自动控制系统数字仿真

韩 璞 朱希彦

ZI DONG
KONG ZHI
XI TONG
SHU ZI
FANG ZHEN

中国电力出版社

自动控制系统数字仿真

韩 璞 朱希彦

中国电力出版社

内 容 简 介

本书较系统介绍了自动控制系统的数字仿真原理及程序设计方法。对专用仿真程序设计、通用仿真程序设计、数字控制系统仿真程序设计、仿真程序包、仿真语言、实时仿真技术等都作了专门的论述；作为仿真应用的例子，论述了自动控制系统参数优化的方法；提供了书中主要内容的程序清单；每章附有习题供读者参考。

本书通用性及实用性较强，较适用于仿真技术的初学者，对仿真技术有一定基础的技术人员也有参考价值。本书还可作为过程控制专业学生的教材。

图书在版编目（CIP）数据

自动控制系统数字仿真/韩璞，朱希彦编著．－北京：中国电力出版社，1995

ISBN 7-80125-036-2

Ⅰ．自…　Ⅱ．①韩…②朱…　Ⅲ．自动控制系统-数字仿真　Ⅳ．①TP273②TP391．9

中国版本图书馆 CIP 数据核字（95）第 07744 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路6号　邮政编码100044）

北京市四季青印刷厂印刷

各地新华书店经售

1996年　1月第一版　　1996年　1月北京第一次印刷

850×1168 毫米　32 开本　10.25 印张　271 千字

印数 0001－4080 册　定价 13.10 元

前　言

笔者从事仿真实践和教学已有10余年。此期间，正处于我国数字仿真技术迅速发展的时期。由于电子计算机的迅速发展，推动了数字仿真的广泛应用。笔者在热工过程控制、发电厂及电力系统等专业的教学中，深感选用教材的困难。此外，几年来笔者研究设计的通用仿真软件 ASSPP-B1[4]、SSSA[5]、MI-RTS[38]、CTES-1[55]在国内得到了广泛使用。许多使用者很想了解该软件系统的仿真原理及程序设计方法。这些都促使笔者编写本书。本书力求通俗易懂、由浅入深，便于自学、适合讲授，并作为 ASSPP-B1、SSSA、MI-RTS、CTES-1软件用户的工具书。

本书详细介绍了数字仿真的原理，首次用离散相似法的理论讨论了各种数值积分公式，从而揭示了数值积分法在数字仿真中的内在意义。本书详细论述了专用仿真程序及通用仿真程序的设计方法，以利于读者了解各种仿真软件包的编制原理及方法。据此，读者也可自行编制所需的通用仿真软件。目前，各种仿真训练器的广泛应用，使得更多的工程技术人员及管理人员需要了解实时仿真技术。为此，本书专门论述了实时仿真技术。上述各种设计方法均有实例说明。

本书介绍了笔者多年来研究设计的仿真软件 MI－RTS 及 DARE－P 仿真语言，讲解了数字控制系统的仿真方法及自动控制系统参数优化的方法。

本书的程序设计均采用高级 BASIC 语言及 2.13H 汉字系统。在书最后，还附有高级 BASIC 语言、2.13H 汉字特显功能简介，以便读者参考。

本书注重理论联系实际，许多材料来自笔者多年来的教学和实践经验。其中例题及习题大都选自笔者所遇到的实际问题。

由于本书按仿真设计步骤循序编写，也兼顾了通用性及实用

性，对于初编仿真程序可能遇到的困难问题也都作了重点论述，所以较适用于仿真技术的初学者，也较适合作为过程控制专业各类学生的教材，并供从事自动控制工作的专业人员参考。

本书第一至第六章由韩璞、朱希彦合编，第七至第十章由韩璞编写，并由韩璞任全书主编。

本书由清华大学自动化系熊光楞教授主审，提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

另外，华北电力学院北京研究生部何适生教授也详细审阅了本书，对书中的文字论述及内容都提出了许多修改意见，华北电力学院动力工程系李遵基教授在软件包的编制应用和本书的出版过程中给予了大量帮助和关心，王印松讲师对本书文字的论述提出了修改意见，在此一并表示深切的谢意。

值得一提的是，朱希彦副教授在病危期间还在为修改本书书稿作了最后的努力。

由于作者水平所限，书中公式推导可能欠严谨，论述方面可能有片面性，错误之处望读者指正。

韩　璞

1993年10月2日

目　录

第一章 绪 论

§1-1 仿真的概念

仿真技术是利用系统模型对真实系统或设想的系统进行实验的一门综合性技术。这里所说的模型可以是物理模型，也可以是数学模型。

利用物理模型进行仿真，叫做物理仿真。物理仿真的理论基础是相似理论，其必要条件是几何相似，而且对于动态过程来说，还要满足各有关的相似准则数相等的条件。物理仿真主要用于不易求得系统数学模型的情况。

