

交流电机的 计算机仿真

贺益康 编著

科学出版社

内 容 简 介

计算机仿真技术是现代科学研究和产品设计的新手段。本书介绍交流电机(异步电机、同步电机)应用计算机(模拟计算机或数字计算机)进行仿真研究的原理、方法和技术。

全书共分八章。前三章从仿真的基本概念出发,重点介绍模拟计算机及模拟仿真方法,同时对数字仿真中应用的计算方法作了必要的回顾。第四章介绍适合仿真要求的任意速参考坐标系理论。第五、六、七章介绍了异步电机、同步电机的数学模型以及根据这些数学模型建立起来的各种计算机仿真模型。第八章则对电力半导体装置非正弦供电下交流电机的瞬态仿真及稳态状态变量法分析作了详细论述。

本书可作为电机专业研究生和高等院校有关专业高年级学生的教学参考书,也可供从事电机、电气传动自动控制及电力电子技术方面的工程技术人员参考。

交流电机的计算机仿真

贾益康 编著

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京市黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1990年3月第一版 开本:850×1168 1/32

1990年3月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:0001—4,720 字数:383,000

ISBN 7-03-001516-9/TM·16

定价:14.70元

前 言

计算机仿真技术是现代科学研究和产品设计的新手段。对电机进行计算机仿真可以使我们能在一台计算机(模拟计算机或数字计算机)中,用对电机仿真模型的研究来替代对真实电机在实际运行场合中的某些试验研究。这样,产品在制造出来之前,我们就能预测它的特性,在计算机中修改设计参数,以期获得理想的性能,实现优化设计。这不仅是一种多快好省的研究方法,而且在某些不可能、不允许对实物进行试验研究的场合中更是一种不可缺少的手段。特别是在采用电力半导体器件对电机进行交流调速的分析研究中,计算机仿真技术更将显示出它的巨大优越性。

近20多年来,国内外电机的计算机仿真技术得到了迅速发展。随着计算机在我国的日益广泛应用,介绍这种使用计算机仿真手段来研究电机的方法不仅显得越来越重要,而且条件也日渐成熟。然而,尽管这方面的有关资料不少,但较分散,专门论述交流电机计算机仿真方面的书籍更嫌不够。本书就是在这种情况下根据编著者近几年在浙江大学电机专业从事教学和科研工作的经验,并参考有关资料编写而成。

本书共分八章。考虑到读者熟悉数字计算机而对模拟计算机尚较陌生,故前三章首先从仿真的基本概念出发,重点介绍了模拟计算机及模拟仿真方法,同时对数字仿真中应用的计算方法也作了必要的回顾。第四章介绍为适应计算机仿真要求而建立起来的任意速参考坐标系理论。第五、六、七章分别介绍了异步电机、同步电机的数学模型,以及根据这些数学模型建立起来的各种计算机仿真模型(模拟仿真结构图及数字仿真程序)。对于交流电机的运行原理、方式则未作过多介绍,以免与一般电机运行理论书籍内容相重复。第八章则对电力半导体装置非正弦供电下交流电机的

瞬态仿真及稳态状态变量法分析作了详细的介绍。附录中列入了典型的数字仿真程序。

本书主要针对电机专业研究生和大学高年级学生而编写的,同时也可供从事电机、电气传动自动控制、电力电子技术方面的工程技术人员参考。

在编写本书的过程中,参阅和利用了不少已发表的著作和研究成果,其中的主要文献已列入书末的参考文献。在此对原作者表示感谢。

本书稿由沈阳工业大学王凤翔副教授审阅,他对全书的总体结构、内容安排、具体提法等都提出了宝贵的修改意见,并根据自己的科研成果撰写了“§6.2 异步发电机的仿真”一节。对于他对本书所作的贡献,特深表衷心的感谢。

此外,在编写本书的过程中,还得到了浙江大学许大中教授、黄焕焜教授和清华大学郑逢时教授的支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于编著者水平有限,书中一定还会有缺点和不足之处,恳切希望广大读者批评、指正。

