

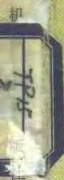
高等学校试用教材

控制系统计算机仿真

东北工学院 任兴权 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社



高等学校试用教材

控制系统计算机仿真

东北工学院 任兴权 主编



机械工业出版社

前 言

系统仿真技术是建立在系统科学、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,它是分析、综合各类系统的一种研究方法和有力手段。

系统仿真技术近年来在我国发展迅速,应用很广,不仅限于工程系统应用,在非工程系统也应用极广。例如,在工程系统中的钢铁、机械、电力、石油、化工、动力、交通、能源、水力、核工业,航天、航空、航海等方面和在非工程系统中的管理、社会、经济、人口、生物、生态、海洋、气象、环境、医学以及农业、林业、军事、国防等方面均有广泛的应用。

本书受专业方向所限,只研究工业自动控制系统方面的计算机仿真技术,它是工业电气自动化专业的选修课教材。

本书是依据原全国高等工业学校自动化类专业教材编审委员会1983年于福州会议制订的“控制系统计算机仿真”教学大纲编写的,并经原全国高等工业学校自动化类专业教材编审委员会自动控制理论组于1985年进行评选,被选定为高等学校试用教材。

本书共分八章,第一章绪论,概括地介绍系统仿真基本概念、内容、应用和发展。第二章模拟计算机仿真,简要介绍模拟计算机的部件和仿真方法。第三章连续系统数字仿真,重点介绍连续系统模型、算法和仿真程序、仿真程序包、仿真语言。第四章采样控制系统数字仿真,介绍采样系统模型、算法、程序。第五章控制系统参数最优优化计算机仿真,介绍参数寻优的概念和单变量、多变量寻优程序。第六章单变量系统的计算机辅助设计,介绍绘制频率特性、根轨迹以及校正环节设计程序。第七章多变量系统的计算机辅助设计,主要介绍线性二次型最优调节器、黎卡提方程、状态反馈极点配置和状态观测器仿真程序。第八章数字-模拟混合计算机系统与仿真,简单介绍HAF-2/TJS-130混合计算机系统硬件、软件和应用。

全书各章均有仿真程序和应用举例,书后附录备有15种仿真程序清单,各章均附习题,要求学生能独立上机操作、使用程序、分析结果,以便掌握仿真的原则和方法。

本书第一章、第三章6~8节、第七章1~3节、第八章由东北工学院任兴权教授编写;第二章、第三章1~6节由陕西机械学院万伯任副教授编写;第四章、第五章由东北工学院姚建宇教授编写;第六章、第七章4~5节由陕西机械学院市政端副教授编写;全书由任兴权教授主编。

本书由华中工学院涂健教授主审,并于1986年在西安召开审稿会,与会同志对本书初稿提出很多宝贵意见,编者表示深切的感谢。

本书所提供的全部程序清单分别由东北工学院系统仿真研究室杨桦同志、研究生边晓春同志、陕西机械学院自动控制实验室及李守智、王华民同志协助上机调试,在此特向他们表示感谢。

由于我们经历和水平有限,错误和缺点在所难免,敬请读者提出批评改进意见。

编者

1987

目 录

前 言

第一章 绪 论	1
§ 1-1 系统仿真基本概念	1
§ 1-2 系统仿真基本内容	2
§ 1-3 系统仿真技术的应用	6
§ 1-4 系统仿真技术现状与发展	8
§ 1-5 本课程的目的和要求	9
第二章 模拟计算机仿真	10
§ 2-1 概 述	10
§ 2-2 模拟计算机线性运算部件	11
§ 2-3 模拟计算机非线性运算部件	14
§ 2-4 模拟计算机仿真方法	20
习题	34
第三章 连续系统数字仿真	35
§ 3-1 一阶微分方程的数值解法	35
§ 3-2 面向微分方程的数字仿真程序	44
§ 3-3 面向结构图数字仿真的程序	57
§ 3-4 连续系统离散相似法数字仿真程序	67
§ 3-5 具有典型非线性环节控制系统的数字仿真程序	74
§ 3-6 连续系统快速数字仿真程序	81
§ 3-7 连续系统数字仿真程序包——CSS	91
§ 3-8 数字仿真语言简介	116
习题	118
第四章 采样控制系统数字仿真	120
§ 4-1 采样过程的数学分析及扩展z变换	120
§ 4-2 差分方程及数字控制器	124
§ 4-3 纯滞后环节和差分方程的数字仿真	134
§ 4-4 采样控制系统的数字仿真程序及应用举例	136
习题	153
第五章 控制系统参数最优优化计算机仿真	154
§ 5-1 参数最优优化	154
§ 5-2 单变量最优技术	155
§ 5-3 多变量最优技术	162

