

控 制 系 统

计 算 机 仿 真

与 辅 助 设 计

任兴权 姚建宇 徐心和 于锡纯 马先 编

东北工学院出版社

TP273

37

控制系统计算机仿真与辅助设计

任兴权 姚建宇 徐心和 于锡纯 马先 编



东北工学院出版社

内 容 简 介

本书分8章，第1章概括介绍了系统仿真的概念、内容、应用、现状和发展。第2章讲述模拟计算机与模拟仿真技术，其中包括相似原理、模拟计算机的线性与非线性运算部件，模拟计算机的工作过程和面向微分方程及面向结构图的模拟仿真。第3章较详细地介绍了连续系统的数字仿真，数学模型，数值计算方法、仿真程序、仿真程序包——CSS以及快速仿真程序。第4章介绍采样系统数字仿真的原理、模型、程序及纯滞后环节的应用。第5章阐述单变量和多变量的参数寻优方法及仿真程序。第6章叙述离散系统分析方法、特点、概率统计模型、随机服务及GPSS仿真语言简介。第7章介绍线性系统频率特性法识别的计算机辅助程序。第8章介绍线性系统二次型性能指标最优控制器设计算法和程序。

本书可作为硕士研究生，大学本科生的教材，也可供有关工程技术人员自学参考。

JS450/41

控制系统计算机仿真与辅助设计

任兴权 姚建宇 徐心和 于锡纯 马先 编

东北工学院出版社 辽宁省新华书店发行
(沈阳 南湖) 东北工学院印刷厂印刷

787×1092 毫米 1/16 印张：26 1/2 字数：624 千字
1986 年 12 月第 1 版 1986 年 12 月第 1 次印刷
印数 1~3000 册

责任编辑：王秀莲 鄂承宗 封面设计：鄂承宗

ISBN 7-81006-020-1/TH·7

统一书号：15476·4 定价：4.40元

序 言

系统仿真技术在我国近几年发展迅速、应用广泛，它已经成为各学科、各技术领域、各工程部门分析、综合系统的一种有力的工具和手段。它的内容包括模拟计算机仿真、数字计算机仿真、数字模拟混合计算机仿真以及全数字并行处理机仿真。它涉及很广，在计算机硬件、软件、数值计算方法、计算机语言、程序设计，控制理论与控制系统基础上形成的一门新的计算与实验研究技术。

为了普及和推广系统仿真技术，将原为大学本科学生和硕士研究生讲课用的讲义中第一编和第二编材料合并，挑选一些基本内容和有实际应用价值的计算机仿真程序，经过整理后编成此书，提供给广大读者。

本书第一章、第二章、第三章由任兴权同志编写，第四章、第七章由姚建宇同志编写，第五章由马先同志编写，第六章由于锡纯同志编写，第八章由徐心和同志编写，全书由任兴权同志主编。

本书所列部分清单上机通过，得到东北工学院计算站的同志和系统仿真实验室杨桦同志帮助调试；本书出版过程还得到东北工学院教材科宁树发同志大力支持；在此一并向他们表示感谢。

最后编者恳请广大读者提出批评指正，以便进一步改正、完善本书。

编 者

一九八六年五月

目 录

第 1 章 绪 论

- 1.1 系统仿真基本概念..... (1)
- 1.2 系统仿真基本内容..... (2)
- 1.3 系统仿真技术应用..... (6)
- 1.4 系统仿真技术现状与发展..... (8)

第 2 章 模拟计算机与模拟仿真技术

- 2.1 相似原理与模拟计算机..... (10)
- 2.2 模拟计算机的线性运算部件..... (11)
- 2.3 模拟计算机非线性运算部件..... (17)
- 2.4 模拟计算机的工作过程..... (30)
- 2.5 面向微分方程的模拟仿真..... (33)
- 2.6 面向结构图的模拟仿真..... (45)

第 3 章 连续系统数字仿真

- 3.1 连续系统数学模型..... (58)
- 3.2 连续系统数学模型的数值计算方法..... (74)
- 3.3 连续系统数字仿真程序..... (108)
- 3.4 连续系统离散相似法数字仿真程序..... (133)
- 3.5 连续系统数字仿真程序包 —CSS (156)

第 4 章 采样控制系统数字仿真

- 4.1 采样过程的数学分析及扩展 Z 变换..... (202)
- 4.2 差分方程及数字控制器..... (207)
- 4.3 纯滞后环节和差分方程的数字仿真..... (221)
- 4.4 采样控制系统的数字仿真程序及应用举例..... (223)

第 5 章 控制系统参数最优化数字计算机仿真

- 5.1 参数最优化概念..... (247)
- 5.2 单变量寻优技术..... (249)
- 5.3 多变量寻优技术..... (255)
- 5.4 控制系统目标函数的确定和限制条件的处理..... (283)

