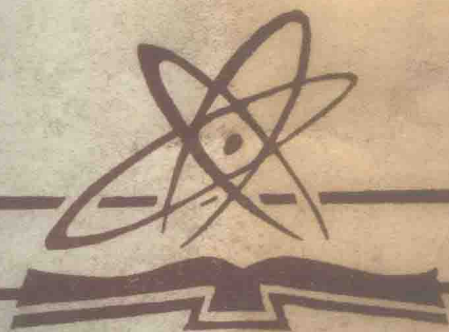


计算机仿真技术

西安交通大学

孙国基 李人厚 编著

国防工业出版社



计算机仿真技术

西安交通大学系统工程研究所

仿真研究室

孙国基 李人厚 编著



国防工业出版社

计 算 机 仿 真 技 术

西安交通大学编

孙国基 李人厚 编著

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业 营业许可证出字第 074 号

西安交通大学印刷厂印装·内部发行·

*

787×1092 1/16 开 印张 16 1/4 411 千字
1980 年第一版 1980 年 8 月第一次印刷 印数: 1—4300 册

统一书号: N. 15034 (四教 55)

定价: 1.63 元

内 容 简 介

仿真技术（或称模拟技术）是分析、研究和设计自动控制系统的有力工具。

本书讨论连续动态系统的计算机仿真技术。重点讨论模拟计算机的仿真技术，包括普通（慢速）模拟机和混合（高速迭代）模拟机的工作原理、特点及解题方法，也介绍模拟机在求解代数方程、求解偏微分方程和自动寻优等方面的某些应用。数字机的仿真技术重点介绍微分方程的变换方法和数值积分方法，并扼要叙述两种数字仿真语言——MIMIC 和 CSMP。本书最后部分简要介绍由模拟机和数字机通过接口组成的混合计算系统的构成原理、混合接口、混合软件及混合计算的误差。

本书为高等学校工科电子类自动控制专业用的统编试用教材，也可供有关专业师生和从事系统仿真、自动化方面的工程技术人员参考。

前 言

本书是高等学校工科电子类自动控制专业统编试用教材之一,是根据 1978 年 4 月四机部工科电子类自动控制专业组会议确定的大纲编写的。

《计算机仿真技术》课程的课内教学时数为 50 学时,内容包括连续系统的模拟仿真(Analog simulation)技术和数字仿真(Digital simulation)技术两部分,本书重点介绍模拟计算机的工作原理和仿真方法。在模拟仿真技术方面,重点讨论国外广泛使用的混合模拟机(第三、四章)和混合计算系统(第七章),考虑到国内目前用普通慢速模拟机进行系统仿真还比较普遍,故仍以一定篇幅(第二章)介绍它的工作原理和解题方法;在数字仿真技术方面,考虑到有关数字计算机的原理及应用另有专门课程,书中(第六章)仅介绍微分方程的变换方法及数值解法,并扼要叙述国外广泛使用的两种数字仿真语言。学习本门课程的重点是应用计算机进行系统仿真,因此除了第五章介绍模拟机应用的几个方面外,其它各章也有许多例子重点说明仿真方法。

本书作为自动控制专业高年级学生学习专业课使用,在此之前应学过“自动控制原理”、“数字计算机原理”及“算法语言”等有关课程。

本书的第一、五、六章由李人厚编写,其余各章由孙国基编写。在编写过程中得到了西安交大自控教研室仿真组全体同志的支持,此外北京无线电一厂、北京航空学院等有关单位给予了大力支持,在此深表感谢。

本书由复旦大学计算机科学系自动控制教研组的陆道政、李宗葛、岭润根、王松年等四同志主审,北京无线电一厂崔家林、胡国全、杨廷顺等五位同志也参加了审阅。他们都提出了许多宝贵意见和建议,我们都作了适当修改和采纳,对于他们的仔细审阅和具体建议表示由衷感谢。

由于编者水平有限,时间也很仓促,难免存在缺点和错误,欢迎广大读者批评、指正。

编 者 1979 年 6 月

目 录

第一章 概论

§ 1-1	仿真的基本概念	1
§ 1-2	数学仿真的分类——直接仿真和间接仿真	2
§ 1-3	模拟机仿真	4
§ 1-4	数字机仿真	6
§ 1-5	小结	9