习题	187
----	-----

第六章 单变量系统的计算机辅助设计

§ 6-1 计算机绘制频率特性、伯德图乃氏图	188
§ 6-2 计算机绘制根轨迹	209
§ 6-3 计算机设计校正环节	221
§ 6-4 采样系统计算机频域分析和设计	230
习题	231

第七章 多变量系统的计算机辅助设计

§ 7-1 线性二次型最优控制理论简述	233
§ 7-2 黎卡提方程数值求解与数字仿真程序	236
§ 7-3 线性二次型最优调节器设计程序	239
§ 7-4 状态反馈极点配置的设计程序	245
§ 7-5 状态观测器的设计程序	253
习题	259

第八章 数字-模拟混合计算系统仿真

§ 8-1 HAP-2/DJS-130混合计算系统简介	261
§ 8-2 HAP-2/DJS-130混合操作软件HYBASIC	267
§ 8-3 混合计算中的误差	273

参考文献

程序汇编资料目录	282
----------	-----

一、第三章程序1 SP3-1	282
连续系统面向微分方程数字仿真程序	282
二、第三章程序2 SP3-2	284
连续系统面向结构图数字仿真程序	284
三、第三章程序3 SP3-3	287
连续系统离散相似法数字仿真程序	287
四、第三章程序4 SP3-4	289
连续系统推广矩阵法快速数字仿真程序	289
五、第三章程序5 SP3-5	292

连续系统数字仿真程序包——CSS	292
六、第四章程序1 SP4-1	296
采样控制系统数字仿真程序	296
七、第五章程序1 SP5-1	298
共轭梯度法优选PID参数数字仿真程序	298
八、第五章程序2 SP5-2	299
单纯形法优选PID参数数字仿真程序	299
九、第六章程序1 SP6-1	301
典型开环传递函数绘制伯德图程序	301
十、第六章程序2 SP6-2	303
结构图直接求取系统频率特性程序	303
十一、第六章程序3 SP6-3	307
计算根轨迹数字仿真程序	307
(一) SP6-3-1	307
(二) SP6-3-2	310
(三) SP6-3-3	316
十二、第六章程序4 SP6-4	318
计算机设计校正环节仿真程序	318
十三、第七章程序1 SP7-1	318
黎卡提代数方程迭代法数字程序	318
十四、第七章程序2 SP7-2	320
线性二次型最优调节器设计程序	320
十五、第七章程序3 SP7-3	323
多变量状态反馈零极点配置及状 态观测器设计程序	323

第一章 绪 论

§1-1 系统仿真基本概念

这一章我们将介绍什么是系统仿真，它包括哪些内容，有什么用途。这些将作为我们建立系统仿真的基本概念。

一、系统

系统 (System) 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物质世界中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，这个整体称为系统。近来由于计算机科学的进步，又为系统的分析和综合增添了定量计算的工具，从而形成了系统科学这一新的学科。

工程系统的定义是指由相互关联的部件组成一个整体，实现特定的目标。例如工业自动化系统是由执行部件、功率变换部件、检测元件等组成控制系统，完成某一参量调节或控制的目的。其它如电力系统、化工系统、石油系统等含意也都符合上述工程系统的定义。非工程系统范围更广泛，大至宇宙、自然、人类社会，小至粒子、细胞部普遍存在着相互关联、相互制约的事物，它们形成一个整体，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、动物等相互依存又相互制约的事物构成的一个整体，保持着平衡的关系。其它如海洋系统、气象系统、生物系统、经济系统、交通系统、人口系统等也是由许多相互关联、相互制约的众多事物构成的一个整体，按着某一目的运动着。

建立系统的概念的目的在于深入认识并掌握系统的运动规律，不仅定性地了解系统，还要定量地分析、综合系统，比较准确地解决工程、现代社会和自然中种种复杂问题，以便获得更大的效益。定量地分析、综合系统的最有效的方法是模型法。

二、模型

模型 (Model) 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，将具有更深刻、更集中的特点。模型分物理模型和数学模型两种，由于计算机发展迅速，应用广泛，数学模型更被人们重视。数学模型是描述系统动态特性的数学表达式，它表示系统运动过程各量之间的关系，是分析、综合系统的依据。

