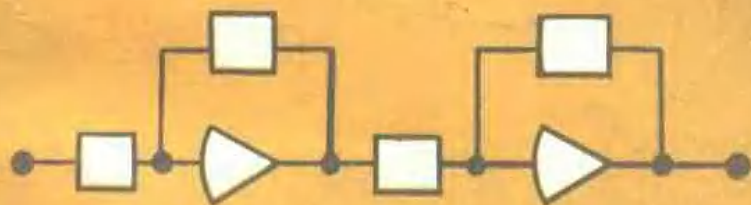


计算机仿真技术

马自卫 黄象贤 周颖 编



人民邮电出版社

计算机仿真技术

马自卫 黄象贤 周 颖 编

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书是一本计算机仿真技术的教材，重点讨论线性电路和系统的计算机仿真。

全书共十三章，包括数字计算机仿真和模拟计算机仿真。书中不仅对有关仿真语言、原理和方法作了系统的介绍，而且，较广泛地介绍了它在各方面的应用，有较强的科学性和实用性。

全书理论联系实际，图文并茂，易于理解。每章都附有习题或实验内容和思考题。该书比较全面地介绍了计算机仿真技术，可做高等院校计算机、自动控制等有关专业的参考教材，也可供从事计算机、自动控制等方面工作的科技人员、工程技术人员以及其它有关人员参考。

JS464/06

计算机仿真技术

马自卫 黄象贤 周 颖 编

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京兴华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 1988年11月 第一版

印张：11 $\frac{1}{2}$ 页数：178 1988年11月 北京第1次印刷

字数：294 千字 印数：1—2 700 册

ISBN 7-115-03754-X/TP·020

定价：2.55元

前 言

计算机仿真技术不仅是计算机应用的一个十分重要而又广阔的领域，而且也是迅速发展的一门综合性很强的新兴科学。它是我们分析、研究和设计系统的重要工具。一般说来，仿真包括物理仿真和模型仿真。本书所说的仿真是指模型仿真，即用数学模型代替实际系统进行分析、研究或实验。所谓计算机仿真技术就是将系统的数学模型放到计算机上进行实验和分析、研究的一种技术。由于计算机仿真能够非常方便地为实际系统提供模型进行各种实验，例如：分析、研究系统本身的各种性能，为选择最佳参数而改变系统参数值；为获得最佳设计对各种方案进行比较；对一些新建系统的理论假设进行验证；对系统的操作人员进行训练等。因此，计算机仿真技术不仅广泛地应用于航天、冶金、电工、化工、通信等各个工程领域方面，而且随着计算机的日益普及，将不断地被推广用于经济、教育、生物等非工程领域方面，在实际应用中已取得了十分明显的经济效果。

根据仿真时所使用的计算机的类型不同，可以分成模拟计算机仿真、数字计算机仿真和混合计算机仿真。本书主要内容包括数字计算机仿真和模拟计算机仿真。它不仅对有关仿真语言、原理和方法作了系统的介绍，而且，较广泛地介绍了它在各方面的应用，有较强的科学性和实用性。

当前，计算机做为一个强有力的工具在科学计算、工业控制、教学科研等各个方面都得到了广泛的应用，其重要性空前增长。特别是微型计算机的问世及其迅速发展，使计算机仿真技术的进一步发展有了强大的物质基础。仿真技术作为一门独立的学科在我国形成虽然较晚，但近十多年来得到了迅速地发展和应用，推动了各高等院校相继开设相应的课程，需要出版这方面的教学参考书。考虑到当前，数字仿真越来越引起人们的重视，并且在实际中得到了广泛的应用，

在本书中，着重介绍了数字计算机的仿真技术。由于当前模拟计算机在生产实践和教学训练中仍然是很有用的工具，所以在本书的最后一章，对模拟计算机的仿真技术及其应用也做了扼要的介绍。