第二章 模拟计算机的原理及仿真方法

§ 2-1	模拟计算机的线性运算部件	10
一、	直流运算放大器	10
二、	运算放大器的误差分析	13
三、	自动稳零放大器	19
四、	运算放大器的稳定问题	25
§ 2-2	模拟计算机的非线性运算部件	27
一、	典型非线性部件	28
二、	二极管函数发生器	31
三、	解析函数的产生	35
四、	乘法器	37
§ 2-3	模拟机的组成及解题方法	43
一、	模拟机的组成	43
二、	模拟机的解题方法	46
三、	模拟机的解题举例	46
§ 2-4	传递函数的模拟	62
一、	通过求解微分方程模拟传递函数	62
二、	用运算放大器和无源网络组成的复合运算部件模拟传递函数	79

第三章 混合模拟计算机的工作原理

§ 3-1	混合模拟机的组成及其特点	86
§ 3-2	混合模拟机的线性运算部件	87
一、	线性运算部件的动态分析	87
二、	积分器的状态控制	93
三、	开关加法器	96
四、	模拟存储器——跟踪保持电路	97
五、	数字系数器	100

§ 3-3	混合模拟机的逻辑部件	103
一、	模拟开关	103
二、	模拟比较器	108
三、	数字逻辑单元	110
§ 3-4	数字—模拟混合式非线性运算部件	112
一、	混合式乘法器	112
二、	混合式函数发生器	114
三、	混合式变系数部件	119

第四章 混合模拟机的控制和排题举例

§ 4-1	混合模拟机的状态控制	123
§ 4-2	混合模拟机的信号系统	126
§ 4-3	混合模拟机操作管理的自动化	129
一、	数字机控制管理混合模拟机	129
二、	自动编排题目	130
§ 4-4	混合模拟机排题举例	133
一、	小球半弹性碰撞过程的仿真	133
二、	多重积分的计算	138
三、	自动改变比例尺	141

第五章 模拟计算机的应用

§ 5-1	解代数方程	143
一、	用最陡递减法求解高阶代数方程	143
二、	多元联立线性代数方程求解	146
三、	解代数联立方程的稳定问题和稳定方法	146
§ 5-2	求解偏微分方程	151
§ 5-3	寻优过程的仿真	155
一、	参数寻优	156
二、	函数寻优	165

第六章 数字计算机仿真方法

§ 6-1	数字机基本结构及工作原理	172
§ 6-2	数字机编程序的基本方法	177
§ 6-3	微分方程的数值解法	179
一、	微分方程的变换	179
二、	泰勒(Taylor)级数法	180
三、	龙格—库塔(Runge-Kutta)法	182
§ 6-4	仿真语言 MIMIC	186
一、	MIMIC 卡片格式	186

二、MIMIC 的基本语言要素	187
三、MIMIC 语句	192
四、MIMIC 语言应用	198
§ 6-5 用 CSMP 语言进行数字仿真	201
第七章 混合计算系统	
§ 7-1 两种仿真计算机的比较	208
§ 7-2 混合计算系统的基本构成及工作原理	210
§ 7-3 D/A 和 A/D 转换	213
一、 D/A 转换	213
二、 A/D 转换	216
§ 7-4 混合计算系统的接口	221
§ 7-5 混合计算系统的软件	229
§ 7-6 混合计算的误差分析	238
一、产生误差的原因	238
二、采样和数据恢复误差	239
三、时延误差	241
四、补偿误差的方法	241
§ 7-7 结束语	243
附录 I 模拟机和数字机运算速度的一种定量比较方法	247
附录 II 国外混合计算系统的配置情况及性能指标	249

第一章 概 论

大家知道,要研究一个系统(在本书内都是研究连续的动态系统),就要对系统进行实验。研究的目的是,就是要预测系统的特性。显然,在系统未建立以前对系统是不可能进行实验的;即使对于现有的系统,如火箭发射、导弹飞行、反应堆控制等等这样复杂的系统,在实际的系统上进行试验也是不能允许的。为此,就要建立模型,并对模型进行测试和计算,获得研究系统所必需的信息。这种基于模型,而不是基于真实系统的研究过程,就叫做仿真(Simulation),或者叫做模拟或仿拟。

近年来,随着电子技术的迅速发展,电子计算机已深入到科学技术的每一个领域。用计算机进行系统仿真早已非常普遍。过去,仿真通常是用电子模拟计算机进行;随着数字计算机的硬件和软件不断更新和发展,从五十年代末开始,越来越广泛的采用数字计算机进行系统仿真。这两种计算机在进行系统仿真时都存在着固有的优点和缺陷,近年来,它们互相渗透、取长补短,各自有了新的变化和发展。

本章将首先提出有关仿真(或模拟)的基本概念,举例说明用模拟计算机和数字计算机进行仿真的基本方法,最后对两者进行比较,指出各自存在的优缺点。

§ 1—1 仿真的基本概念

仿真是系统研究的一种方法,或者说得更广泛一些,是研究自然现象或过程的一种方法。从广义来说,整个仿真过程应包括系统的测量、模型的建立和模型的计算,但一般只是指模型建立后,数学方程的计算。

