类现象的其他任一种现象时，这种相似称为同类相似。例如，通过对某一典型的换热器的研究和分析，得到的逆流换热的有关规律可以应用于类似的逆流换热的换热器分析。对于两类不同现象的质的相似性研究属于异类相似。例如传热对象、液位对象和 RC 电路中的时间常数都是容量系数和阻力系数之积，平衡关系参数是容量系数和被控参数（推动力参数）之积，而流量系数则是推动力参数除以阻力。其关系如表 1-1。

表 1-1 热、液、电三类现象的相似关系

平衡关系参数	容量系数	被控参数 (推动力参数)	流量参数	阻 力	时间常数
热量 u	热容 M_c	温度 T	热流 q	热阻 $\frac{1}{G_{c_0} \cdot C}$	$M_c \cdot \frac{1}{G_{c_0} \cdot C}$
体积 V	面积 F	液位 h	流量 Q	液阻 $\frac{2\sqrt{h_0}}{C_v}$	$F \cdot \frac{2\sqrt{h_0}}{C_v}$
电荷 e	电容 C	电压 u	电流 i	电阻 R	$C \cdot R$

根据相似关系，三类现象的输入流量参数和输出被控参数之间都可用传递函数 $\frac{K}{Ts+1}$ 描述。因此，对这三类不同种类现象的输入和输出关系的研究就可以用对一阶惯性环节的研究来类推。

相似性原理由相似性正定理、逆定理与推广定理三部分组成。

相似性正定理指出彼此相似的现象必定具有数值相同的相似准则。这表明相似现象的一切量各自互成比例。由这些量组成的方程组是相同的。

相似性逆定理指出了两类现象相似应满足的条件。这些条件是，可以用同一完整的方程组来描述；单值条件的物理量组成的相似准则在数值上相等。

相似性推广定理指出描述某现象的各种量之间的关系可以整理成相似准则关系式，则这些准则关系可以推广应用到与其相似的现象中去。正是基于这个原理，我们才能用数字仿真的方法把研究的结果应用于相似现象的分析研究中去。

相似性原理是仿真的基础。相似准则可以描述为几何的、物理的或数学的形式。数字仿真是用数学的描述形式来对相似现象从性能上进行的研究。

1.2.2 控制理论

对系统的控制是通过控制指令中所包含的信息得到的。即控制是和观察的信息、被控制系统和与它起作用的外部介质的信息及控制作用的结果信息等各方面联系在一起的。系统与介质的信息交换及系统内部各部分之间的信息交换都是借助于各种类型的连接关系进行的。这种联系是控制论系统的特征。反馈就是这样的一种联系通道，有关控制结果的信息通过它送回到系统中去。

控制论是组织界系统的理论。它的重点是分析系统的行为和被控制对象的信息，分析信息一调节过程和系统行为、功能的性质。在美国，控制论的特点被看成是同研究、推广和使用计算机技术有关的种种问题的总和。控制论处处应用着数学方法，但它不是数学的一个分支。在研究控制论系统作用原理时，它脱离了对物质某种形式运动的从属性，而把研究对象局限于控制和信息的过程，从而揭示出被研究对象的特征。

按结构水平原理对控制论分类，则有社会控制论、生物控制论和技术控制论三类。近年来，根据三类控制论的组合，产生了军事控制论、医学控制论、经济控制论等。

技术控制论包括了机器装置和功能的理论和很多数学控制论的内容，例如，信息统计、自动调节和控制、算法语言、程序设计等等。

计算机仿真是按控制的理论和方法，首先把被研究客体诸量信息化，构造实质内容的模型；其次，在上述模型基础上，建立用数量的关系描述的仿真模型；然后，编制程序，使计算机按一定的规则对上述信息进行处理，并获得它们的信息关系和仿真结果。可见，计算机仿真的方法是控制论研究客体的具体体现。

总之，相似论、控制论及近代数学的有关学科的发展，不仅为计算机仿真提供了理论依据，而且为计算机仿真提供了方法和技巧。近代科学，如人工智能、预测技术、系统分析等科学的发展，将对计算机仿真提供更有效的方法和理论，使计算机仿真技术的应用更广泛更深入。

1.3 计算机仿真的应用实例

1.3.1 精馏塔精馏过程仿真

精馏过程是石油化工生产过程中最常见和最重要的单元操作过程。精馏过程的仿真包括动态数学模型建立和动态仿真，它是在静态数学模型基础上建立起来并经简化得到的模型，并据此进行的数字仿真研究。

精馏塔静态数学模型的建立有逐板法和三对角阵法，逐板法先对每一个塔板建立汽—液平衡方程，物料和能量的衡算方程式等基本方程式，然后，从塔顶开始，按各轻组分浓度向下逐板计算，直至啮合板（一般选进料板）。此外，从塔底开始，按塔底各重组分的浓度，向上逐板计算，直至啮合板，根据上下行计算所得的啮合差进行修正，直到满足要求为止。