编著者

1988年8月

目 录

第一章 概述	1
§1.1 仿真的基本概念	1
§1.2 计算机仿真	2
§1.3 两种仿真计算机的比较	7
第二章 模拟计算机与模拟仿真方法	13
§2.1 模拟计算机的组成	13
§2.2 模拟计算机的线性运算部件	15
§2.3 模拟计算机的非线性运算部件	20
§2.4 混合模拟计算机的特殊运算部件	36
§2.5 模拟仿真方法	40
第三章 数字仿真方法	50
§3.1 微分方程式的数值积分解法	50
§3.2 算法的稳定性与步长的选择	63
第四章 参考坐标系理论	68
§4.1 坐标系统的旋转变换	69
§4.2 静止三相电路的 $d-q-n$ 坐标变换	73
§4.3 旋转三相电路的 $d-q-n$ 坐标变换	88
§4.4 三相电路坐标变换的矩阵形式	93
第五章 异步电机的仿真模型	98
§5.1 $a-b-c$ 坐标系中的电机方程式	98
§5.2 任意速 $d-q-n$ 坐标系中异步电机的数学模型	113
§5.3 端电压约束条件	126
§5.4 异步电机的线性化仿真模型	142
§5.5 电机方程式的标么值化	172
§5.6 考虑主磁场饱和和效应的仿真模型	178
§5.7 考虑集肤效应和铁心损耗的仿真模型	190
§5.8 异步电机的近似仿真模型	201

第六章 不同运行条件下异步电机的仿真	207
§6.1 不对称接法下异步电机的仿真	207
§6.2 异步发电机的仿真	229
第七章 同步电机的仿真	238
§7.1 $a-b-c$ 坐标系中的电机方程式	238
§7.2 转子速 $d-q-n$ 坐标系中同步电机的数学模型	252
§7.3 同步电机的模拟仿真	265
§7.4 电机方程式的标么值化	278
§7.5 同步电机的稳态运行分析	279
§7.6 同步电机的数字仿真	284
§7.7 同步电机的近似仿真模型	294
第八章 非正弦供电交流电机的仿真	300
§8.1 非正弦电压激励下交流电机的仿真	301
§8.2 非正弦电流激励下交流电机的仿真	320
§8.3 变量对称性在状态变量法稳态分析中的应用	333
§8.4 不同强制函数作用下状态变量方程的解法	341
§8.5 非正弦电压激励下异步电机的稳态状态变量法分析	356
§8.6 非正弦电压激励下同步电机的稳态状态变量法分析	363
§8.7 非正弦电流激励下异步电机的稳态状态变量法分析	378
§8.8 非正弦电流激励下同步电机的稳态状态变量法分析	395
附录一 常用三角恒等式	412
附录二 程序 IMSIM	414
附录三 程序 SMSIM	423
附录四 程序 IMSWV	430
附录五 程序 SMSWV	438
附录六 程序 SMCSI	444
参考文献	455

第一章 概 述

§1.1 仿真的基本概念

对连续动态系统(比如电机及其拖动系统)进行研究,通常采用三种方法:理论分析,实物试验,仿真研究。具体地讲,理论分析就是应用一些基本的物理规律,对所要进行分析的物理系统写出表达它运动规律的数学方程式,然后依靠数学知识和实际运行的条件,对方程式进行理论计算,从而得到它的解答,进而分析系统的特性、品质等。一般来说,理论分析大都比较烦琐,有的情况下难以得到解析形式的解。为此,往往采用一些假设和近似,这样做所得到的理论分析结果与真实系统的实际特性之间有较大误差。但是,理论分析能够揭示其物理过程的内在规律,具有普遍性,可以指导一般。实物试验是对真实的系统或试验对象进行特性测试、试验。这可对理论分析的结果提供实践的验证,也可从中发现新的现象,新的规律。实物试验的困难是需要真正地制造出一个实际的系统,而随意改变已成型系统的参数就更加困难。有时由于条件的限制很难或者不可能进行某些具体实验。再者,一个系统未建造起来之前,也不可能采用实物试验的手段进行研究。一种解决的办法是建立起所需研究系统的模型(不是实际系统本身),用对系统模型而不是对实际系统的计算和测试来替代对实际系统的实验研究。这种基于模型而不是基于真实系统的研究方法就叫做仿真或模拟。

仿真研究经常采用的模型有两种:物理模型和数学模型。物理模型是按实际系统缩小或放大的尺寸,制作在性能上与真实系统相同的模型。模型的变量和真实系统的变量完全一样,唯一的差别是数量上的大小不同。例如在研究电力系统稳定性时,我们可以用许多缩小容量的同步电机、异步电机、直流电机等元件组成

一个系统作为电力网的模型，然后在这个模拟系统上进行实验研究。这就是电力系统动态模拟装置。数学模型则是用数学工具描写实际系统运动规律所形成的数学方程式，它们通常是一组微分方程或差分方程。