我们将瞬态电路和控制系统的分析等有关内容作为计算机仿真技术应用的重点，在书中作了较详细的介绍，除介绍计算技术外，还将介绍有关的理论问题，如响应的检测、设计的优化、计算机解的说明等。本书对于非线性电路和系统也进行了讨论，并在软件包 CSMP (CONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM) 和模拟机仿真等有关内容中给出了具体的应用实例。

需要指出的是，本书不是一本关于数值分析和计算方法的教科书，因此，在上述内容所涉及到的基本原理中，除作必要的引用外，不再详细叙述了。

学习本书时，读者应具有拉普拉斯变换、BASIC 编程以及有关计算线性电路和系统方面的知识。为便于读者参考和回顾，书中的第二章和第三章对拉普拉斯变换的理论和 BASIC 程序设计的主要内容作了扼要的介绍，阅读时若将这些内容和书中材料结合起来，对理解有关内容会很有好处。每章内容，在介绍有关理论问题的基础上，接着介绍计算机仿真技术和应用，两者衔接很紧密。每章都附有习题或实验内容及思考题。需要指出的是，习题或思考题本身在某种意义上说，也是一个实验的过程，既要求编写程序(或画出模拟机仿真图)，又要描述完成此功能的结果，对教学安排也很有利。

在编写过程中，我们以 THEODORE. BOGART, JR. 编写的“线性电路和系统的计算机仿真”(Computer Simulation of Linear Circuits and Systems) 为主要参考书，参阅了国内外的有关文献编写而成。全书共分十三章。第一、二、十三章由马自卫编写，第三、四、五、六、七、八章由黄象贤编写，第九、十、十一、十二章由周颖编写。

由于时间仓促以及编写人员水平有限，书中难免有不少错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

作者 1988.3

• • •

目 录

第一章 绪 论

§ 1-1 系统和模型	1
§ 1-2 分析、综合和仿真	2
§ 1-3 模拟和数字仿真	5

第二章 拉普拉斯变换理论简介

§ 2-1 导言	9
习题	11
§ 2-2 拉普拉斯变换的一般原理	12
习题	16
§ 2-3 拉普拉斯反变换	17
习题	22
§ 2-4 微分和积分定理	23
习题	27
§ 2-5 用拉普拉斯变换方法解线性微分方程	28
习题	39

第三章 BASIC 语法的梗概

§ 3-1 BASIC 语言的成分	44
§ 3-2 BASIC 的基本语句	46
习题	65
附录一	71
附录二	72

第四章 频率响应的计算

§ 4-1 基本概念	73
§ 4-2 频率响应的计算	76
§ 4-3 举例	81

习题	89
----	----

第五章 迭代算法

§ 5-1 基本概念	92
§ 5-2 利用 BASIC 程序进行迭代计算	94
习题	107

第六章 计算 RC 和 RL 网络的直流瞬变过程

§ 6-1 基本概念	108
§ 6-2 BASIC 程序编写	116
习题	131

第七章 计算 RC 和 RL 网络的交流瞬变过程

§ 7-1 基本概念	134
§ 7-2 利用 BASIC 程序计算 RC 和 RL 网络的瞬变过程	140
习题	145

第八章 计算反变换

§ 8-1 基本概念	147
§ 8-2 计算反变换的 BASIC 程序	148
习题	163

第九章 RLC 网络的瞬态响应的数字仿真

§ 9-1 二阶 RLC 网络的分析	165
§ 9-2 求解二阶 RLC 网络的 BASIC 程序	168
§ 9-3 串联 RLC 网络的数字仿真	172
§ 9-4 并联 RLC 网络的数字仿真	186
习题	196

第十章 控制系统的数字仿真

§ 10-1 概述	199
§ 10-2 二阶位置控制系统的数字仿真	204
§ 10-3 控制系统稳定裕度的计算	207
§ 10-4 对具有超前补偿的控制系统的数字仿真	214
习题	221