第 6 章 离散系统的数字仿真

6.1 离散系统分析方法.....	(296)
6.2 离散系统仿真的特点.....	(301)
6.3 用计算机产生随机数.....	(311)
6.4 概率统计模型的建立.....	(319)
6.5 随机服务系统的仿真.....	(326)
6.6 离散仿真语言 GPSS 简介.....	(330)

第 7 章 线性系统模型频率特性法计算机辅助辨识

7.1 概 述.....	(338)
7.2 线性系统的数学模型.....	(340)
7.3 频率特性法.....	(347)

第 8 章 线性系统二次型性能指标最优调节器计算机辅助设计

8.1 连续时间 LQR 基本理论.....	(374)
8.2 连续时间 LQR 设计程序.....	(381)
8.3 离散时间 LQR 设计程序.....	(397)
8.4 LQOPT 设计软件.....	(408)

第1章 绪 论

1.1 系统仿真基本概念

1.1.1 系统的概念

系统的概念来源于人类生产劳动和社会实践。人们在长期活动中逐渐认识到物质世界事物间，存在着相互联系、又相互制约的关系。而且就某种目的形成一个运动的整体，这个运动整体便构成了一个系统。近世由于计算机科学的进步，又为系统概念增添了定量的内容，从而形成了系统科学一门学科。

工程系统的含意是指由相互关联的部件组成一个整体，实现特定的目标。例如，电力拖动自动控制系统是由执行部件、功率变换部件、检测部件等组成，用它们来完成转速、位移、或其他参数控制的某一特定目标。类似的工程系统还有电力系统、化工、石油、机械加工、钢铁生产系统等。

非工程系统范围更广泛，大至宇宙、自然界、人类社会，小至粒子、细胞都普遍存在着相互关联，相互制约的关系，形成一个整体，实现某一目的。例如，自然生态系统就是由阳光、空气、水、温度、土壤、植物、动物等构成相互依存又相互制约的关系，保持其生态平衡。类似的非工程系统如海洋系统、气象系统、生物系统、经济系统、交通系统、人口系统、军事系统等。

建立系统概念的目的在于深入认识并掌握系统的运动规律，这样不仅定性了解其规律而且定量地分析、综合系统，比较准确地解决自然、社会和工程中种种复杂的问题，以便获得更大的效益。

定量分析、综合系统最有效而又普遍的方法是模型法。

1.1.2 模型的概念及其分类

模型是对所要研究的系统在某些特定方面的抽象，通过模型对原型（系统）进行研究，使其具有更深刻、更集中的特点。模型有物理模型和数学模型之分。由于计算机的迅速发展和广泛应用，数学模型更被重视。

数学模型是描述系统动态特性的数学表达式，表示系统运动过程各量的关系，是分析、综合系统的依据。

数学模型从建造方法上可分为机理模型和统计模型。机理模型是采用演绎方法，即由一般到特殊的推理方法，它是运用已知定律或定理、系统结构、参数的前提下，用推理方法建立的数学模型。

统计模型是采用归纳法，即由特殊到一般的逻辑方法，它是根据大量实测或观察的数据，运用统计的规律估计系统的模型。此外，还有一种称为混合模型，它的特点是理论上逻辑推理与实验观测数据的统计分析相结合的模式。

数学模型从所描述系统的运动性质和所用数学工具的特征来分,有线性、非线性、定常、时变、连续、离散、集中参数、分布参数、确定、随机等系统。

建造系统数学模型的目的是对系统进行定量分析、优化处理、预测系统行为、提供设计、管理、控制的资料。

分析模型的方法可有解析法和实验法。由于近代系统结构复杂,其数学模型用解析方法分析比较困难,多采用实验方法。而实验方法有在真实系统上实验和在模型上实验两种。由于可能性、经济性和安全性等原因,在真实系统上实验往往不易实现,而多重视在模型上进行实验,尤其在数学模型上进行分析、综合实验,这是由于近三十年来计算机技术和数值计算方法发展的结果。

1.1.3 系统仿真

系统仿真(System simulation)是根据被研究的真实系统数学模型,结合所用的仿真计算机建立仿真模型。例如模拟计算机的排题框图;数字机的数值算法、仿真程序等统称为仿真模型。然后依仿真模型在计算机上计算、分析、研究,获得真实系统的定量关系,加深对真实系统认识和理解,为系统设计、调试或管理提供所需的信息、数据或资料。

系统仿真技术是在数学模型基础上,利用计算机,进行实验研究的一种方法。它是建立在系统科学、系统辨识、控制理论,计算机技术与控制工程基础上的一门综合性很强的实验科学技术,是分析、综合各类系统,特别是大系统的一种研究方法和有力的工具。