通常,研究系统的模型有三种型式(见图 1-1):

1. 符号模型:用方框图来描述系统信息的流动和信息变量之间的关系(图 1-1(a))。
2. 数学模型:用数学方程来描述系统的运动或过程,例如用线性微分方程来描述某一过程(图 1-1(b))。
3. 物理模型:用缩小(或放大)了的尺寸,制作与系统原型相同的模型,模型的变量和物理系统的变量完全一样。例如飞机在进行风洞试验时,用尺寸缩小了的飞机做模型进行试验(见图 1-1(c))。

按照所用模型的不同,仿真可以分为两大类,即物理仿真(物理模拟)和数学仿真(数学模拟)。用物理模型进行仿真的,称物理仿真;用数学和符号模型进行仿真的,通称为数学仿真。

物理仿真主要应用于航空动力工程、水力工程和土木建筑工程,它的主要优点是保持了系统原型的物理本质,因此它能比较全面地表现被研究过程的物理现象。它能够观察难以用数学描述和不可能包含在数学方程中真实过程所具有的现象。另外,被调整的设备或装置可以直接连到模型上,不需要中间转换装置。然而,物理模型也具有很大的缺点,主要表现在:不同的研究对象需要不同的物理模型;被研究的对象参数改变时,模型就要改装或重新

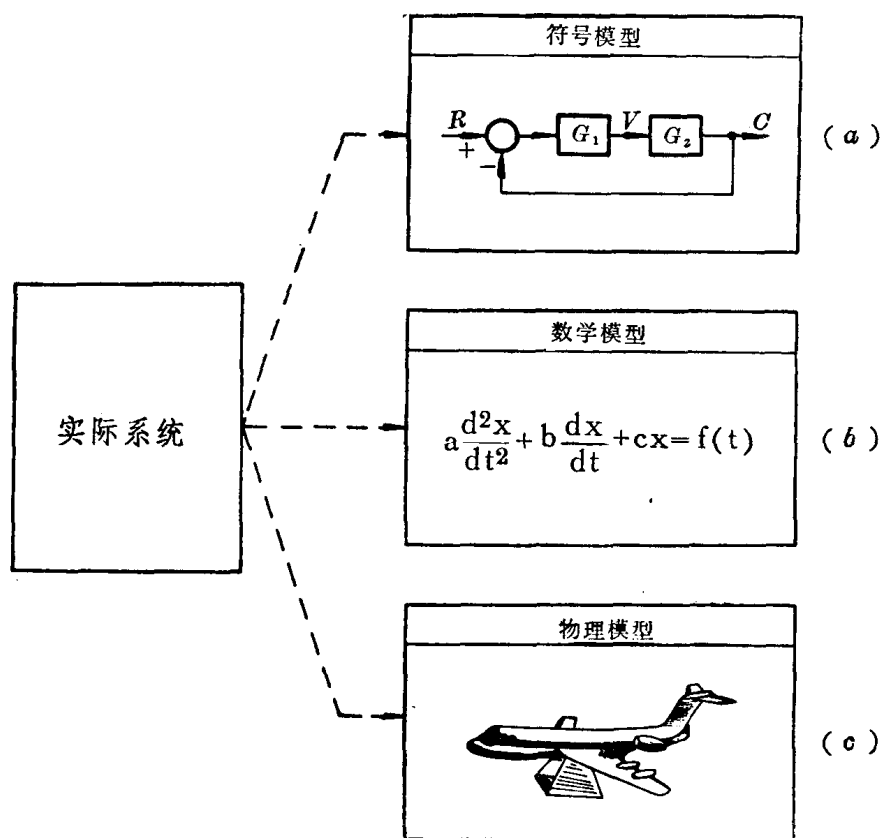


图 1-1 模型的分类

替换，这会引起很大困难；复杂对象（如各种动力装置）的模型价格十分昂贵。

数学仿真比物理仿真具有更广泛的用途，并且比物理仿真发展迅速。数学仿真中模型和原型的物理本质是不同的，但它们遵循同样的数学方程，即数学仿真利用了原型和模型之间方程式的等形性（或相似性）。数学仿真可以用一个装置解决不同种类的问题，可迅速而简易地从一个问题转换到另一个问题，可以引入可变参数和各种初始条件；可以简单地引入各种静态和随机的干扰；并且可以按系统的环节来进行仿真。本书只讨论数学仿真。