数学模型从建立方法上可分为机理模型、统计模型和混合模型。机理模型采用演绎方法，运用已知定律或定理，用推理方法建立数学模型；统计模型采用归纳法，它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；混合模型是理论上的逻辑推理和实验观测数据的统计分析相结合的模型。数学模型从所描述的系统运动性质和所用数学工具的特征来分：有线性、非线性、时变、定常、连续、离散、集中参数、分布参数、确定、随机等系统模型。

分析数学模型的方法有解析法和实验法。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，因而多采用实验方法，而实验方法又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,因而多注重在模型上实验。对于在物理模型上实验,则由于物理模型建立周期长、投资大、灵活性差、重复利用率低等原因,而多在数学模型上进行实验,对系统进行分析、设计,这也是计算机技术和数值计算方法发展的结果。

建立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,并为系统提供设计、管理、控制的资料。

三、系统仿真

系统仿真 (System Simulation) 就是在系统数学模型的基础上,以计算机为工具对系统进行实验研究的一种方法。系统仿真就是根据真实系统的数学模型建立仿真模型,然后依靠仿真模型编制程序,在计算机上进行计算、分析、研究,获得真实系统的定量关系,对真实系统加深认识和理解,为系统设计、调试或管理提供所需的信息、数据或资料。

综上所述,系统仿真过程和各学科的关系可用图1-1所示框图说明。系统仿真技术是建立在系统科学、系统辨识、控制理论,计算机技术与控制工程等学科的基础上的一门综合性很强的实验科学技术,它是分析、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。

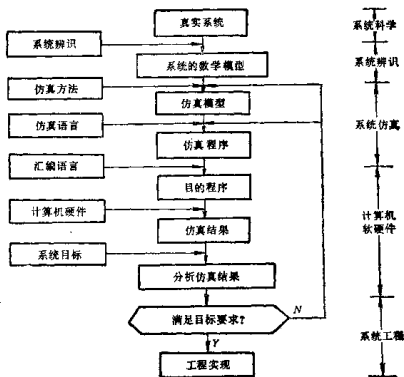


图1-1 系统仿真过程框图

§1-2 系统仿真基本内容

一、模拟计算机与模拟仿真技术

模拟仿真是建立在相似原理的基础上的。很多工程动力学系统都具有相似性,例如加热炉的温度变化规律,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

器上的电压变化规律等,虽然它们的物理系统不同,但数学模型是相同的,都可以用一阶线性微分方程来描述,因而它们变量的运动规律是相似的。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。当仿真某一系统时,依照系统数学模型的结构和参数,将这些基本运算器连接起来组成仿真系统,完成求解任务。这种具有多种运算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,因此使用方便,而且经济。

利用模拟计算机作主要工具进行系统模型运算和研究,称为模拟仿真技术。它主要包括:依照系统数学模型,用逐阶递降的方法将它变成模拟仿真模型,再考虑合适的幅值、时间比例尺,排成模拟仿真框图,进行排版,然后调试、运行,得出响应。最后再分析所得结果,如达不到要求,则修改模型的结构或参数,再进行运算,反复研究直到得出预期的结果,仿真才算终止。

模拟仿真的主要特点是运算速度快,可以满足实时仿真的要求,在一些纯数学模型的运算中可实时运算或超实时运算,所以在一些系统中将模拟仿真用于实时仿真以及实现系统参数寻优和随机过程的统计特性等方面的研究。此外,更主要的是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,而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直到目前仍是分析、综合、设计以及调试工程系统所不可缺少的有力工具。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,这是受了所用器件精度的限制。线性器件精度可达 $(0.1\sim 0.2)\%$,非线性部件精度达 $(0.3\sim 0.5)\%$,而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还要下降,大约达到 $(10\sim 20)\%$ 。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。

二、数字计算机与数字仿真技术

数字仿真的基础是数值计算原理,因为数字仿真的主要工具是数字计算机,它是用二进制数码表示数值大小的一种数字运算装置。所以,求解系统数学模型时都要用数值计算方法将其转换成用数字计算机能够实现运算的仿真模型,然后选用计算机能够识别的语言,按照仿真模型编写仿真程序,输入数字计算机,由计算机逐条执行程序所规定的内容,完成系统分析的任务,这种实现系统研究的方法称为数字仿真技术。数字仿真的前提是系统的数学模型和仿真模型,数字仿真的工具是数字计算机,而其主要内容是数值计算方法、仿真程序和仿真语言以及上机操作。