按照所基于的模型不同，仿真研究又可以分为两大类，即基于物理模型的物理仿真和基于数学模型的数学仿真。物理仿真的主要优点是保持了系统原形的物理本质，能观察到难以进行数学描述和不可能包含在数学方程中的真实过程所具有的现象，如非线性现象及某些次要因素等。然而物理仿真具有相当大的局限性，表现在不同研究对象需要不同的物理模型，而给复杂系统制造一个模型要花费巨大的代价，不但制造周期长，进行一次实验的准备工作也十分繁重。每当被研究对象的参数改变时，往往就得进行模型的改装，甚至重建，这就限制了物理仿真的应用范围。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等方面。数学仿真要比物理仿真灵活得多，具有更广泛的应用范围。在数学仿真中，模型与原型各自基于的物理现象的本质可以不同，但都遵循同一组数学方程式所描述的规律。由于数学仿真是以不同物理系统在数学描述上的相似性为基础的，因而可以用同一个仿真装置，如计算机等来解决不同类型的问题。进行一次仿真研究所需做的准备工作主要是编排模拟计算机的结构图(排题)，或编写数字计算机的程序(编程)。这样做，比建造一个物理模型所需做的大量制造、安装、调整等准备工作容易得多，周期也短得多，花费也少得多。对某个对象的研究工作一旦完成，模型即可“拆除”，而仿真设备依然完好，还可继续进行其他对象的仿真研究。这就是数学仿真具有更强大生命力的原因所在。本章主要就是讨论交流电机(异步电机、同步电机)的数学仿真。

§1.2 计算机仿真

数学仿真中，从一个实际系统抽象出数学模型来只是第一步。

这一步将实际系统变成了数学模型,称之为系统取模或系统辨识,这是第一次模型化过程。这次模型化所得到的只是数学方程式,它必须要使用一定的仿真工具才能求解。将已获得的数学模型变成能在一定仿真工具中运算求解的仿真模型,这是第二次模型化过程。从严格的意义上来说,系统仿真指的是第二次模型化过程。

如果采用的仿真工具是能够进行独立数学运算的计算机(模拟计算机或数字计算机),那么这种方式的仿真就是计算机仿真。所以计算机仿真就是将一个描述实际系统的数学模型进行第二次模型化,变成一个仿真模型并在计算机中“运转”的过程。由于计算机仿真具有巨大的优越性,我们一般所说的仿真都是指计算机仿真。

根据仿真中所采用的计算机类型的不同,计算机仿真可以分为模拟仿真和数字仿真两大类。

1.2-1 模拟仿真

采用模拟计算机作为仿真工具所进行仿真叫模拟仿真。在模拟仿真中,采用模拟计算机中能够独立进行数学运算的部件(如加法器、反号器、乘法器、积分器、比例系数器等)来构成仿真模型——模拟结构图,并以连续变化的电压量形式给出仿真计算的结果——模拟仿真纪录。

下面通过一个例子说明模拟仿真的过程。

图 1.2-1 表示了一个质量、阻尼和弹簧组成的机械谐振系统。描述该系统在外力作用下运动规律的数学方程式可写为

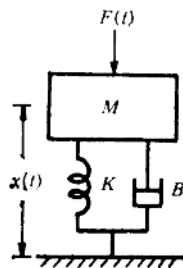


图 1.2-1 质量-阻尼-弹簧机械谐振系统

$$M \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + B \frac{dx(t)}{dt} + Kx(t) = F(t) \quad (1.2-1)$$

式中 M ——运动物体的质量;

B ——阻尼系数;

K ——弹性系数(弹簧刚度);

$x(t)$ ——物体的位移;

$F(t)$ ——外加作用力。

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

为了将式(1.2-1)的微分方程式(数学模型)变换成模拟结构图(仿真模型),应将式(1.2-1)进行变换、改写。考虑到采用积分器进行连续积分求解物体的位移变量 $x(t)$,可将方程中的最高阶导数项放在等式的左边,其他各项放在等式的右边,即

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -\frac{B}{M} \cdot \frac{dx(t)}{dt} - \frac{K}{M} x(t) + \frac{1}{M} F(x) \quad (1.2-2)$$

要求解这个方程式,需要进行积分、加法、反号以及乘以常数等各项运算。如采用模拟计算机仿真求解,应将相应的运算部件,如加法器、积分器、反号器按图 1.2-2 连接。图中 1——加法器; 2、3——积分器; 4——反号器。连接时注意到加法器和积分器的输出与输入间为反相位关系。积分器 3 的输出就是 $x(t)$ 。积分器进行积分运算时还要加上初始条件。