1.2 系统仿真基本内容

1.2.1 模拟计算机与模拟仿真

模拟计算机是建立在相似原理基础上。很多工程动力学系统都具有相似性。例如,加热炉温度变化规律,电力拖动系统机械转速的变化规律,电子 RL 或 RC 电路中电流或电容器上电压变化规律等,虽然它们物理系统不同,但数学模型是相同的,其变量的运动规律是相似的,都可以用一阶线性微分方程描述。

根据相似原理,应用电子元件模拟数学上的基本运算环节,做成各种运算器,如积分器、加法器、乘法器等。在仿真某一系统时,依照系统数学模型结构和参数,将这些基本运算器连接起来组成仿真系统,完成求解任务。这种具有多种部件的仿真装置就是电子模拟计算机。它具有高度的通用性和重复使用率,因此,方便、经济,广为应用。

利用模拟计算机做为主要工具进行系统模型的运算、研究,称为模拟仿真技术。它主要包括:依据系统数学模型,用逐阶递降的方法将它变成模拟仿真模型,再考虑选择合适比例尺,写成模拟仿真框图,再进行排题,上机调试、运行、得出响应,然后分析所得结果,修改结构或参数再进行运算,反复研究,直到得出预期的结果。

模拟仿真主要特点是运算速度快,可以满足实时仿真要求,在一些单纯数学模型运算中,甚至可以超实时运算,所以它用于系统实时仿真以及实现系统参数寻优、随机过程的统计特性等方面的研究。

电子模拟计算机也有不足之处，主要是运算精度相对来说偏低，受所用部件精度限制。线性部件精度可达(0.1~0.2)%，非线性部件精度可达(0.3~0.5)%，模拟计算机对线性常微分方程的整机解题精度只能达到5%，求解非线性常微分方程时，其整机解题精度则要下降到(10~20)%左右，显然，精度要求高的系统，单纯用电子模拟计算机仿真满足不了要求。

电子模拟计算机仿真主要应用在伺服机构设计、工业过程控制、飞行仿真器等方面。用模拟计算机求解以时间为变量的常系数线性微分方程和常系数线性微分方程组最合适，大多数工程控制系统都属于这类数学模型。所以电子模拟计算机至今仍是分析、综合、设计以及工程系统调试所不可缺少的有力工具。

1.2.2 数字计算机与数字仿真技术

数字仿真基于数值计算原理，因为数字仿真的主要工具是数字计算机，数字计算机是用二进制数码表示数值大小的一种数字运算装置，所以求解连续系统数学模型时都要用数值计算方法将其转换成数字计算机能够实现运算的仿真模型，依照仿真模型编写仿真程序，输入给数字计算机，由计算机逐条执行程序所规定的内容，完成系统仿真的任务，这种实现系统研究的方法称为数字仿真技术。

数字仿真技术的主要内容是数值计算方法、仿真语言、仿真程序、上机实验等。

数值计算方法是对系统数学模型进行数值求解，以备数字计算机计算的需要。古典数值方法有欧拉法，梯形法，预估-校正法，龙格-库塔法，阿达姆斯法等；近代算法中如丢斯丁法，状态转移法，离散相似法，根匹配法等。

仿真语言多属面向专门问题的高级语言，它是在通用高级语言基础上，针对专门问题研制的，分为面向工程和面向框图两种语言。常用的连续系统仿真语言有 CSMP, CSS, CSSF, CSSL, ACSL, DARE-P；常用的离散系统仿真语言有 GPSS, GASP 等。

仿真程序是依据所用语言和系统的仿真模型而编制的计算机程序，有些常用的通用程序编成子程序，以便重复调用，而对专门问题则编成应用子程序，存于程序库中，组成仿真程序包，以便系统研究工作者方便使用。

数字仿真也有不足之处，主要是运算速度相对还慢，这主要是数字计算机按编制的程序逐条串行执行的原因，一些小型机要完成实时仿真仍然是比较困难的。但其精度随着字长增加可以达到较高的水平。加之，程序资源丰富，存贮灵活，使用方便，所以数字仿真技术在科学计算，系统仿真，辅助设计，企业管理，工业控制等领域中得到广泛的应用。

1.2.3 混合计算机与混合仿真技术

随着技术进展，出现一些单独应用模拟计算机或单独使用数字计算机都不能满足要求的问题。例如，有些系统要求较大的动态范围；有些系统要求既有数字控制器又有连续动态过程的对象，它们都要求满足较高精度的快速实时仿真。为此在六十年代初期研制了一种充分发挥数字机和模拟计算机各自优点的混合计算机。它是将模拟机和数字机通过中间接口连接起来的一种混合计算系统。