数值计算方法是针对系统数学模型进行数值求解,以备数字计算机计算之需。古典数值方法有欧拉法、梯形法、预估-校正法、龙格-库塔法、阿达姆斯方法等。近代工程的离散化算法中有丢斯丁代替法、状态转移法、增广矩阵法、雅匹配法等。

仿真程序是按照系统仿真模型和选用的通用高级语言编制的,有些常用的通用程序被编成子程序,以便重复调用,而对专门问题则被编成应用子程序,存于程序库中,或者组成通用的仿真程序包,以便系统研究工作者使用。

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的基础上,针对专门问题研制的,分为面向方程和面向框图两种类型的仿真语言,常用的仿真语言中,连续系统应用的有CSMP(Continuous System Modeling Program), CSS(Continuous System Simulator), CSSF(Continuous System Simulator-FORTRAN), CSSL(Continuous System Simulation

Language), ACSL(Advanced Continuous Simulation Language), DARE-P(Differential Analyzer Replacement-Portable)等; 离散系统应用的有GPSS(General Purpose Simulation System), GASPIV(General Activity Simulation Program IV)等。

综上所述, 数字仿真技术就是依照真实系统的数学模型用数值算法转化为仿真模型, 选用通用语言, 编写仿真程序, 或选用仿真语言, 上机实验的过程。数字仿真也有不足之处, 主要是运算速度相对于模拟计算机来说还比较慢, 这主要是数字计算机按编制的程序逐条串行执行的结果, 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, 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。

三、混合计算机与混合仿真技术

随着技术的发展, 出现一些单独应用模拟计算机仿真或单独使用数字计算机仿真都不能满足要求的问题。为此, 在80年代初期研制一种充分发挥数字计算机和模拟计算机各自特长的混合计算机, 它是将模拟计算机和数字计算机通过中间接口连接起来的一种混合计算系统。例如, 应用混合计算系统对飞行器仿真, 可以把响应速度高而精度相对低的姿态运动动力学模型放在模拟机上运算, 而把精度要求高而响应速度要求低的轨道运动动力学模型部分由数字计算机进行仿真。

混合计算机的硬件包括三个部分: 数字计算机、模拟计算机及两机交换信息的中间接口。混合计算机中的模拟机主要担负快速运算工作, 在工作中受数字计算机控制, 自动高速运算, 所以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, 对整个混合计算系统进行管理、控制。把中间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的内存容量大, 它除存放一般计算机的软件外, 还要存贮管理、控制模拟机和中间接口的程序。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。混合计算机的中间接口是用来完成两机之间信息转换及传送的硬件, 受数字机控制和管理, 接受数字机指令进行操作。对中间接口的要求是高速转换和精确传递信息。

混合计算机的软件包括操作系统、编译及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(Analog Programming and Checking)系统, 是一种面向问题的高级仿真语言, 工作人员可以方便地用微分方程、代数方程或通用函数的原始形式来书写输入程序, 其编译程序输出为比例尺、静校值、标题板部件分配和连线的描述。ACTRAN(Analog Compiler and Translator)系统是使用ACTRAN语言设计的, 经过一次编译后给出FORTRAN语言程序, 再次编译为目的程序, 最后在混合计算机中执行。ACTRAN编译系统的输出是编译指令和元件表, 给出数字机的子程序和中断程序, 以及模拟机设置的数据表等。又如混合系统时操作及检验软件例如, HELPI(Hybrid Executive Linkage Programme)系统, 它的基本指令包括: 状态控制指令、输出指令、定时指令、逻辑指令、系数设置指令及静校指令等。HYTRAN(Hybrid Translator)系统, 是用来辅助模拟程序员工作的软件, 它的输入是描述系统的方程、模拟运算器的配置和连接以及比例尺, 而由它计算并输出静校值和程序文件。HOI(Hytran Operation Interpreter)系统是在HYTRAN系统基础上研制的一种面向问题的程序, 它用于数字机和中间接口部分的程序设计。还有混合仿真软件, 如SIMPI-1(Simulation Implement Machine Programming Language)系统。自动排版软件, 如HAL(Hy-

brid Assembly Language)系统,是给出在模拟板上连接指令的,例如对积分器,软件系统可给出其连接方式。

混合仿真过程包括下列内容:首先,依照系统的数学模型确定求解的方法,分配模拟机或数字机的计算任务;其次,设计模拟机排题框图,选择比例尺,决定静校值;再次,设计中间接口的连接关系,对数字计算机选择算法,编写仿真程序;然后联机调试,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,读入初始数据等;最后联机操作,分析仿真结果,改变参数后再进行计算,并最终对仿真结果进行分析、评价。