第十一章 连续系统仿真程序(CSMP)语言及其应用

§ 11-1 CSMP 语言的基本语句	224
§ 11-2 CSMP 仿真程序的编写	232
§ 11-3 CSMP 仿真程序应用举例	239
习题	257

第十二章 用 CSMP 对控制系统和非线性的仿真

§ 12-1 概述	260
§ 12-2 简单位置控制系统的仿真	265
§ 12-3 控制系统中的非线性及仿真	273
习题	287

第十三章 模拟计算机及其应用

§ 13-1 模拟计算机的介绍	290
一、概述	290
二、线性部件运算关系及误差分析	294
三、模拟机仿真图的建立	299
四、实验内容和思考题	304
§ 13-2 幅值和时间比例尺的确定	306
一、幅值比例尺	307
二、时间比例尺	312
三、实验内容和思考题	314
§ 13-3 机械系统的仿真	318
一、机械系统的仿真	318
二、实验内容和思考题	325
§ 13-4 力函数、电乘法器	330
一、力函数	330
二、电乘法器	335
三、实验内容和思考题	336
§ 13-5 控制系统的模拟计算机仿真	339
一、位置控制系统的仿真	339

二、具有超前环节的位置控制系统的仿真·····	342
三、控制系统稳定性的仿真·····	344
四、实验内容和思考题·····	347

第一章 绪 论

§ 1-1 系统和模型

对一些电子部件或系统进行描述时，我们常在某种条件下，近似地将它们看成是线性的，这样处理起来简单、方便。例如音频放大器、伺服马达、测速计、运算放大器、压电式传感器、滤波器、位置控制系统和随动系统等等都是常见的线性部件和系统。它们最大的特点是可采用叠加原理。因此，线性系统对几个输入量可以一个一个地处理，然后对它们响应的结果进行叠加，便得到最后的输出响应。当研究某系统时，除了对它们的作用原理要有明确的物理概念外，还要对它们的动态过程进行定量分析。为此，首先要建立数学模型，它是描述系统内部各变量之间的数学表达式，在静态条件下变量的各阶导数为零，描述各变量之间的静态关系式称为静态模型，而动态过程中各变量之间的关系用微分方程描述，称为动态模型。在推导一个实际系统的数学模型时，我们常常在简化性和准确性之间作出合理的折中考虑。当要求准确性高时，可用较多较复杂的方程来描述，否则应采用适当简化的模型来近似。在简化过程中，我们会看到常常忽略系统的固有的物理特性。例如，当系统中的分布参数，对非线性特性影响很小时，就可将它们略去。当然，系统的最后简化的数学模型是否正确地反映了系统的动态特征，还要通过实验证明这种忽略的合理性，只有数学模型的分析结果与物理系统的实验结果很好的吻合，才表明建立的数学模型是合理的。所谓线性，是指其输出比例于输入。即功能上反应了输出和输入关系是线性关系，数学模型是线性方程。本书要讲述的线性电路和系

统的仿真的一个重要特点就表现为数学模型是线性微分方程，即动态系统。当然，这一仿真技术的基本原理对其它工程或非工程系统也是适用的。

根据系统中发生的变化过程是平滑变化还是断续变化，则可划分为连续系统和离散系统。当然，“连续”这个词可以用于非线性方程中的电子器件、电路和系统，如二极管、AM调制器、FM调制器，电子乘法器和函数发生器等。而本书主要用于对线性电子器件、电路和系统的描述。所以，以后所说的线性或连续，都指的是非数字器件电路和系统。这样，我们就将逻辑门、触发器、移位寄存器、脉冲编码器、数字计算机等数字器件和系统排除在外了。虽然，我们也有机会研究一些连续的非线性系统，但在本书中主要涉及的是线性器件、电路和系统。

§ 1-2 分析、综合和仿真

线性系统分析是在数学模型的基础上进行的，当给出一个线性系统的数学模型之后，用分析的方法有时就可解出系统的有关信息。为了求出系统对激励信号的响应，我们就要求给出这个模型的方程。一个数学模型可以是一个方程，也可以是一个方程组，这个方程或方程组就完全描述了这个系统。