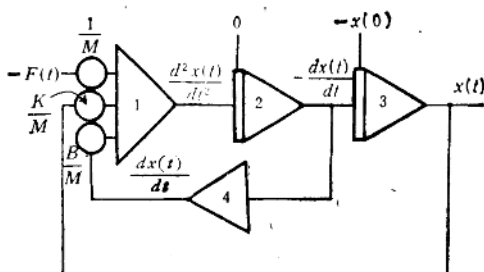


图 1.2-2 质量-阻尼-弹簧机械谐振系统模拟仿真结构图

模拟仿真的结果可以用慢扫描示波器,多线记录仪或 X-Y 记

记录仪显示或记录下来,它们往往是些随时间连续变化的曲线,和从实际系统中测试的结果一样,非常直观、逼真。

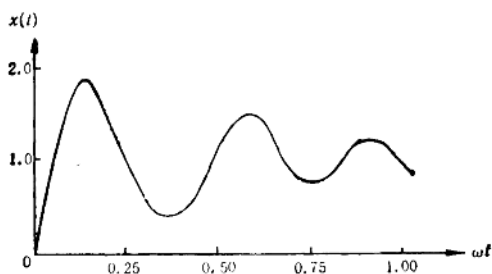


图 1.2-3 单位阶跃作用下,机械谐振系统位移变化模拟仿真记录

图 1.2-3 表示了当 $K = 40$, $M = 20$, $B = 5.656$ 时,在单位阶跃力 $F(t)$ 作用下,质量-阻尼-弹簧机械谐振系统的模拟仿真记录,其中 $\omega = \sqrt{K/M} = \sqrt{2}$ 。它们形象地表示了在单位阶跃外力作用下系统的响应。

1.2-2 数字仿真

使用数字计算机作为仿真工具所进行的仿真叫数字仿真。在数字计算机中,仿真模型是以程序的形式出现,因此进行数字仿真首先需要编写程序。我们可以用一般的 BASIC, FORTRAN, ALGOL 等通用计算机语言来编写仿真程序。有时仍嫌不够方便,因此在 FORTRAN 和其他通用语言的基础上,创造了很多专门适合进行数字仿真的所谓“仿真语言”,诸如 ACSL, CSMP, MIMIC, SIMULA, 等等。由于一条仿真语言可以独立完成一种数学运算,相当数条通用语言甚至一个子程序,因此使用方便,写出的程序简练,大大缩短编程时间,在仿真技术中得到了广泛的应用。由于仿真语言需要有专门的软件配置,在我国目前的条件下还不够普遍,故在本书交流电机的数字仿真中,仍采用最普及的 FORTRAN 语言来编写程序。

现仍以图 1.2-1 的质量-阻尼-弹簧机械谐振系统为例来说明数字仿真的过程。这次假设外力函数为时间的正弦函数,即 $F(t) = \sin(t)$ 。

为了便于编写仿真程序,将式(1.2-1)表示成以下形式:

$$\ddot{x} = -\frac{B}{M}\dot{x} - \frac{K}{M}x + \frac{1}{M}\sin(t) \quad (1.2-3)$$

这样,采用逐次积分降阶的方法,可以求得方程的解答,即

$$\dot{x} = \int_0^t \ddot{x} dt + \dot{x}(0) \quad (1.2-4)$$

$$x = \int_0^t \dot{x} dt + x(0) \quad (1.2-5)$$

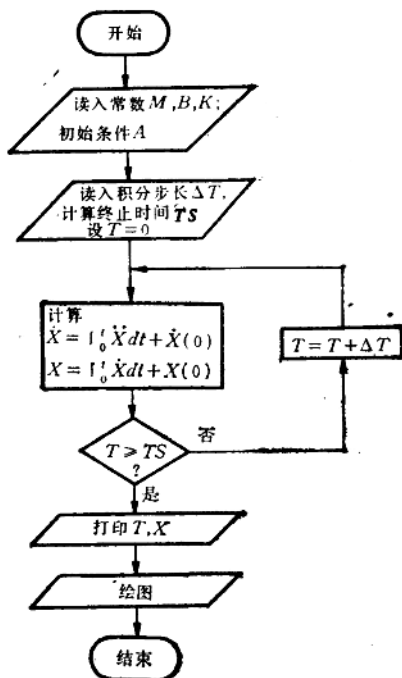


图 1.2-4 数字仿真程序 MDS 框图

其初始条件为 $\dot{x}(0) = 0, x(0) = A$

根据式(1.2-3)至式(1.2-5),可以编写出质量-阻尼-弹簧机械谐振系统的数字仿真程序 MDS,其程序框图如图 1.2-4 所示。

如果将数据 $M = 10, B = 1, K = 0.1$; 初始条件 $A = 0.5$; 积分步长 $DT = 0.1$; 计算终止时间 $TS = 1.0$ 送入程序,其部分计算结果为