混合计算机是分析、综合现代控制工程的有力工具。60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。直至今日也仍是高速实时半实物、实物仿真以及飞行器培训仿真器方面研究的主要工具和手段。

四、全数字并行处理计算机与仿真

随着数字计算机与数字仿真技术的发展,对普通数字计算机提出了越来越高的要求,例如大区域的气象预报、社会系统或经济系统的预测、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每秒大于 10^{10} 次。尽管通用计算机速度逐年有所提高,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时间延迟的限制,难于满足不断发展的技术要求。近年来主张变过去计算机串行处理信息的结构方式为并行处理信息的结构方式,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义:一种是多处理机技术(Multiprocessor),它是多机并行,分别完成各自独立的作业;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,即利用多台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),如R-100计算机。小型超级计算机(Mini-Supercomputer),例如CDC-MAP计算机。专用小型并行处理机,例如AD-10计算机。

我国研制的银河仿真计算机YH-F1属于小型并行处理机一类,适用于连续系统仿真,特别是时间要求苛刻的大型动态系统的实时或超实时仿真。它具有以下特点:①高速度运算能力,YH-F1机的极限速度可达每秒一亿七千万个操作;②容量大,YH-F1计算机的数据存储容量达1百万字,可满足存放多变量函数数据的要求和处理四百个状态变量的方程的需要。③精度高,YH-F1机采用定点16位字长,当幅值为1时,最低位的1代表三万分之一。银河机的积分处理机字长48位,这可保证高的积分精度。YH-F1机的系统结构框图如图1-2所示。它是异构型多处理机共享同步多总线的计算机系统。通过多处理机合作,获得高运算速度;通过不同处理机的不同结构,满足各种结构化与非结构化计算任务的需要;大容量数据存储器是存放大量函数数据所必需的;独立的多I/O通道可直接与被仿真实物相连;多总线共享结构可容易地扩充新的处理器。

银河仿真机的软件有:①交叉工具汇编软件YFASM,它是在控制管理机上对用户汇编语言的源程序进行编译,然后产生在仿真机上可运行的目标代码程序。②高级仿真语言YF-MPS,它是用户使用仿真机的主要软件,采用模块结构,用户用高级仿真语言编写仿真程序,然后在控制管理机上由YFMPS编译出目标程序执行,它还有交互命令,可用于调试目

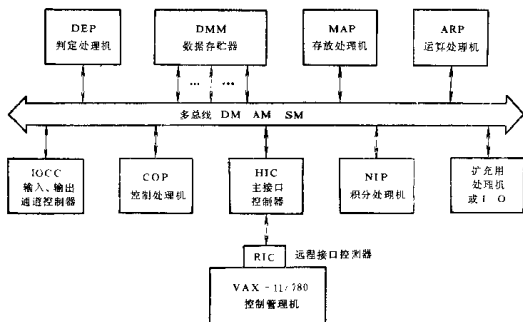


图1-2 银河仿真计算机结构框图

标程序，修改参数及比例尺，选择积分方法等。③模拟器YFSML，它是调试仿真程序的工具，利用YFSML在控制管理机上解释执行目标程序，用来检查程序的正确与否，比例因子是否恰当等。④交互执行程序YFX，它也是调试工具。这种软件提供一整套命令，可使仿真目标程序及数据文件进入仿真机，控制仿真机中程序运行状况，了解仿真机现场信息，修改仿真机中程序与数据等。

银河仿真计算机可用于大型动态连续系统的实时或超实时仿真，如航空、航天、能源、核工业以及电力系统等技术领域。

§1-3 系统仿真技术的应用

系统仿真技术是分析、综合各类系统的一种有力的手段和工具。它目前已广泛的应用于几乎所有科学技术领域。

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。

一、系统仿真技术在系统的分析、综合方面的应用

各技术领域控制系统的分析、设计以及系统调试、改造都应用系统仿真技术。在工程系统方面，例如在设计开始阶段，利用仿真技术论证方案，进行经济、技术比较，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，可以迅速完成调试任务；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态，预防事故发生，寻求改进薄弱环节，以提高系统的性能和运行效率。