混合计算机系统硬件包括三个部分：数字计算机，模拟计算机及两机交换信息的中间接

口。

混合计算机的模拟机主要担负快速运算工作。在工作中受数字机的控制，自动高速运算，它和普通模拟计算机不同，这种模拟计算机要求高度自动化、快速化和高可靠性。

混合计算机中的数字计算机起着中央处理机的作用，对整个计算机系统进行管理、控制。数字计算机把中接口和模拟计算机都看成是它的子系统，因此要求数字机比一般机器内存容量大，除存放一般计算机软件外，还要存贮管理、控制模拟机和中接口的程序。此外，还要求数字机具有完善的中断系统及快速中断响应能力。

混合计算机的中接口是用来完成两机之间信息转换及传送的硬件，受数字机的控制和管理，接受数字机的指令进行操作。对中接口的要求是高速转换和精确传递信息。

混合计算机系统软件包括有：操作系统，编译程序、诊断程序以及应用程序等。例如模拟程序自动设计的软件 APACHE, ACTRAN; 混合机操作及检验软件 HELPI, HYTRAN, HOI; 混合仿真软件 SIMPL-1; 自动排题软件 HAL 等。

混合仿真过程包括下列内容：(1) 依照系统数学模型确定求解方法，分配模拟机或数字机的计算任务；(2) 设计模拟机排题框图，选择比列尺，决定静校值；(3) 设计中接口连接关系，对数字计算机选择算法，编写仿真程序；(4) 联机调试，例如模拟机静校，确定积分器初值、系数器设置检查、检查接口连线，数字机输入相应程序和读入初始数据等；(5) 联机操作；仿真完了后，分析仿真结果，或改变参数后再进行计算，最终对仿真结果加以分析评价。

混合计算机是分析、综合现代工程系统的有力工具。六十年代在飞行器、宇宙航行方面得到广泛的应用，并取得辉煌的成果。例如洲际导弹弹道仿真，阿波罗飞船登月轨道及登月舱与指令舱交会仿真等。至今仍是高速实时半实物、实物仿真及飞行器培训仿真器方面研究的主要工具和手段。

1.2.4 全数字并行处理计算机与仿真

随着数字仿真技术应用与发展，对普通数字计算机提出越来越高的要求。例如大区域气象预报，社会系统或经济系统预测，大系统的实时寻优仿真等，这类系统的数学模型，要求计算机操作次数大于 10^{10} 次/秒。尽管通用计算机运算速度逐年有所提高，但应看到这种串行运算体系的计算机，其运算速度，终究受到信息传输速度和器件本身延迟的限制，难于满足不断发展的高速要求。为此，近年主张改变过去计算机串行处理信息结构方式，使其为并行处理信息结构方式。这就是全数字并行处理计算机产生的背景。

所谓并行处理的概念包括两种含意，一种是多处理机技术 (Multiprocessor)。它是多机并行，分别完成独立的各自作业，这种多处理机技术的目的是为了获得最大的计算效率，即在单位时间里可以得到最大的计算量。另一种是多道程序技术 (Multiprogram)，它是指多机并行完成单一作业的相关作业段，即利用多个机器资源同时完成一个单一的作业，其目的是为了获得极高的处理速度。

根据这种原理制造的计算机有超级计算机 (Supercomputer)，小型超级计算机 (Mini-Supercomputer) 以及专用的小型并行处理机系统。

下面简单介绍一下专用小型并行处理机系统。以美国 ADI 公司研制的 AD-10 系统为例，这种机器应用在连续系统实时仿真方面，它是属于多指令多数据流一类机器，即由多个

功能处理机，在多个指令作用下，同时在同一区间重迭处理多个数据，因此 AD-10 并行处理机运算速度可高达 1 亿次/秒以上。在 AD-10 中采用混合字长的数据结构，来提高精度。例如对函数生成、坐标转换等运算采用 16 位字长，而积分运算采用 48 位字长，因此精度可达 (0.01~0.1)%。AD-10 具有大容量高速交替存取数据的存贮器，故可快速地生产多个多变量函数。AD-10 具有全并行高速 A/D, D/A 通道，转换速度为 10 兆字/秒。AD-10 具有丰富软件，如 HIC 接口通信程序，ADX 交互性执行程序，交叉汇编程序，诊断程序以及 MPS-10 仿真语言，这是一种面向框图的模块结构式的高级仿真语言。

MPS-10 高级仿真语言包含有各种数字仿真运算子程序，用这种语言编写仿真程序十分方便，简单，只调用仿真子程序即可，还可修改模型参数、初始条件和比例尺系数，又可选择多种数值积分方法。