建立动态数学模型是由于静态数学模型反映的是精馏塔在稳态时的各塔板参数，而动态数学模型可以得到当控制变量变化时对各塔板参数的影响，从而为优化控制方案的建立提供依据。此外，动态数学模型是为一定目的而经过简化的，它能为实时仿真提供可能性。

通过动态仿真，可以看到，对于多元物系的工业精馏塔，它的非线性特性极为明显，可用变参数的简化动态数学模型进行描述。实际应用表明动态仿真是正确的，已在多种类型精馏塔中得到应用。

1.3.2 人口增长过程仿真

人口的控制对于国民经济的发展有着密切的关系。设在 t 时刻的人口总数为 $N(t)$ 。在下列简化假设条件下，可列出人口模型：

- ①未来人口总数是现有人口的函数。
- ②性别比率及生育率为定值。
- ③不同年龄组人口间比例保持定值。
- ④无移民的变化及生活环境的突发变化。
- ⑤人口净增长率 λ 为常数。

人口模型可用下式描述：

$$\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t)$$

当 $\lambda > 0$ 则人口会不断增长，达到某一警戒率。当 $\lambda = 0$ 则人口维持不增不减的状态，出生人数等于死亡人数。当 $\lambda < 0$ 则人口不断减少。在短期的人口预测中，这种简化模型是有效的。表 1-2 是某国从 1800 到 1900 年之间观察值与预测值的比较。

表 1-2 某国人口增长观察和仿真结果

年	观察值 (百万)	仿真值 (百万)
1800	5.3	5.3
1820	9.6	9.7
1840	17.1	17.4
1860	31.4	30.3
1880	50.2	50.1
1900	76	76.9

实际应用的人口模型要复杂得多。我国学者宋健等根据我国国情建立的人口模型为制订国民经济计划、人口政策等起了积极的作用。

1.3.3 北京地铁仿真模型及仿真结果

北京地铁早期工程东起北京火车站，西至苹果园，共 17 个站，全长 23.6km，双向运行，单向运行全程 32 分钟，各站停留共 8 分钟，根据客流调查所得的近 30 万个数据，建立了北京地铁的随机服务系统模型，以原始时刻表作为初始值进行列车发送，在动态仿真中，根据乘客平均等待时间及列车满载率对时刻表进行调整，最后得出了满足给定条件下的发车时刻表和相应的仿真结果。

这个系统是一个随机服务系统，采用离散事件系统仿真时是用 GPSS 语言实施的。通过仿真给出了客流方面的有关信息，如各站车上人数、上车、下车人数、进站人数、未能上车人数、乘客平均等待时间及列车运动的有关信息，如列车运行时刻表、运行图、各列车满载率、最大和平均满载率等等。由于采用计算机进行计算和仿真，大大缩短了时间，为合理编制客运计划，科学安排运输能力，提高管理水平发挥了极重要的作用。

计算机仿真在其他领域的应用实例可以举出很多，在工程技术、社会经济、商业管理等领域的应用使得实验成本下降、安全性提高，为优化决策提供了依据。此外，用于训练的仿真器已在航空、航海等运载工具的训练培训和化工、电站等工业设备的操作训练中得到应用。

1.4 仿 真 软 件

1.4.1 仿真软件

为了实施数字仿真, 必须把仿真模型用计算机所能执行的语言进行编辑, 使之能够执行。仿真软件是实施上述功能的应用软件。仿真软件可分为仿真程序、仿真程序包和仿真语言等。通常仿真程序是为解决某一类实际问题而编制的程序, 它占用的内存较少, 通用性较差, 在数字仿真的初期或为解决某些特定问题时被广泛采用。仿真程序包则解决的面较广, 如面向微分方程的连续系统数字仿真程序包能够对以微分方程形式描述的连续系统进行数字仿真, 通常可以按程序包的使用说明直接使用, 一般无需具有计算机编程的有关知识, 但为了完成程序包的要求, 需对程序包提供的各种模块有较深入的研究, 才能组成所需要研究的仿真模型。仿真语言则有自己一整套的规定语句、符号、句法和语法, 用户可根据被研究的仿真模型按仿真语言的有关语句编写结构参数、系统参数等, 使用较方便, 随着人工智能, 专家系统的应用, 会得到更广泛的应用。但对初学者来讲, 由于他们对数字仿真, 或者使用的应用软件缺乏实践, 因此, 应作必要的培训和指导。本书考虑到应用的环境、选用了初学者能自学的 BASIC 语言编程, 并在国内有较大用户的 IBM 微机上实施了这些仿真程序。此外有软盘可供选用。

1.4.2 仿真语言的性能评价

由于仿真的问题不同, 为适用于不同系统的数字仿真, 对仿真语言也提出了适用性的问题。因此一般仿真语言都有若干种仿真算法可供用户选用。对仿真语言的性能评价虽与仿真语言的功能和设计要求有关, 常可用下列性能进行评价。