例 1-2-1 电容 C 的模型能够表示为：

$$v = \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1-2-1)$$

它表明了电容上电压和通过它的电流之间的关系。这个模型是不精确的，因为，它没有指出电容上漏电阻的影响。然而，对于许多实际情况来说，表示电容性能的数学表达式，用式(1-2-1)就足够了。如果要求一个更精确的模型，那就需要一个更精确的方程来表示。需要指出的是，无论模型怎样，分析过程都要求我们求解已知激励的响应。在上面的简单例子中，如果把电压作为激励信号，把电流

作为电压激励的响应。那么，就可以从式(1-2-1)解得下式：

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (1-2-2)$$

综合是在满足已给的激励响应的条件下，确定出系统的元部件技术规格，即是属于系统设计方面的问题。在例 1-2-1 中，如果要求流经电容的交流电流峰值为 1 安，而电容上两端电压峰值是 10 伏，频率为 1 赫。我们可选择电容容量为 15.91 微法，将这些数值代入式(1-2-2)中，使其得到满足，从而综合得出该电容电路。对一个复杂系统的综合常常表现为一个试验和误差分析处理的过程，其中包括在分析指导下对参数不断改变和调试的过程。在上面求解电容容量的简单例子中，也反映出这种综合设计的思想（当然，它不是求电容 C 最有效的方法），为了确定电容 C 值，我们用 10 伏正弦波电压，根据式(1-2-2)，反复将改变的电容 C 数值代入，直到流经电容的电流峰值为 1 安为止。

计算机仿真技术在分析和设计中占有重要地位，起着重要作用。当我们要求能观测到系统的结构和参数变化是怎样改变着系统输出时，或者对一个复杂系统难以用分析方法研究时，用计算机仿真是一种行之有效的方法。

所谓线性系统的计算机仿真只不过是计算机来解模拟这些系统的方程。用这种方法使用计算机给系统分析或系统设计的研究人员带来了极大的好处。因为，分析或设计一个实际线性系统不仅要在理论上进行分析计算，还需对系统的特性进行实验研究。一般说来，仿真包括物理仿真和模型仿真。由于计算机仿真是以数学模型为出发点，不管实际物理系统如何，只要它们的数学模型相同，就可用同一数学模型来代表不同的物理系统。当然，模型的动态响应也就代表了实际物理系统的动态响应。现举例如下：

例 1-2-2 图 1-2-1 为电感、电容、电阻组成的电系统，其外加输入电压为 v_o ，输出为 v_c ，其动态方程可表示为：

$$LC \frac{d^2 v_c}{dt^2} + RC \frac{dv_c}{dt} + v_c = v_o \quad (1-2-3)$$

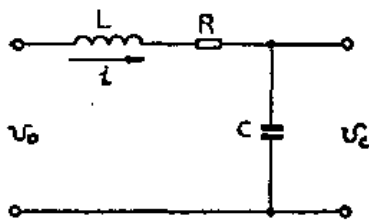


图 1-2-1 L-R-C 电路

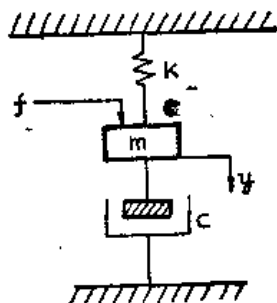


图 1-2-2 质量—阻尼—弹簧机械系统

例 1-2-3 图 1-2-2 为质量、阻尼、弹簧机械系统。设系统输入量为 f ，输出量为 y ，弹簧刚度为 k ，粘性摩擦系数为 c ，其动态方程可表示为：

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = f \quad (1-2-4)$$

将式(1-2-3)和式(1-2-4)进行比较，可以发现，它们是非常相似的，除系数外，方程完全相同。也就是说，它们可以表示成二阶线性微分方程的一般形式：

$$a_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_2 \frac{dx}{dt} + a_3 x = F(t) \quad (1-2-5)$$