这种并行处理机目前应用在航天、航空、电力系统、核工业等系统仿真方面。

1.2.5 系统模型辨识与仿真

建立系统数学模型一般有二种办法，一种为机理模型，通过物理的或化学的规律直接由理论推证出的数学模型称为理论建模。另一种为统计模型，通过系统输入、输出数据的观测，估计系统数学模型的结构和参数，寻求与实际系统逼近的数学模型称为辨识建模。它表示真实系统的运行特性，一些工程系统用辨识方法建模是比较重要的手段之一。

如前所述，系统仿真是建立在系统模型基础上，经过数值方法得出仿真模型，编制仿真程序，进行系统仿真。因此，系统的数学模型是仿真的依据和基础。

而系统的数学模型又是借助计算机仿真的方法进行辨识。对模型结构选择，参数最佳拟合与模型校验等的大量计算工作都是通过仿真程序反复计算，最后达到满意的结果。因此，系统仿真又是系统模型辨识的工具和手段。

1.2.6 计算机辅助设计

控制系统计算机辅助设计技术是在数字仿真技术的基础上发展起来的一种新的设计方法。近年来，由于控制理论应用由空间技术逐渐转向工业技术，各类多变量系统不断提出新的有效设计方法；另一方面，近代控制系统要求精确，系统本身也趋于复杂，因此，从事设计、研究人员迫切希望用计算机辅助进行设计。这就是近十年来控制系统计算机辅助设计发展的背景。

控制系统计算机辅助设计是将系统工程师的设计经验和数字计算机强有力的计算能力相结合的一种设计方法。它由计算机硬件和系统应用软件与系统设计人员的经验，共同构成人-机系统，由设计者与计算机共同协作有效地工作，完成规定的设计任务。

控制系统计算机辅助设计的主要内容：(1) 用辨识方法建立系统的数学模型；(2) 研究确定系统约束条件，性能指标函数；(3) 对系统数学模型进行分析，如数学模型的变换、能控、能观性、稳定性的判断等；(4) 设计系统控制器结构和参数，系统动态响应数字仿真，确定合理结构和最优参数，检验系统动态特性是否达到预期目标。设计过程设计者不断修改系统结构和参数，直至最后得到满意结果。

这种人-机交互的辅助设计称为半自动的控制系统计算机辅助设计，是一种应用较广的办法。

半自动辅助设计软件，根据其功能大体包括下列程序：管理程序，它是对辅助设计硬件及软件进行管理；系统辨识程序，一般应具备几种辨识方法；模型变换与分析程序，转换成标准型系统模型，检验能控、能观、稳定性；控制器设计程序，它应具备几种设计方法；系统动态响应仿真，参数优化程序；输入、输出程序。

最后应指出，系统仿真技术与系统计算机辅助设计之间有着密切关系，但也有区别。例如，系统仿真技术和计算机辅助设计技术都用来对系统进行分析设计。在数值算法和程序软件方面都相类似。但辅助设计一般都是离线进行，而系统仿真不仅可以离线进行，有时也要求在线实时仿真，如培训仿真器就要求实时仿真。总之，系统仿真是计算机辅助设计的重要组成部分，而辅助设计又是系统仿真的扩展。

1.2.7 最优化技术与仿真

最优化技术是系统设计中带有普遍意义的一项内容。例如控制系统设计研制中总是希望获得一个最优过程，即要求系统控制函数满足某项指标的极值状态，这就是所谓的控制系统最优化问题。

控制系统最优化问题，一般分为两类：一类是系统结构已定，在规定的约束条件下，寻求满足某项指标函数极值的最优参数，即参数寻优问题。所用方法有单变量寻优的黄金分割法，二次插值法；多变量函数寻优的单纯型法，梯度法和共轭法等。另一类是函数寻优，即当约束方程、边界条件已定时，确定系统目标函数，寻求最优控制函数，使目标函数值极大（或极小）。解决这类问题的方法有变分法，极大值原理或动态规划等。

上述这些问题在数学方法上都已是成熟的。因为数学上的成果应用到具体控制系统中仍有巨大计算工作量，因此借助仿真手段进行参数自动寻优或最优控制器设计是系统仿真的目的。

1.3 系统仿真技术应用

系统仿真技术做为分析、综合系统的一种手段和工具，目前已被广泛应用于几乎是所有的科学技术领域。例如在工程系统中钢铁、电力、化工、石油、机械、动力、能源、交通、水力、核工业、航天、航空、航海等；在非工程中工业管理、经济、社会、教育、卫生、人口、生物、生态、海洋、气象、环境、医学等；在控制理论、计算技术、大系统理论、系统工程以及如农业、林业、军事、国防等方面均有广泛的应用。