应该注意，我们不能把物理仿真和数学仿真看成是相互排斥的，实际上，在很多情况下往往是联在一起构成系统，飞行模拟训练器即是其中一例。

§ 1—2 数学仿真的分类——直接仿真和间接仿真

根据仿真的方法，数学仿真可以分为直接仿真和间接仿真，两者沿不同方向在发展。

直接仿真是用物理现象和被研究系统相似的系统构成模型，并用它来进行仿真；模型中的变量、参数和真实系统中的变量、参数存在着一一对应的关系，或者说有直接的联系。

与此相反，间接仿真是用能够进行独立数学运算的运算元件组成数学模型来进行仿真；模型和真实系统的变量和参数不存在着一一对应的关系。

为了说明两者之间的区别，我们来举一个例子。

图 1-2 是一个经典的线性质量—阻尼—弹性系统。这个系统的运动可用常微分方程来描述：

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

式中： M ——质量；

B ——阻尼系数；

K ——弹性系数；

$F(t)$ ——外加作用力；

x ——质量的位移；

初始条件： $\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = 0, \quad x \Big|_{t=0} = x_0$

在用直接仿真方法研究该系统时，我们可以用 R 、 L 、 C 的串联电路来构成模型(图 1-3)。大家知道，这个电路的回路方程为

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = E(t) \quad (1-2)$$

式中： L ——电感；

R ——电阻；

C ——电容；

q ——电荷；

$E(t)$ ——外加电势；

初始条件： $\left. \frac{dq}{dt} \right|_{t=0} = 0, \quad q \Big|_{t=0} = q_0$

由此可见，两个回然不同的系统，它们的运动方程式(1-1)和(1-2)是相似的，而且模型(电路系统)和原型(机械系统)的变量和参数一一对应。 L 对应于 M ； R 对应于 B ； C 对应于 $1/K$ ； q 对应于 x ， $E(t)$ 对应于 $F(t)$ 等等，我们可以通过对(图 1-3)电路的研究来了解(图 1-2)质量—阻尼—弹簧系统的特性。用这种直接仿真方法进行仿真的装置，也称为类比装置。由于电量便于控制和精确测量，电路元件容易制造、调整，因此常用电网络来做成类比装置，象网络分析器、交直流计算台等等都属于这类装置，它们在解决电力系统的运行、研究机器和加热设备中金属元件的温度分布状态、分析建筑工程中混凝土结构应力的分布都有着重大的作用。

如果用间接仿真方法来研究同样的系统，它首先把系统的运动方程进行变换。例如将最高导数项放在等式的左边，其它各项放在等式的右边，这样式(1-1)就变为：

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

要解这个方程，需要诸如积分、加法、反号和乘以常数等各种运算元件，有了这些运算元件就可以按图 1-4 进行连接。在加法器、积分器 1 和积分器 2 的输出端可以分别获得变量 x 的二阶导数 $d^2 x/dt^2$ 、一阶导数 dx/dt 和变量本身 x 。

用模拟计算机或数字计算机进行仿真都是属于间接仿真，下面就分别介绍模拟计算机和数字计算机的仿真方法。

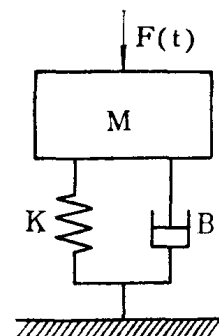


图 1-2 线性的质量—阻尼—弹簧系统

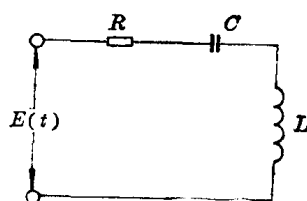


图 1-3 电路系统

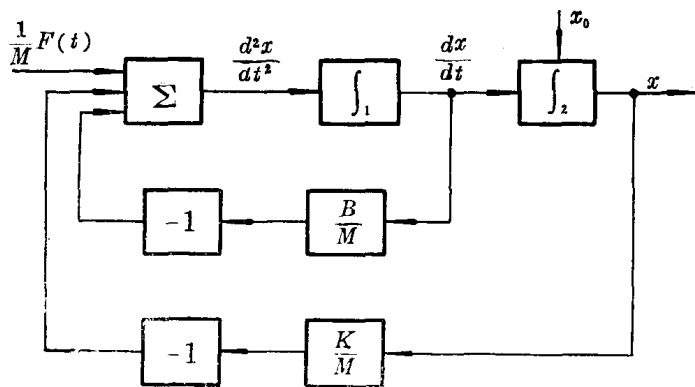
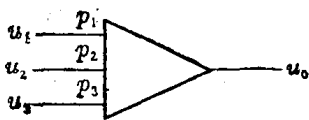
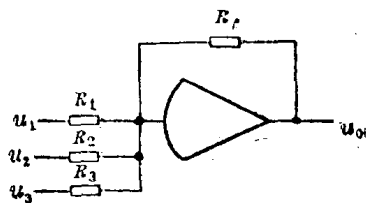