利用数学模型进行仿真，实质上就是对该数学模型求解。如果用计算机来求解，就称为计算机仿真。采用不同类型的计算机进行仿真，构成了目前三种主要的仿真系统，即使用模拟计算机的模拟仿真，使用数字计算机的数字仿真及使用混合计算机的混合仿真[1]。本书仅介绍数字仿真。

下面举一个简单的例子，使读者对计算机仿真建立起一初步的概念。

【例 1-1】 求一个从静止状态中以加速度 a 开始直线运行的卡车的运动规律。

【解】 根据题意，不难得到卡车运动的微分方程及其初始条件为

$$\begin{cases} \ddot{s}(t) = a; \\ \dot{s}(0) = 0 \\ s(0) = 0 \end{cases}$$

解得
$$s(t) = \frac{1}{2}at^2$$

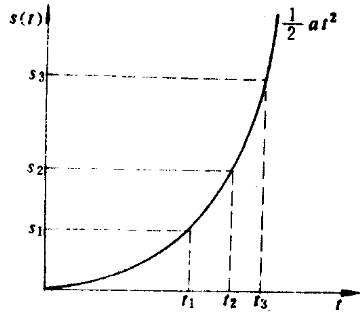

图 1-1 卡车运动规律曲线

式中，$s(t)$为卡车离起始点的距离，它是时间t的函数。卡车运动的规律曲线见图1-1。

上述的例子已包含了仿真的全过程，即并没有让卡车真正运动，而是用数学模型来求解卡车运动规律。如果这个求解过程由计算机来完成，就称之谓计算机仿真。当然实际系统的仿真并不这么简单。就拿上述的卡车运动来说，实际的卡车不可能总是作均加速运动。

一般来说，计算机仿真可分为以下几大步骤（参见图 1-2）：

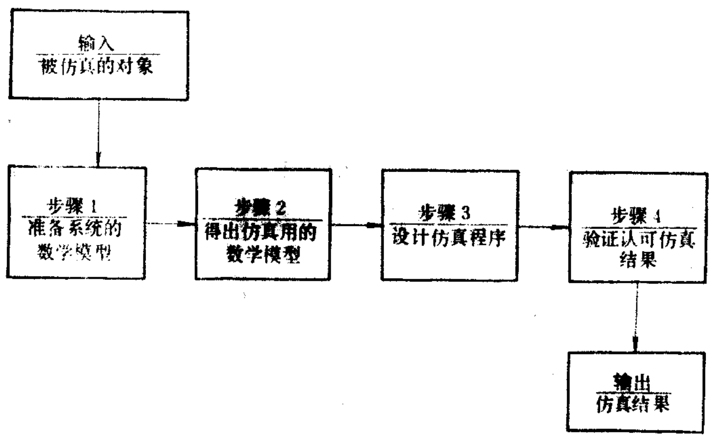

图 1-2 计算机仿真的步骤

步骤 1：准备系统的数学模型。它涉及到数学模型形式的选择及参数估计等。该步也称之为一次建模。

步骤 2：得出仿真用的数学模型。它通常是离散系统方框图或差分方程组的形式。该步称之为二次建模，即连续系统的离散化。

步骤 3：设计仿真程序。

步骤 4：验证认可仿真结果。只有当仿真设计者认可了仿真的

必要条件，以及认为决定这些条件所进行的试验和验证工作满足要求以后，仿真工作人员才可以认可该仿真程序。这是必不可少的。认可后，将仿真结果输出。

计算机仿真的分类方法很多。按描述系统的模型来分，它可分为连续系统仿真和离散事件系统仿真[2,3]；按仿真试验时的时间标尺 τ 与实际时间标尺 t 之间的比例关系来分，它可分为实时仿真 $(\tau/t=1)$ 和非实时仿真 $(\tau/t\neq1)$。其中，实时仿真主要用在有实物参与仿真实验的情况下。本书第七章、第九章将介绍实时仿真。

§1-2 仿真的应用

采用计算机仿真技术可以大大降低试验费用，缩短试验时间，并提高试验的安全性。所以，近10年来计算机仿真技术发展很快，并得到广泛应用。

一、控制系统的数字仿真是仿真应用的重要方面

80年代以来，国内开发了一系列设计控制系统和整定系统参数的仿真程序包，使得仿真工作人员不必自己编程，便可方便地进行仿真操作，了解已有控制系统的性能或设计新的控制系统。笔者研制的仿真程序包[4,5]已应用于过程控制领域，在军事工业中也得到了一定的应用及推广。