这就表明，采用计算机仿真时，只需用一套仿真设备（主体设备是计算机）对物理性质完全不同的各种系统进行数学模型仿真，而仿真工作量主要表现在模拟计算机的排题板和数字计算机的程序上。显然，这比物理仿真的工作量、时间周期、经费开支等都要小得多。这些优越性使计算机仿真不断取代物理仿真。计算机仿真还有一个重要的特点，就是无论是在数字计算机上仿真，还是在模拟计算机上仿真，用户都可很方便地改变系统参数值。这样，系统分析人员可以给出和某系统相应的不同参数值，然后很快地从仿真运行结果中得到可靠的相应结果。系统设计人员可以任意改变参数值，直到仿真结果符合设计要求为止。在每种情况下，人们需要花 ([时间进行手工计算，这样与这种手工计算有关的错误也可能发生，因此，

人们需要更好地着眼于仿真的结果以及它所依赖的理论。

用数字计算机进行仿真时，首先要根据某系统类型对其所输入的激励信号的预知的响应编写出相应结果的仿真程序。一般是对系统先进行理论分析，然后再运行计算机程序，以便获得用户在给定的参数条件下的结果。为了便于对计算机仿真的全面理解，我们先研究比较简单的电网络，因为，它只需通过拉普拉斯变换就可以获得求解结果。例如 RLC 电路，当直流电源 DC 接通后，我们就可以对流过该电路的电流 $i(t)$ 的数学表达式进行分析，显然可知，电流表达式的形式和大小取决于 R 、 L 、 C 的数值。因此，我们先计算出电流时间函数，继而编写出计算机程序，在参数 R 、 L 、 C 中，当某个或多个参数发生变化时，运行编好的计算机程序，以便对电流的特性进行研究。可将上述计算机仿真的方法和步骤类似地应用到其它系统（如简单位置控制等）中去，无论是时域或频域都可以。

对于一些更复杂的系统，可以利用软件包 (CSMP) 直接获得时域响应，而不必先找到它的方程的一般形式。目前，已有典型的大软件包 CSMP 用于线性系统的仿真。程序员只需利用类似 FORTRAN 的语句就可以求出系统的单个元件，同时，计算机还能完成所要求的分析。不言而喻，像 CSMP 这样的软件包的优点是显然的，它大大地推动了数字仿真的应用。当然，它的缺点是需要高速的大存储容量的计算机，而且，还必须购置程序软件。

§ 1-3 模拟和数字仿真

计算机仿真是系统模型在计算机上运行求解的实验过程。根据采用的计算机类型不同，可分成模拟计算机仿真系统、数字计算机仿真系统和用混合模拟机组成的或用数字—模拟混合计算机组成的混合仿真系统以及用微型计算机组成的全数字仿真系统等。

对于数字计算机仿真，由系统流数学模型所产生的解必然是离散

值。现仍以以前所给出的电容器电路为例说明这一点，在已给定电压 $v(t)$ 的条件下，用数字计算机仿真所得到的流经电容器中的电流 $i(t)$ ，将是在特定时间点上的一组电流值。例如，当 $t=0$ 时， $i=1.0$ 安； $t=0.1$ 毫秒， $i=0.81$ 安； $t=0.2$ 毫秒， $i=0.31$ 安等等。数字计算机仿真的解取决于程序计算中所给定的时间间隔。而现代数字计算机的运算精度很高，它能够表示极小的数值如 10^{-73} 这样小的数，所以，数字计算机解能很好的满足实际线性系统对仿真的要求。然而，由于每次解的仿真都需要一定的机时，解值越多，以某一固定时间间隔产生这样一组解值所需的机时也就越长。