本节仅从学科角度出发，对接触最多、发展最快，比较重要的几个方面的应用做一概括的介绍。

1.3.1 系统仿真技术在系统的分析、综合方面的应用

各技术领域的控制系统分析、设计、调试、改造都应用仿真技术。例如，在工程系统方面，设计开始阶段，利用仿真技术论证方案，进行技术经济比较，优选合理方案；在设计阶段，系统仿真技术可帮助设计人员优选系统合理结构，优化系统参数以期获得系统最优品质和性能；在调试阶段，利用仿真技术分析系统响应与参数关系，指导调试工作，使之迅速完

成调试任务；对已经运行的系统，利用仿真技术可以在不影响生产条件下，分析系统的工作状况，预防事故发生，寻求改进薄弱环节，不断提高系统的性能和运行效率。

对大量重复性的设计任务，可建立系统设计仿真器或系统辅助设计程序包，使设计人员得到方便的条件，大大节省设计时间，提高工作效率。

在非工程系统方面，例如用仿真手段建立商品生产和公司经营与市场预测的模型。根据市场商品销售信息分析，公司做出决策，工厂生产产品投放市场，再对市场信息分析，如此组成经济预测和生产模型。

在交通、能源、生态、环境等方面，例如，人口问题的分析，应用仿真技术预估今后人口发展，制定人口政策。又如研究区域动力学模型，分析整个地区中人口增长，工业化速度、环境污染、资源消耗、粮食生产、教育投资、社会福利等因素的相互平衡关系，应当按什么样的比例发展较为合适的问题。

1.3.2 系统仿真技术在仿真器 (Simulator) 方面的应用

系统仿真器是模仿真实系统进行实验研究的装置，它包括计算机硬件、软件以及被模仿对象的某些实物所组成的一个仿真系统。仿真器可分为培训仿真器和设计仿真器。

培训仿真器一般是由运动系统、显示系统、仪表、操作系统以及计算机硬、软件组成类似实物的模拟装置。例如，培训飞机驾驶员航线起落飞行仿真器就包括座舱及其运动系统，视景系统，音响系统，计算机系统以及指挥台等，此外还有电源、液压源以保证实验条件。

推广应用培训仿真器无论在培训技术和经济效益上都带来明显效果。例如，飞机驾驶员培训仿真器可以实现异常技术训练：诸如训练在事故状态飞行、排除故障技能、允许飞行员错误操作等，这样可以减少危险，确保安全，提高飞行技术，还可节省大量航空汽油、减少环境污染。如波音 747 飞机仿真器，每天按 20 小时架次飞行训练计算，则一年节省 30 万吨航空汽油，可见经济效益十分明显。

培训用仿真器在航天、航空、航海、核能工业、电力系统、坦克、汽车等方面均有应用，并取得较显著的技术经济效益。

设计用仿真器一般包括计算机硬件、被研究系统的应用软件以及大量的设计公式和参数等所构成的设计程序包。例如，轧钢机多级计算机控制系统的设计，从方案选择、参数确定，甚至绘图等工作都可以在设计仿真器上由计算机完成，这样可以节省大量的设计时间，还可以方便的改变系统结构或参数，提高工作效率。

此外，在电机、变压器或其他需大量计算工作量，规格众多的系列化产品设计方面，均可利用计算机辅助组成设计仿真器（或称设计程序包）以资利用。

从上可见，系统仿真技术在仿真器方面的应用将会带来明显的技术、经济效益。

1.3.3 系统仿真技术在技术咨询和预测方面应用

系统仿真技术目前已应用在专家系统、技术咨询和系统预测、预报方面。

专家系统是一种计算机软件系统，事先将有关专家的知识、经验总结出来，形成规律后填入表格或框架，然后存入计算机，建立知识库，设计管理软件，按输入的原始数据，依照规定的专家知识推理、演译、判断，给用户进行咨询。由于这种软件系统模仿专家思考、分

析、判断、实际上起到专家的作用，所以被称为专家系统。

我国目前研制比较多的是中医诊断专家系统，它是将医疗经验丰富，诊脉医术准确的医生的一套知识和经验加以规律化后编出程序存入计算机中，在临床诊断时起到专家作用。

除医疗之外，如农业育种专家系统，计算机自动选择杂交的亲本、预测杂交后代的性状，给出生产杂交第二代、第三代的配种方案，起到咨询的效果。

预测技术在很多领域中得到应用。例如，地震监测模型，根据监测数据预报地震情报。森林火警模型，根据当时气温、风向、湿度等条件预报火警。人口模型预测人口今后结构。

应用仿真技术对那些反应周期长、难于观察、试验或耗费资金大的方面，可以在短期，易于实现的模型上分析、试验、预报结果。这是仿真技术所具有的独特功能，极有发展前途。

1.4 系统仿真技术现状与发展

从五十年代以来，系统仿真技术随着计算机技术的发展也随之逐渐形成一门新兴的科学技术。例如，仿真用计算机经过模拟计算机、数字计算机、混合计算机以及全数字并行处理机的演变过程，而仿真技术也相应出现模拟仿真、数字仿真、混合仿真以及全数字并行处理仿真技术；仿真软件也由数值计算方法，仿真语言，仿真程序逐步扩大和丰富。至今，仿真技术已经应用在各技术领域、各学科内容、各工程部门。