No.	T	X
1	0.000E + 00	0.500E + 00
2	0.100E + 00	0.499E + 00
3	0.200E + 00	0.500E + 00
4	0.300E + 00	0.500E + 00
5	0.400E + 00	0.501E + 00
6	0.500E + 00	0.502E + 00
7	0.600E + 00	0.503E + 00
8	0.700E + 00	0.504E + 00
9	0.800E + 00	0.507E + 00
10	0.900E + 00	0.509E + 00
11	0.100E + 01	0.513E + 00

§1.3 两种仿真计算机的比较

从以上的分析和例子可以看到,模拟计算机是一种连续变量的解算装置。它将各种物理量用电压的形式进行表示,通过各种运算部件进行运算,其输入和输出均为连续的电压量。数字计算机则是一种不连续量的计算装置。它以离散化的一组组数据形式进行运算,得到的是自变量一个个增量点上的解答。这两种仿真工具有着各自的优缺点,在连续系统的计算机仿真中都得到了广泛的应用。

1.3-1 模拟计算机

模拟计算机的突出特点是当用它进行仿真时，解算结果在外观上非常接近于实际情况。这是由于模拟计算机中用以代表实际系统变量参加运算的量以及输出量均是计算机的机器电压，它是一个正、负极性可连续变化的量。因此，用它来描写连续系统的动态过程就显得特别自然、逼真，和真实系统在测试设备上观察到的情况几乎完全相同。同时，模拟计算机所用的信号及电路都很简单。人们可以通过系数电位器的设置、调节和排题板的接线，方便而迅速地改变系统的参数和修改系统的仿真模型。人机联系极为方便。此外，还可以考虑进实际系统的各种非线性因素的影响等。

模拟计算机的另一个特点是运算速度快，这是由于它采用“并行”计算方式所决定的。模拟计算机的每一个运算部件都能够独立完成一种运算，因而所有的运算（如加、减、乘、除、积分等）都同时、平行地进行，因此运算速度特别快。例如混合模拟计算机的重复运算频率可达 $100-10000$ 次/秒，即在百分之一至万分之一秒的时间内可获得一个完整的解。对于简单的小型题目或复杂的大型题目在运算时间上并无多大差别，几乎都是瞬时完成的。数字计算机运算速度高是公认的，可达上亿次/秒，但这只是就整个求解过程中的一步而言。由于它的运算方式是一步步“串行”地进行，使得总的解题速度一般比模拟计算机要慢。有的资料介绍，一台大型混合模拟计算机的等效运算速度可达几亿次/秒，比目前常用的数字计算机运算速度高出 $1-3$ 个数量级，这在实时和超实时仿真中具有十分重要的意义。

模拟计算机的主要缺点是：

(1) 解算精度不够高。影响模拟计算机计算精度的原因有二：一是运算部件的误差。模拟计算机各运算部件大都由直流运算放大器和运算网络元件组成，它们本身的误差及组合后的误差较大。二是计算机的机器电压大小有限（ $100V$ 制的为 $100V, 10V$

制的为10V)。用它们来表示数值范围广泛的各种实际系统变量时,分辨率有限,带来了误差。用计算机的机器电压表示实际系统变量时要进行幅度比例尺化。如果比例尺选择得不适当,如比例尺选得过大,就要带来类似于用大量程表测量小量那样的误差。模拟计算机的计算误差一般为千分之几至百分之几。由于工程上所提出的原始数据本身的精度有限,在一般的情况下模拟计算机所具有的这种精度还是可以满足工程实际要求的。

(2) 由于模拟计算机采用机器电压来表示被模拟的量(电量或非电量),而机器电压又有一定范围(100 V 或 10V),因而有个被模拟量与机器电压之间的幅度比例尺问题,即单位值的被模拟量要用多少伏的机器电压来表示的问题。此外,如果想要将被仿真的过程加速或减慢以利于观察、研究和记录,则还有个时间比例尺的问题。这些都是模拟仿真中易于混淆、出错和费事的工作,可以说是使用模拟计算机的不便之处。