图 1-4 间接仿真的方法

§ 1—3 模拟机仿真

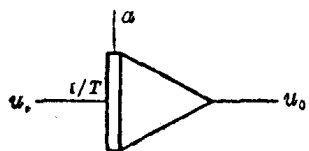
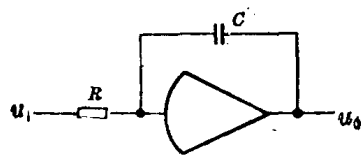
在模拟计算机中加法器和积分器主要是由直流放大器加上适当的输入和反馈阻抗组成，它们的工作原理将在第二章中详细讨论，这里先作一般性的介绍。

在图 1-5 中，我们画出了模拟机的部分线性运算部件(图 1-5(a))、它们的符号(图 1-5(b))以及输入与输出之间的运算关系(图 1-5(c))。在模拟机中被运算的物理量是电压 u ，独立变量是时间 t 。



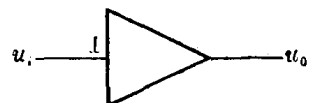
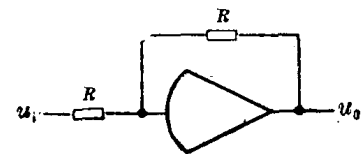
$$u_o = -(p_1 u_1 + p_2 u_2 + p_3 u_3)$$

$$p_1 = \frac{R_f}{R_1}, p_2 = \frac{R_f}{R_2}, p_3 = \frac{R_f}{R_3}$$

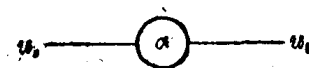
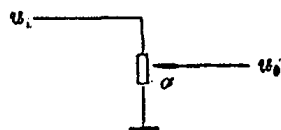


$$u_o = -\frac{1}{T} \int_0^t u_i dt - a_0$$

$$T = RC$$



$$u_o = -u_i$$



$$u_o = \alpha u_i$$

(a)

(b)

(c)

图 1-5 模拟计算机中基本运算部件及它们的符号

加法器是用运算放大器在反馈和输入回路中接入电阻组成。当运算放大器的放大倍数足够大时, 输出与输入成线性关系:

$$u_0 = -(p_1 u_1 + p_2 u_2 + p_3 u_3)$$

其中:

$$p_1 = \frac{R_f}{R_1}, \quad p_2 = \frac{R_f}{R_2}, \quad p_3 = \frac{R_f}{R_3}$$

当

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_f \text{ 时, } p_1 = p_2 = p_3 = 1$$

故

$$u_0 = -(u_1 + u_2 + u_3)$$

如果: $u_2 = u_3 = 0$, $R_f = R_1$, 则

$$u_0 = -u_1$$

此时加法器变成了反号器。

积分器是在运算放大器的反馈回路中接入电容 C , 输入电阻 R 和反馈电容 C 构成积分时间常数 T 。如果在 $t=0$ 时, 输出电压 $u_0 = -u_0$, 则积分运算关系可表达为:

$$u_0 = -\frac{1}{T} \int_0^t u_i dt - u_0$$

模拟机中的常系数部件通常由一个电位器构成, 使用时要尽可能减少输出的负载影响。

以后我们会知道, 所有运算部件的输入端和输出端都汇总在一个模拟机的排题板上, 用软接线将部件进行适当的连接, 就可以对数学模型进行仿真。

仍以图 1-2 的系统为例, 根据方程式(1-3)运算部件可按图 1-6 进行连接, 在连接时应

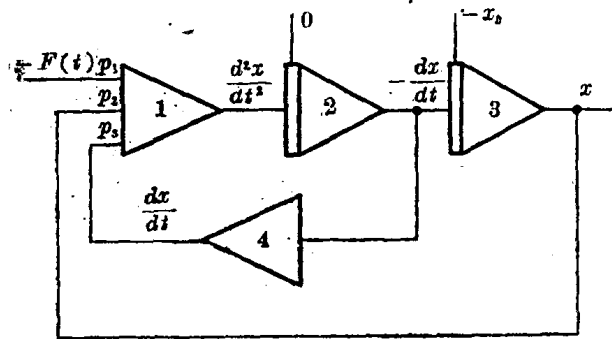


图 1-6 质量-阻尼-弹簧系统的模拟结构图

注意, 加法器和积分器输出和输入要反相。图中 $p_1 = 1/M$, $p_2 = K/M$, $p_3 = B/M$ 。积分器 3 输出为 x , 根据题目要求, 必须加上初始条件: $t=0$ 时, $x=x_0$ 。为了研究参数变化对系统特性的影响, 我们可以把方程(1-3)改写成:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -2\xi\omega \frac{dx}{dt} - \omega^2 x + \omega^2 f(t) \quad (1-4)$$