一般说来，数字计算机仿真计算的精度比我们实际系统的要求要高。因为，数字计算机的有效数字位代表了解值的精度，此精度通常是高于数学模型的精度。数字计算机高精度的优点是很有用的，特别是当两个参数近似相等而它们又需要进行相减或相除的运算时，它的意义就更加突出。例如，某数学模型要求计算值 $v=10^5-10^5 \cdot (v_2/v_1)$ ，而此时 $v_1=1.0007$ ， $v_2=1.0004$ ，那么， $v_2/v_1=0.99970021 \approx 1$ ，模型按高精度计算可知： $10^5-10^5(v_2/v_1)=29.979$ ，显然，所得到的模型值的有效数位大于近似计算值 $10^5-10^5 \cdot (1)=0$ 。

从上面的叙述可知，高精度的好的仿真结果是数字计算机仿真的重要优点。第二个重要优点是：要完成仿真的用户并不要求在数字计算机硬件的知识。与模拟计算机仿真相比，程序员也不需关心电压大小、设备的精度、标度的范围以及计算机产生结果所需的其它任何机械装置。正因为数字计算机有上述优点，使它广泛地应用在线性系统仿真中，并已大量地取代模拟计算机仿真。

模拟计算机主要是由运算放大器和无源器件（如电阻器、电容器、电位器等）构成。用户为了仿真线性系统，根据系统数学模型将放大器和无源器件连接成所需要的仿真电路。对于系统中的非线性仿真也可以采用非线性器件，如乘法器和函数发生器。若和数字计算机仿真相比，模拟计算机产生的结果是连续的。即它产生一个

时变电压，其任何瞬时值都和相应时刻的解成比例，所以，它的解是无限连续下去的。解的精度取决于放大器和其它有关元部件的精度。按照这个精度便可以得到解的电压结果。若也和数字计算机相比，模拟计算机所产生的解是实时的（以后可以看到，为了使解“提前”或“迟后”出现，只需将解进行时标处理即可），所谓实时，我们是指代表仿真量大小的解电压随时间改变而改变。这一仿真实时性是模拟计算机长处所在。我们已经说过数字计算机算出每个解值是需要一定的时间的，因此，当解值增加时，所需要的总时间也随之增加。从实时性来看，模拟计算机用于要求实时解的系统是适宜的。例如，为了要保持系统性能指标而需即时调整的系统对实时性要求就较高。这种实时仿真的能力对于数学模型相当复杂的系统来说更显得重要。例如，当某一系统有许多微分方程必须同时仿真时，计算速度上升为主要矛盾，模拟计算机的快速性的优点便显出它的特殊意义。

模拟计算机仿真的另一个优点是用户无需从数学上对系统进行分析，也无需给出显解形式。只需将那些对电压电平的作用，如同变量对系统数字模型的作用相同的元部件连成电路，加上电源，就可以观察解的结果。

从研究人员要及时地了解变化参数对系统带来的影响来看，模拟计算机比数字计算机要好。特别是在计算机用于快速、反复地操作模型时，这一点是很有用的，也是实际的需要。例如，通过变化电位器的调节量，用户就能立即观察到由于这一参数的改变给解电压波形所带来的影响，这种影响由示波器上可以方便地显示出来。为了达到优化的性能指标，需进行的元件综合设计，采用这种方法也是很方便的。而且，仿真系统中的其它变量在实时或快速仿真中的变化给系统性能所带来的影响也类似地观测。这样，就可使研究人员更好地全面地了解系统的性能情况。

模拟计算机仿真的主要缺点是用户必须清楚模拟计算机硬件能完成仿真的最大有效值，对放大器的限制，噪声源大小，频率响应

特性以及输出显示设备的承受能力和工作范围等。此外，模拟计算机对大的复杂的系统进行仿真时所花的费用也是非常昂贵的，所以，难以普遍推广。现今微型计算机的高速发展和应用，相比而言，人们倒是更倾向于利用高效能的价格较廉的数字计算机了。