1.4.1 仿真计算机的现状与发展

我国仿真技术的发展主要是在航空、航天、国防单位较早，至于一些科研机关、设计院所，高等院校还只是近几年才起步。目前仿真用计算机主要是从国外引进的一些大中型计算机，如 FLEX-256, M-150, ACOS-400 等。此外多数单位应用国产 100 系列计算机和一些引进的各种类型微型机。而混合机方面，多数单位使用国产的 TDMJ-1, HMJ-200, 以及 DJM330/DJS130, HAP-2A/DJS130 等。

国外，仿真计算机已发展到大型、高速、全数字并行处理计算机，以适应大型、实时、准确快速的要求。例如 AD-10、AP-120B、MAP-300，这些计算机具有极快的处理速度和较多的处理功能。而混合机方面在国外是往混合多处理机系统方向发展。

从大型实时仿真系统来看，关于仿真计算机的发展前途，我国目前有两种观点：一是仍沿着混合机方向，进一步提高部件集成化和提高速度，实现自动编排，开发全适用性混合软件。另是往全数字并行处理机方向发展。因为数字计算机技术不断进步，微处理机迅速发展，并行处理技术比较成熟，促使全数字并行处理机将取代混合计算机而占据仿真计算机的主流。

1.4.2 计算机仿真软件的现状及发展

我国仿真软件，开始主要是移植国外的仿真程序包和仿真语言，如连续系统仿真语言

CSS、MIMIC、CSSL以及DARE-P等，离散系统仿真语言GPSS及GASPIV等。近年来我国自行研制的如SBASIC、SSL-Ⅲ一类解释功能扩充的语言。此外，还有混合操作语言HYBASIC等。

在国外仿真软件非常活跃，如早期的连续系统语言MIDAS、CSMP、CSSLⅣ、DARE-P以及近年发表的ACSL，离散系统的GPSS、SIMSCRIPTⅢ、GPSSⅣ、DYNAMO。在混合应用软件方面有ECSSL、HYSHARE等。

从仿真软件发展来看，我国当前应组织力量确定我国语言规范，指导我国仿真语言的应用和发展。另外，应及早确定几种通用仿真语言，便于推广使用，提高工作效率。从长远发展来看应组织力量调查我国情况研制结合我国需求的创新仿真语言和仿真软件。

第 2 章 模拟计算机与模拟仿真技术

2.1 相似原理与模拟计算机

模拟计算机的组成原理是建立在不同物理系统运动规律具有相似性的基础上。例如图 2-1(a)所示直流拖动系统，描述它的运动方程是二阶常系数线性微分方程，如式 (2-1) 所示。

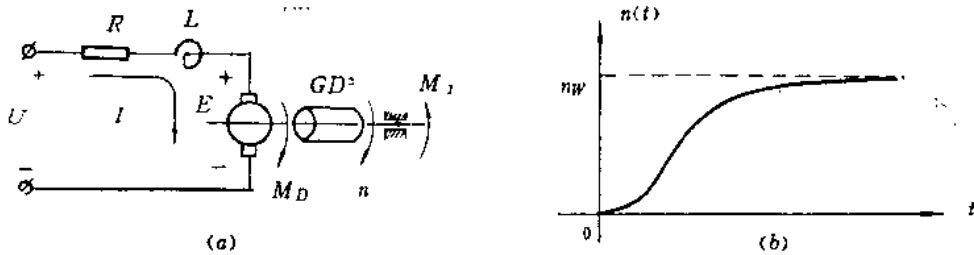


图 2-1 直流拖动系统及其转速特性

$$T_M T_a \frac{d^2 n}{dt^2} + T_M \frac{dn}{dt} + n = n_w \quad (2-1)$$

式中 T_M, T_a 是拖动系统机电时间常数和电磁时间常数， n_w 为稳定运转速度，当改变 T_M, T_a 以及 n_w 时，可获得不同的过渡过程规律。当系统参数 $(4T_a/T_M) < 1$ 时，系统转速 $n(t)$ 的动态运动规律如图 2-1(b) 所示。