其中: $2\xi\omega = B/M$, $\omega^2 = K/M$, $f(t) = \frac{1}{K} F(t)$ 。 K 、 M 为常数, 如果令 $K=40$, $M=20$, B 为变参数, 依次为 5.656, 14.14, 28.28, 56.56, 70.70, 则 ξ 为 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 1.25。在各种不同的 B (即 ξ) 的条件下, 当 $f(t)$ 为单位跃变时, 可得计算结果如图 1-7 所示。

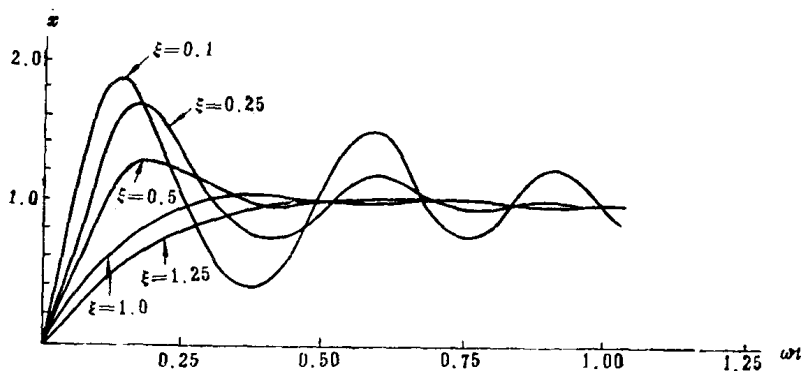


图 1-7 模拟机仿真结果

模拟机的解答可用慢扫描示波器或 $x-y$ 记录仪显示或记录下来，它是以电压对时间的变化形式出现的。

我们知道，运算放大器的输出电压其线性变化范围是有一定限制的，一般规定为 $\pm 100V$ （称为 $100V$ 制模拟机）或 $\pm 10V$ （称为 $10V$ 制模拟机），因此在模拟机上解题时，为了使放大器的输出不超过上述范围，必须选择适当的幅度比例尺。幅度比例尺定义为模拟机电压最大变化范围（ $\pm 100V$ 或 $\pm 10V$ ）和问题中变量最大值之比。对一个复杂的模型，选择比例尺是非常麻烦和费时间的，因为一开始往往并不知道问题变量可能出现的最大值。

独立变量时间 t ，同样也要选比例尺，这叫做时间比例尺，其定义为计算时间和问题时间之比。从考虑计算的精度出发，计算机存在一个最大的允许计算时间。如果时间比例尺为 1，就是实时仿真；如时间比例尺大于或小于 1，就分别相当于仿真慢于或快于实时。

选择幅度比例尺和时间比例尺是模拟机排版的一个重要步骤，这个问题将在第二章中详细讨论。

从模拟机上得到的解题精度主要取决于计算机的部件，它们的精度一般为百分之 0.001 到 3（满量程），比例尺选择不好，会造成不能充分利用计算机准确量程，使解题误差增大。当部件精度高于 0.2% 时，其价格大大上升，由于部件精度的限制，模拟一个中等复杂程度的问题，能得到 1% 的精度已相当了不起，一般精度在百分之几。

§ 1—4 数字机仿真

用数字机进行系统仿真，叫做数字仿真。在数字机上进行仿真首先要编程序。当然可以用一般的通用语言如 FORTRAN 或 ALGOL 来编仿真程序，但对仿真人员来说，使用很不方便，因此在 FORTRAN 和其它通用语言基础上创造了很多适合仿真用的所谓“仿真（或模拟）语言”。因为方框图是模拟机仿真的语言，所以可将方框图转换成面向方框的仿真语言，使它成为用数字机进行系统仿真的程序语言。关于数字机仿真的方法及仿真语言将在第六章中详细介绍，现在我们先来举一个例子说明。

还是以图 1-2 的系统为例，为了便于说明，我们把系统的运动方程重写于下：

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx = \sin(t) \quad (1-5)$$

式(1-5)与式(1-1)的区别仅在于外作用力 $F(t)$ 用 $\sin(t)$ 来代替。为了便于写程序我们把式

(1~5)表示成:

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = \sin(t) \quad (1-6)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= \int_0^t \ddot{x} dt + \dot{x}(0) \\ x &= \int_0^t \dot{x} dt + x(0) \\ \dot{x} &= (0) \quad x(0) = A \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式(1-6)进一步可写成:

$$M\ddot{x} = -B\dot{x} - Kx + \sin(t) \quad (1-8)$$

根据式(1-8)可画出仿真框图(图 1-8)。

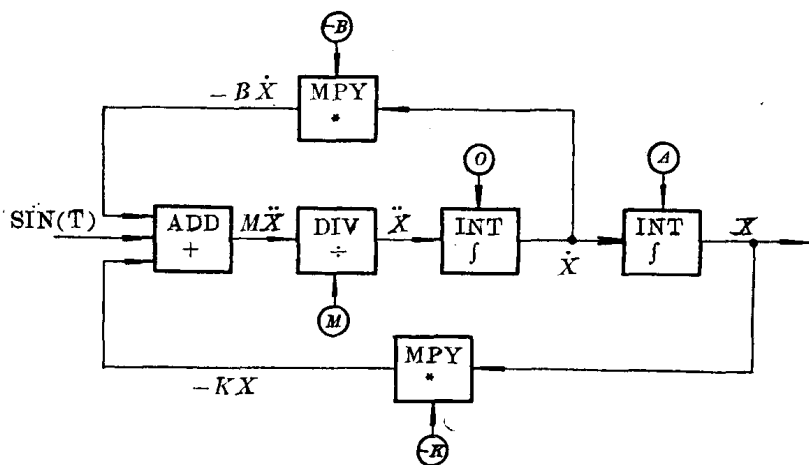


图 1-8 质量-阻尼-弹簧系统的数字仿真框图

这图与图 1-4 的框图没有什么区别，仅仅是为了程序阐述方便稍作改动。对于每一个方框，可以写出一个语句来表示输入、输出和方框的函数。例如，图 1-8 中两个乘法方框 MPY 可以写成：

$$\text{NEGB1DX} = \text{MPY}(1\text{DX}, \text{NEGB}) \quad (1-9)$$

$$\text{NEGKX} = \text{MPY}(\text{X}, \text{NEGK}) \quad (1-10)$$

这里输入 $\dot{x}$ 、 $-B$ 、 x 和 $-K$ 分别表示为 1DX、NEGB、X 和 NEGK, 而输出 $-B\dot{x}$ 和 $-Kx$ 分别表示为 NEGB1DX 和 NEGKX, 同样, 加法方框 ADD、除法方框 DIV 可写成:

$$M2DX = \text{ADD}(NEGB1DX, \text{NEGKX}, \text{SIN}(T)) \quad (1-11)$$

$$2DX = \text{DIV}(M2DX, M) \quad (1-12)$$

这里 M 、 $\ddot{x}$ 、 $M\ddot{x}$ 和 $\sin(t)$ 分别表示为 M 、 $2DX$ 、 $M2DX$ 和 $SIN(T)$ ， T 表示独立变量 t 。两个积分方框 INT 表示为：

$$1DX = \text{INT}(2DX, 0) \quad (1-13)$$

$$X = \text{INT}(1DX, A) \quad (1-14)$$

这里 $\dot{x}$ 和 x 分别表示为 $\dot{D}X$ 和 X , 0 和 A 表示为初始条件。

上述(1-9)至(1-14)六个语句描述了线性的质量-阻尼-弹性系统。在每一句中,输出在等号的左边,输入(以及象积分初始条件那样的参数)在等号的右边,由括号括起来放在函数符号的后面。

这些方框图语句可以用仿真语言来代替，后者可以直接用方程来描述系统。例如上述系

统可以用以下仿真语言来描述：

```

CON(M, B, K) (1-15)
PAR(A) (1-16)
2DX=(-B*1DX-K*X+SIN(T))/M (1-17)
1DX=INT(2DX, 0) (1-18)
X=INT(1DX, A) (1-19)
FIN(T, 1) (1-20)
OUT(T, X) (1-21)
PLO(T, X) (1-22)
END (1-23)

```

这里 x , $\dot{x}$, $\ddot{x}$ 分别由 X , $1DX$, $2DX$ 表示, $\sin t$, t 分别由 $SIN(T)$ 和 T 表示; M , B , K 和 A 代表相应的常数和参数。