(3) 信息存储和逻辑判断功能差,机器内缺乏相应的部件,排题需要人工接线,难于实现操作自动化。

(4) 较复杂的非线性环节用电子线路来模拟时线路复杂,精度不易保证。产生多变量函数十分困难,即使单变量函数的调整也很费事。

1.3-2 数字计算机

数字计算机的情况有些相反,尽管数字计算机运算速度快,但它不象模拟计算机那样有多种多个的运算部件,只有一个或少数个运算器(ALU)。算术运算或逻辑运算只能一步步按顺序地在那个运算器中进行,这是一种“串行”的计算方式。从计算方式上讲,它的运算速度比模拟计算机要低,而且题目越大,步骤越多,计算就越慢。这就限制了它在实时、超实时仿真中的应用。

然而,数字计算机的优越性还是十分明显的。

(1) 运算精度高。数字计算机没有运算部件精度的问题,只要增加字长就可以把数值表达达到所需精度,不象模拟计算机那样

受机器电平幅度的限制。有的数字计算机的精度可达八位十进制数,这是模拟计算机所不能比拟的。

然而数字仿真的精度与计算方法有很大关系。积分计算的精度一方面取决于所采用的积分计算方法,另一方面还和所用的积分步长有关。不适当的积分步长要么导致产生不稳定的、甚至错误的结果,要么大大增加求解计算的时间。

(2) 由于数字计算机的硬件具有浮点运算功能,所能表达的数的范围极大,有的可达 10^{-38} — 10^{+38} 。在这种具有浮点运算功能的计算机上解题时,不用担心被仿真系统变量的大小,因而没有幅度比例尺的问题。在大多数情况下时间比例尺也不需要,因为积分计算中的步长是可以选择的。

(3) 逻辑运算功能强,可以写出很多逻辑判断语句来进行条件转移。这对于系统的数学模型不仅仅是一些微分方程组的情况下进行的仿真具有重要的意义。

(4) 在进行数字仿真时,整个被仿真系统可用仿真程序的形式储存在机器内存中。改变题目就只是更换程序中的语句,不必象模拟计算机那样改变排题板上的接线,这显然易于实现操作自动化。

(5) 计算结果的重复性好。只要程序本身正确,无论在哪种机器上实现,无论何人操作,运算结果总是相同。此外数字仿真程序便于保存,可以多种版本共存,有利于比较和修改。

由于以上两种计算机都有各自的优、缺点,在连续系统的仿真研究中都得到了广泛的应用。为了充分利用两者的优点,即把模拟计算机运算的高速度与数字计算机的高精度和巨大的存储、逻辑功能结合起来,在这两种计算机的基础上发展、产生了混合计算机,这是一种新型的计算机。

1.3-3 混合计算机

混合计算机又可以分成两种:混合模拟计算机和混合计算系统。

一、混合模拟计算机

混合模拟计算机是在模拟计算机中引进模拟存储、逻辑判断、时序操作和数字逻辑运算功能而形成的。在机器组成方面增加了大量的数字-模拟混合运算部件,模拟存储部件,数字逻辑部件以及时序发生电路等,使普通(纯)模拟计算机的不足之处得到了改善。重复解题次数可达每秒一千次以上,使得模拟计算机“并行”计算方式所应有的运算高速度真正得到了发挥。模拟存储部件的采用又使机器具有了迭代运算的功能,从而使模拟计算机应用范围大大扩大。目前生产和使用的大部分是这种模拟计算机,它也是构成混合计算系统的基本组成部分。

二、混合计算系统

混合计算系统是将混合模拟计算机和数字计算机通过接口电路联在一起构成。其结构框图如图 1.3-1 所示。图中的“接口电路”就是为将两种不同类型计算机连接在一起所新增加的接口硬件设备,它包括数/模、模/数转换器,控制电路等。

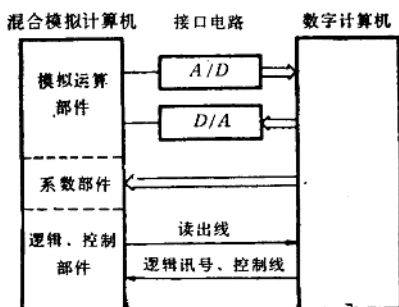


图 1.3-1 混合计算系统构成框图

混合计算系统中,模拟机部分完成高速、低精度的运算。数字机部分实现对模拟机的自动管理、监督和控制,也完成某些高精度的运算和多变量函数的产生等。这就充分发挥了它们各自的特