对设计任务重、计算工作量大的系统，可建立系统设计仿真器或系统辅助设计程序包，使设计人员节省大量设计时间，提高工作效率。

在非工程系统方面对企业管理、经济分析、市场预测、商品销售等也都应用仿真技术。例如用仿真技术可以建立商品生产和公司经营与市场预测模型,如图1-3所示。从图可见,根据市场信息,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、生产模型。其它如交通、能源、生态、环境等方面的大系统分析都应用仿真技术。例如人口问题的分析也应用仿真技术预估今后人口发展的合理结构,制定人口政策。又如研究区域动力学模型,分析整个区域中人口增长,工业化速度、环境污染、资源消耗、粮食生产、社会福利、教育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。

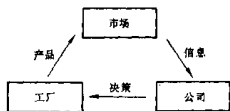


图1-3 经济模型框图

二、系统仿真技术在仿真器方面的应用

系统仿真器(System Simulator)是模仿真实系统的实验研究装置,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件、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:座舱与其运动系统、视觉系统、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,训练在事故状态飞行、排除故障的技能、允许飞行员错误操作,这样可以提高飞行技术。使用飞行仿真器可以减少危险,确保安全,节省大量航空汽油,减少环境污染。如波音747仿真器每天按20小时架次训练,则一年可节省30万t航空汽油,可见经济效益十分明显。培训仿真器在航空、航天、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。

设计仿真器,一般包括计算机硬件、软件和被研究系统的应用软件,以及大量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,还可以方便地改变系统结构或参数,提高工作效率。此外,在电机、变压器或其他具有大量计算工作量而且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。

综上所述,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。

三、系统仿真技术在技术咨询和预测方面的应用

根据系统的数学模型,利用仿真技术输入相应数据,经过运算后即可输出结果,这种技术目前应用在很多方面。例如专家系统、技术咨询和预测、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图,然后存入计算机,建立知识库,设计管理软件,根据输入的原始数据,按照规定的专家知识推理、判断、给用户提供咨询。由于这种软件是模拟专家思考、分析、判断的,实际上起到专家的作用,所以被称为专家系统。我国目前研究比较多的是中医诊断专家系统,它是将医疗经验丰富、诊断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的功效。除医疗之外,如农业育种专家系统,它

自动计算选择杂交的亲本,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,起到咨询的作用。

预测技术在很多领域应用,例如应用地震监测模型根据监测数据预报地震临报;森林火警模型根据当地气温、风向、湿度等条件预报火警;人口模型预测人口今后结构。

应用系统仿真技术对那些反应周期长,而且难于观察、试验或消耗巨额资金的自然环境、生态系统、人口结构、生理、育种、导弹、军事、国防等类事物,可以在短期容易实现的模型上进行分析、试验后预报结果,这是仿真技术所具有的独特功能,所以在这方面的应用逐渐扩大,极有发展前途。

§1-4 系统仿真技术现状与发展

系统仿真技术,从50年代以来随着计算机发展的过程,逐渐形成了一门新兴科学技术。例如,仿真计算机经过模拟计算机、数字计算机、混合计算机、全数字并行处理计算机的演变过程,相继出现了模拟仿真、数字仿真、混合仿真、全数字并行处理仿真技术。仿真软件也由数值计算方法、仿真语言逐步扩大丰富。时至今日,仿真技术已经应用在各技术领域、各学科内容和各工程部门。要想比较全面的介绍仿真技术现状和发展,将不是用比较简单的叙述就可说清楚的问题,本节只对仿真技术中发展较快并引人注目的一些主要问题进行简单介绍。

一、仿真计算机的现状 & 发展

我国仿真技术的发展,早从50年代就开始,主要是在航空、国防单位,以模拟仿真为主。数字仿真技术还从70年代在一些科研机关、设计院以及高等院校逐渐发展起来。目前所用仿真计算机主要都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系列机和一些引进的各种类型的微型机。混合机方面多用国产的TDMJ-1、HMJ-200以及DJM300/DJS130、HAP-2A/DJS130等。全数字并行处理计算机YH-F1已研制成功。

国外仿真计算机已发展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。混合机往混合多处理机系统方面发展。

从大型实时仿真系统的发展来看,关于仿真计算机的发展,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。另一观点是往全数字仿真计算机发展,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。

二、计算机仿真软件的发展

计算机仿真软件在我国多数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LARE-P等,离散系统仿真语言GPSS及GASP IV等。但近年我国自行研制的软件逐渐增多,如SBASIC、SSL-III一类解释功能扩充的语言,SDS-A连续系统仿真程序包,此外还有混合操作语言HYBASIC等。