又如图 2-2(a) 所示由 R, L, C 元件组成的电路系统，描述它的运动方程也是一个二阶常系数线性微分方程，如式 (2-2) 所示，

$$T_L T_C \frac{d^2 I}{dt^2} + T_C \frac{dI}{dt} + I = I_w \quad (2-2)$$

式中 T_L 是感性时间常数， T_C 是容性时间常数， I_w 是稳态电流值，同样改变参数 T_L, T_C 或 I_w 时，系统的规律也将不同。如在 $(4T_L/T_C) < 1$ 条件下，其变量电流 I 的过渡过程规

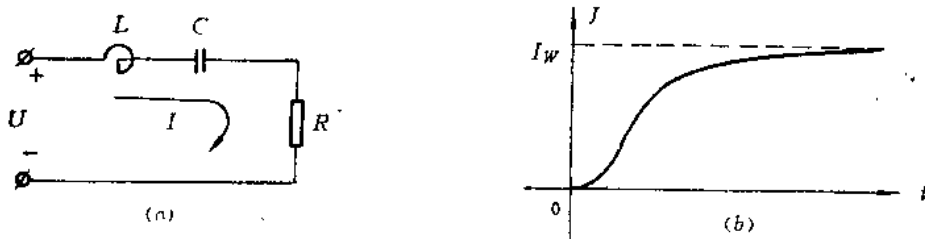


图 2-2 R, L, C 电路及其电流特性

律，如图 2-2(b) 所示。比较图 2-1(b) 和图 2-2(b)，虽然它们是两种不同物理结构的系统，但其运动规律是相似的。

同样的道理，还可以找出其他物理系统，其动力学运动方程式是二阶常系数线性微分方程，它们的系数一一对应，其变量的运动规律也是相似的。如机械系统中惯性、阻尼、摩擦振荡系统等。实际系统，尽管机理不同，元件万千，环节众多，可以是电、液、汽、机械等部件组成，但它们之中有很多系统的微分方程形式相同，参数对应，且运动规律相似。自然社会中这些普遍存在的相似规律称为相似原理。这种相似原理提供了数学仿真的客观基础。

例如前面举出的两个例子，就可以互相利用其中一个系统模拟另一个系统的运动，来研究系统的行为。一般都是用比较简单、方便的电子元件组成的系统做为模型来对原系统（也称原型）进行模拟。

这种把整个系统用电子元件组成的模拟系统直接进行模拟的办法称为直接相似法。例如矿山通风网路电模拟系统就是属于直接相似法模拟系统。利用直接相似法组成的模型其通用性差，当更换一个原系统时，就只好重新构成一个模型。为提高应用上的灵活性和通用性，根据相似原理用电子元件组成典型的数学运算环节，如加法器、乘法器，积分器、函数发生器等，然后根据数学模型求解的形式，把这些电子运算器连接起来组成解算系统进行模拟，这种模拟称为间接相似法。电子模拟计算机就是这种间接相似法的典型装置，所以，具有众多电子元件组成的各类运算器的模拟装置称为电子模拟计算机。

最简单的电子模拟计算机框图如图 2-3 所示。其运算器是由线性运算部件和非线性运算部件组成，线性运算部件包括：比例加法器、比例积分器、反号器、系数器等，非线性运算部件包括函数发生器、继电器，典型非线性部件等，它们可以完成加、减、乘、除、积分等运算，是模拟计算机的核心部分。排题板，它是把所有运算部件的输入和输出端口都集中在排题板的板面上，以使用户根据数学模型的排题框图用导线连接起来，完成仿真运算，运算结果通过排题板输出。

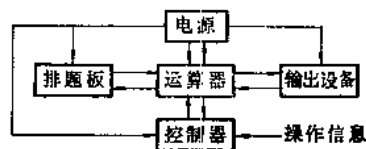


图 2-3 模拟计算机示意图

输出设备是把模拟计算结果，通过记录或显示设备输出。控制器是控制计算机处于各种不同运算状态的装置。例如，设置、静校、计算、保持、复原等状态，都是由操作人员通过开关设置的。

模拟计算机仿真的大致程序是：首先根据物理系统的数学模型转化为模拟计算机的机器框图，其次，选择幅值比例尺和时间比例尺，确定运算器的系数值，通过排题板排题，静校，通过控制器运算，把仿真结果输出。

2.2 模拟计算机的线性运算部件

线性运算部件是把输入量进行线性运算，然后输出。它的特点是输出量与输入量之间的关系是线性的。能完成线性运算的部件主要是线性放大器，它是各种运算器的基础。下面着重分析运算放大器的特性和参数关系以及影响运算精度的因素。