①语言表达性 仿真语言对模型的表达能力。包括模型类型、符号程序库、数据处理等。

②数值能力 仿真语言对模型数值的处理能力。

③语言结构特性 仿真语言是否有利于建立模型、进行仿真实验、转换成机器码等。包括排序算法、分区描述及模块化等。

④程序执行性能 程序能否采用人机交互式执行, 可否变换模型参数和系统参数、可否改变模型结构等。

⑤数据处理性能 对模型结构参数、初值、输入、输出数据存贮、检索和运算处理能力。

⑥输入、输出特性 数据和图形的输入和输出。

⑦模型鉴定 对数学模型的有效性和对仿真模型可信度的确定。

⑧语言实现方式 程序的实施运行有直接执行、解释型、编译型等。

⑨专家功能 有否人工智能、自学习等功能。

1.4.3 典型数字仿真语言

数字仿真语言在国外于 60 年代初就开始研制。美国计算机仿真协会软件委员会在 1967 年推出了数字仿真语言的标准文本 CSSL。而在此同时, 由 IBM 公司推出了 CSMP 数字仿真语言。这些语言面向微分方程组, 适用于连续系统的数字仿真。采用时间离散的连续系统数字仿真语言有 DYNAMO, 即动力学模型。

离散型系统的数字仿真语言按工作原理可分为三类。以事件为基础的 SIMSCRIPT、

SIMLIB 等，以活动扫描为基础的 CSL 及以过程为基础的 GPSS 等。

既可用于连续系统又可用于离散系统的数字仿真语言有 GASP-IV, SLAM 等。此外尚有专用的仿真语言，如通用机械制造系统计算机仿真语言 GCMS 等。

随着人工智能科学的发展，出现了 PROLOG、LISP 语言，这种表处理的语言使人工智能在计算机上的实现成为可能。

我国在 70 年代初引进了一些数字仿真程序包和仿真语言，经消化、移植，推出了一些有特色的仿真语言与程序包，如 ZFX、DYNAMO、CSSP、SMPACK、ICSL 等，并得到了广泛的应用。

2 基于微分方程求解的连续系统数字仿真

用计算机进行数字仿真, 首先应把系统的数学模型转化为计算机能够采用接受的仿真模型。对于不同的计算机仿真算法, 所需的仿真模型是不同的。本章讨论的数字仿真采用数值积分仿真算法, 所需的仿真模型是一阶微分方程或一阶微分方程组。

本章介绍实际控制系统中, 连续系统的几类数学模型描述, 以及它们转化为仿真模型的方法。讨论了数值积分的几种不同算法及其计算稳定性问题。最后, 本章给出了用 BASIC 语言编制的实用数字仿真程序。

连续系统可分为不含纯滞后环节和含有纯滞后环节等两类。本章对这两类系统都进行了讨论。

2.1 连续系统的数学模型

2.1.1 数学模型的建立

系统动态特性的数学表达式, 称为数学模型。分析研究动态系统, 首先应建立系统的数学模型。工业生产过程中, 控制系统的数学模型可通过对生产过程机理的分析, 应用物理、化学等有关的定律和知识, 经推导获得。由于工业生产过程的复杂性, 大多数系统的数学模型则是通过对生产过程的辨识获得的。也就是在生产过程的输入端加入某种类型的激励信号, 在输出端测取系统的响应输出信号, 通过某种系统辨识的方法确定所测系统的结构及相应参数。工业生产过程中常用的测试方法是响应曲线法。控制系统的数学模型常见的有三种形式。它们是高阶微分方程(微分算子方程)、状态空间(一阶微分方程组)及传递函数。下面以实例说明之。

〔例 2-1〕连通系统的数学模型

图 2-1 所示的三个连通容器, 已知其容器横截面积分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 , 液位分别为 H_1 、 H_2 、 H_3 , 各阀阻力系数分别为 k_1 、 k_2 、 k_3 。试求液面 H_3 与进料量 Q 之间的关系。

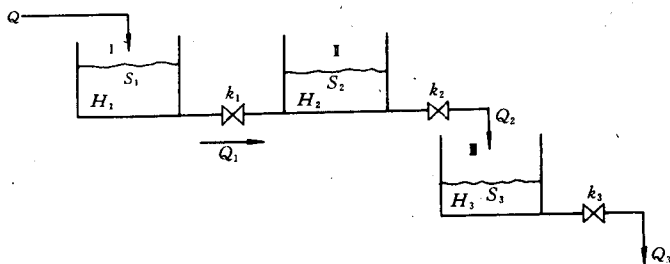


图 2-1 连通系统

根据流体力学有关知识, 有:

$$Q_i^2 = k_i \Delta P_i \quad (i = 1, 2, 3)$$

对容器 I 有: $S_1 \frac{dH_1}{dt} = Q - Q_1$