在国外,仿真软件发展的较早,近年也比较活跃,如早期的连续系统语言MIDAS、MIMIC、CSMP、CSSL、CSSL IV、DARE-P以及近年发表的ACSL等,离散系统仿真语言GPSS、SIMSCRIPT II、GPSS IV等,在混合机软件方面有ECSSL、HYSHAKE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。

三、仿真器的现状与开发

仿真器的开发应用是系统仿真技术直接应用的成果,它带来明显的技术、经济效益,我国目前主要在航空、航天、航海方面得到应用。例如从国外引入的波音707、三叉戟飞机培训仿真器。我国自行研制的航线起落飞行仿真器、CCF-2S船舶操纵训练仿真器等。在设计仿真器方面有多变量反馈系统设计程序包类的设计仿真器。

由于应用各类仿真器除带来经济效果外,在有些领域中还可以完成特殊功效,所以今后应大力开展仿真器的研制与应用,这也是仿真技术直接应用的一个方面。

§1-5 本课程的目的和要求

通过前面所述,对系统仿真技术概念、内容和应用、发展前景等方面有了一个概括的了解。系统仿真技术涉及面很广,内容很多,应用范围也相当广泛。例如,从工程系统到非工程系统,从线性系统到非线性系统,从连续系统到离散系统,从系统模型到数值计算方法,从模拟计算机到数字计算机,从混合计算机到全数字并行处理计算机,从仿真程序到仿真语言,从硬件到软件,从理论到应用,均涉及到。但本课程的内容,因受专业方向规定,只限于研究工程自动控制系统,而且主要是连续系统单变量、多变量控制系统模型的仿真。根据教学要求,着重培养学生的基本能力。教材内容着重于使学生掌握最基本的仿真方法和仿真程序,为学生继续研究各类系统,从事仿真工作,打下一个基础。而对大量的仿真程序包或仿真语言,不能都在课堂分析,但应教给学生使用编制、修改仿真程序的能力。要求学完本课后能掌握用数字计算机仿真技术进行分析、研究实际控制系统的原则和方法,例如:根据系统数学模型选择数值算法、确定系统仿真模型、编写程序、修改大型程序包和使用仿真语言、上机操作、优选参数、结果分析等一般方法。此外对模拟计算机也要求能掌握仿真方法和步骤,如编制模拟框图、确定比例尺、排版、校验以及结果分析的方法。要求学生在模拟计算机和数字计算机上做仿真实验和完成有关的习题和作业,通过这些来提高学生的独立工作能力。

第二章 模拟计算机仿真

§2-1 概 述

本章介绍如何利用模拟计算机来模拟一个物理系统的微分方程或其它方程，并求解。本章的目的是了解模拟仿真设备及模拟仿真方法。下面举一个简单例子来说明模拟计算机求解常微分方程的工作原理。

设待求解的物理系统的微分方程为

$$A \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Cx = F(t) \quad (2-1)$$

$$\text{初始条件: } \begin{cases} \frac{dx}{dt} \Big|_{t=0} = 0 \\ x \Big|_{t=0} = x_0 \end{cases} \quad (2-2)$$

在求解时先将方程式 (2-1) 的最高阶数项放在等式的左边，其余各项移至等式右边，即

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{B}{A} \frac{dx}{dt} - \frac{C}{A} x + \frac{1}{A} F(t) \quad (2-3)$$

如用一只三个输入端的运算放大器作加法器，将上式右边各项相加便可得到 $\frac{d^2 x}{dt^2}$ 。有了 $\frac{d^2 x}{dt^2}$ 以后，只要将它连续积分两次，便可得到 $\frac{dx}{dt}$ 和 x ，由此便得到了此微分方程的解。其运算框图如图2-1所示

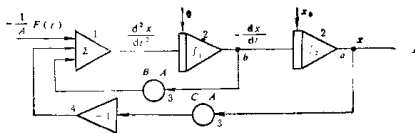


图2-1 解题框图

1—加法器 2—积分器 3—系数为B/A及C/A的运算部件 4—反号器

从上面分析可知，为了完成解此常微分方程的任务，模拟计算机必须具有下列基本运算部件：

1. 能完成乘以常系数的运算部件，称为系数器或衰减器。
2. 能完成反号运算的部件，称为反号器。
3. 能完成积分运算的部件，称为积分器。

4. 能完成加法运算的部件,称为加法器。
5. 能产生作用信号的部件,称为信号发生器。

将这些运算部件恰当的组合,形成一个解题电路,就可以完成解题任务。由图2-1可清楚地看到,整个解题电路是一个反馈系统,而这个反馈系统所表示的方程式与要解的方程式相符合,图2-1中的 a 与 b 上的信号(电压),也就是方程式的解答 x 及其一次导数 $\frac{dx}{dt}$ 。另外为了满足原微分方程的初始条件,则在积分器上还须设置初始条件的附加装置。也就是说,为了满足方程式(2-2)需要在积分器上加有初始电压以保证该电路在刚刚开始工作时, a 点上的信号(电压)为 x_0 。由于此题设 $\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = 0$,所以在积分器1上不须加初始电压。