上述语句(1-17)描述方程(1-8), 语句(1-18)和(1-19)描述方程(1-7), CON 语句确定系数 M , B , K , 它们都是常数, 它们的值在以后确定。 PAR 语句确定初始条件 A , A 是一个参数, 它的值也在以后确定。参数也是一个常数, 但在每次运算中它可以改变。 FIN 语句确定仿真终止的条件, 语句(1-20)表示终止条件为 T 大于 1。 OUT 语句表示输出数据制成表格, 一列为独立变量 T , 另一列为应变量 X 。 PLO 语句表示 X 对 T 的变化画成图形输出。 END 说明程序结束。在这些语句之后, 再给定常数和参数的值, 语句(1-15)~(1-23)加上给定的常数和参数要以一定格式写到程序单上, 这就完成了用仿真语言写成的数字仿真程序。以上所用的语言称为 $MIMIC$ 。在第六章中还将进一步说明 $MIMIC$ 和其它仿真语言的结构及使用方法。

数字仿真程序写完后, 穿孔成一叠卡片, 这一叠卡片加上控制卡片由卡片读入机读入数字机, 使计算机开始运转。如果穿孔卡、控制卡有错, 或者程序、模型有错误, 结果就不正确, 这些差错必须修正, 修正的工作通常叫做“调试”。调试结束, 穿孔卡片就使计算机进行一次或多次的仿真。

在上面的数字仿真例子中, 我们并未提到幅度比例尺和时间比例尺。对于仿真用数字机, 其硬设备应具有浮点操作功能, 所以变量或常数在这样的计算机中可以有很大的变动范围, 例如有些计算机数值范围为 $10^{-38} \sim 10^{+38}$, 精度为八位十进数, 这样一个范围和精度是模拟计算机所不能匹敌的。所以在具有浮点运算功能的数字机上解题时, 幅度比例尺通常是不需要的。在大多数情况下时间比例尺也并不必需, 因为实际上积分的步距间隔是可变的。少数情况需要时间比例尺, 选择也是十分方便的。

如果我们在上例中指定 $M=10$, $B=1.0$, $K=0.1$, 初始条件 $A=0.5$, 把程序连同已知数据送入计算机可得数值解答形式如图 1-9 所示。

A	
5.00000E-01	
T0	X5.00000E-01
T1.00000E-01	X4.99992E-01
T2.00000E-01	X5.00033E-01
T3.00000E-01	X5.00222E-01

T4.00000E-01	X5.00653E-01
T5.00000E-01	X5.01417E-01
T6.00000E-01	X5.02600E-01
T7.00000E-01	X5.04283E-01
T8.00000E-01	X5.06540E-01
T9.00000E-01	X5.09437E-01
T1.00000E-00	X5.13033E-01

图 1-9 数字机仿真结果

§ 1—5 小结

以上我们简单介绍了用模拟计算机和数字计算机进行系统仿真的基本方法。与数字机相比较,用模拟机进行系统仿真的主要优点是:

1. 模型建立更为直接,人机联系方便,因此有可能对问题作更深入的研究;
2. 运算操作是完全并行的,也就是说在仿真时,所有运算(积分、加、减、乘、除等等)都是同时进行的,积分也是连续地进行的;而数字机的操作是串联地进行的,积分也是一步步离散地进行的,所以模拟机比数字机有更快的计算速度或系统响应,这在实时或超实时仿真中具有十分重要的意义。

模拟机存在的主要缺点是:

1. 解题精度较低;
2. 存储和逻辑功能差;
3. 产生多变量函数十分困难,即使是单变量函数,以后我们会知道调整也是相当麻烦的。

对于一个给定的问题,究竟采用哪一种计算机为好并不存在一般性的方式和结论,它取决于很多因素,其中重要因素之一是消耗指标,它不仅包括设备的价格和解题时间长短,而且也包括工作人员准备时间的消耗。模拟机解题时间虽然很短,但在排题和连线上要花很多时间,当然数字机仿真也需要程序准备时间,它根据问题的性质、程序员的经验和程序知识的多寡以及使用标准程序的可能程度,也可能大于或少于模拟机排题时间,使用数字仿真语言(如 MIMIC、CSMP 等)可以大大减少编程时间,降低对程序员掌握专门知识和熟练程度的要求,但也会由此而引起计算机操作时间的增加,因为在这种情况下,数字机将要做更多的“内务”工作。

仿真问题准备好以后,常常有许多参数要调整或试探,这些试探和调整在解题开始时通常是不知道的,由于模拟机用电位器进行操作,所以比数字机换一个参数重新运转一次来得简单、便宜,但好处究竟多大,这将决定于数字机操作方便程度。越来越多的数字机采用分时和遥控操作,所以一个问题在机器上的实际解题时间(从程序上机到解答取得所经历的时间)可能比模拟机要少。另外,如果数字机采用浮点运算就不存在选择比例尺或修改比例尺的问题。

总之,对给定问题要选用模拟机还是数字机,它将取决于仿真问题形式、模型的种类、所用数字机和模拟机的型号以及从每一种机器中所能获得的好处。