通过这一简单例子,介绍了如何利用运算部件组成电路求解微分方程的原理。实际模拟计算机除了线性和非线性运算部件以外(它们是模拟计算机的核心部分),还需要对模拟计算机的监督及控制部件、对解答的显示和记录部件以及机器所需的各种电源电路。应该指出,实际利用模拟计算机求解微分方程时,还需要考虑幅值比例和时间比例以及其他问题。这些我们将在本章的各节中作详细讨论。

利用模拟计算机进行系统仿真的主要优点是:

1. 建立模型更为直接,人机联系方便,因此有可能对问题作更深入的研究。
 2. 运算操作完全是并行的,所以有较快的计算速度或系统响应。对实时仿真有重要意义。
- 其主要缺点是:
1. 解题精度较低,精度取决于计算机的部件。
 2. 存贮和逻辑功能差。
 3. 产生多变量函数十分困难。

§2-2 模拟计算机线性运算部件

从上一节介绍的在模拟计算机上解题的过程可以看出,模拟机之所以能解题,关键是它能完成各种线性或非线性运算。因此运算部件是模拟计算机中的一个主要组成部分。运算部件又分为线性运算部件及非线性运算部件。所谓线性运算部件,其输出量和输入量之间的关系为线性的。而非线性运算部件,其输出量和输入量之间的关系为非线性的。

一、运算放大器

运算放大器是模拟计算机的心脏。模拟计算机中的主要部件加法器、积分器、反号器等都是由运算放大器构成的。关于运算放大器的工作原理,已在“电子技术基础”课程中学过,这里只作一些简要的复习。

运算放大器是放大倍数极大、漏流极小、频带极宽、线性度很好、工作稳定的直接耦合放大器。图2-2就是一个由高增益直流放大器和无源运算网络组成的运算放大器。

图中 u , y ——运算放大器输入、输出电压。

Z_i ——运算放大器的输入阻抗。

Z_f ——运算放大器的反馈阻抗。

μ ——运算放大器的开环放大倍数。

当 $\mu = \infty$ 时, 运算放大器的输出-输入关系为

$$y = -\frac{Z_f}{Z_i} u \quad (2-4)$$

实际运算放大器具有许多个输入端, 如图2-3所示。则有:



图2-2 运算放大器原理图

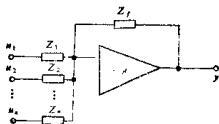


图2-3 多输入端运算放大器

$$y = -Z_f \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i} u_i \quad (2-5)$$

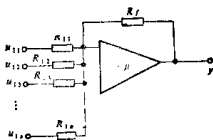
由运算放大器的输出-输入关系式得出两个重要性质:

1. 运算放大器的输出信号（电压）与输入信号（电压）符号相反。
2. 若在输入回路及反馈回路串入不同性质的阻抗, 便可实现各种不同性质的线性运算。

二、由运算放大器进行线性运算

(一) 加法器 (求和运算)

若运算放大器有几个输入信号, 为了实现求和运算, 将输入阻抗及反馈阻抗均取为电阻, 如图2-4a)所示。



a) 原理图



b) 符号图

图2-4 加法器

则

$$y = - \sum_{i=1}^n \frac{R_f}{R_{i1}} u_{i1} = - \sum_{i=1}^n K_i u_{i1} \quad (2-6)$$

在电子管式模拟计算机中通常采用 $R_i = 1\text{M}\Omega$, $R_i = R_f$ 或 $0.2R_f$ 或 $0.1R_f$, 则加法器输入端相应的增益为 1、5、10。由于这些电阻均已配备好, 因此增益 K_i 为确定的常数。使用加法器时, 人们根据需要选取不同增益的输入端。

一般在运算放大器的输入端上标以数字, 以代表该输入端的增益。如果有三个输入端其增益为 1、5、10 (见图2-4 b), 则输出为

$$y = 1u_{i1} + 5u_{i2} + 10u_{i3}$$

(二) 反号器 (反相器)