二、计算机仿真技术在培训方面的重要作用

仿真培训装置发展很快，应用非常广泛。各种类型飞机的飞行员培训器已在世界各国普遍使用。现在已可以在地面进行战斗机的格斗训练。宇航操作、船舶驾驶、武器使用等均可在仿真装置上进行。石油、化工、电力等生产过程的操作人员等亦可用仿真训练装置进行培训。利用仿真培训，可以节省能源，缩短培训时间，特别是可以进行一些在实际设备上无法实现的培训科目，如事故演习等。

我国第一台200MW火电机组仿真训练器已由清华大学于

1983年5月研制成功，我国第一台引进的550MW火电站仿真训练器已安装在华北电力学院，电站仿真训练器的研制工作正在国内广泛开展。

三、非工程系统仿真应用的迅速发展

用于经济管理和商业对策方面的公司模型近几年在国外有很大发展。对北美和欧洲2000个年销售额在500万美元以上的企业进行调查的结果表明，有300个已建立了或正在建立公司模型[6]，以便对企业、车间、部门等进行某一特定目标的仿真，以取得较好的管理对策。另外在医学方面，甚至对社会系统、生物系统、环境系统都可以进行仿真研究。

第二章 控制系统的数学模型

连续系统可以用高阶微分方程描述。传递函数则可以用来描述线性系统。连续系统的数字仿真可归纳为用数字计算机求解高阶微分方程的问题。由于数字计算机一般不能对高阶微分方程直接求解，为此需先将高阶微分方程转换成等价的连续时间状态方程（即一阶微分方程组），再转换成差分方程（或离散状态方程）。数字计算机很容易用递推法对差分方程求解。该差分方程的解在离散时刻的值应等于或近似等于原微分方程同一时刻的解值。二者的差值即所谓仿真误差。本章主要讨论如何求取连续系统的状态方程。在第三、四章中将再介绍由连续时间状态方程求取离散时间状态方程的方法。

§2-1　连续系统的数学模型

【例 2-1】　有一力学系统，见图 2-1，设其外作用力为 F，输出位移为 x，系统质量为 m，阻尼器的阻尼系统为 f，弹簧的弹性系数为 k，求系统的数学模型。

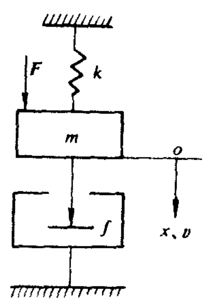

图 2-1　〔例 2-1〕的力学系统

【解】　根据牛顿定律，有

$$\left.\begin{aligned} m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}+fv+kx&=F \\ \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}&=v \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}1)$$

式(2-1)即为图 2-1 所示力学系统的状态方程(空间)表示法，其状态变量为 v

和 x。

把式（2-1）改写成

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+f\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+kx=F \tag{2-2}$$

式（2-2）即为该系统的微分方程表示法。

对式（2-2）取拉氏变换，可得

$$s^2mx(s)+sfx(s)+kx(s)=F(s)$$

经整理，得

$$\frac{x(s)}{F(s)}=\frac{1}{ms^2+fs+k} \tag{2-3}$$

式（2-3）即为图 2-1 所示力学系统的传递函数表示法。

1. 微分方程描述

一般的单输入/单输出连续系统可用如下微分方程描述

$$a_n\frac{\mathrm{d}^ny}{\mathrm{d}t^n}+a_{n-1}\frac{\mathrm{d}^{n-1}y}{\mathrm{d}t^{n-1}}+\cdots+a_1\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}+a_0y$$

$$=b_n\frac{\mathrm{d}^nu}{\mathrm{d}t}+b_{n-1}\frac{\mathrm{d}^{n-1}u}{\mathrm{d}u^{n-1}}+\cdots+b_1\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}+b_0u \tag{2-4}$$

式中 y——系统的输出量；

u——系统的输入量。

2. 传递函数描述

一般单输入/单输出连续系统也可用传递函数表示为

$$\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{b_ns^n+b_{n-1}s^{n-1}+\cdots+b_1s+b_0}{a_ns^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_1s+a_0} \tag{2-5}$$

式中 $Y(s)$——系统输出量 $y(t)$ 的拉氏变换；

$U(s)$——系统输入量 $u(t)$ 的拉氏变换。

3. 状态方程描述

单输入/单输出系统的状态向量微分方程（简称状态方程）为

$$\dot{X}=AX+BU \tag{2-6}$$

用向量形式表示系统的输出则为

$$Y=CX+DU \tag{2-7}$$

其中，式（2-6）、式（2-7）的系数矩阵 A，B，C，D 分别为

$$A=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n}\\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n}\\ \vdots & & & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn}\end{bmatrix} \qquad B=\begin{bmatrix}b_1\\ b_2\\ \vdots\\ b_n\end{bmatrix}$$

$$C=[c_1c_2\cdots c_n] \quad D=\text{常数}$$

4. 差分方程描述

由于辨识技术的发展，现在有些对象模型也可用差分方程来描述．其一般形式为

$$\begin{aligned}&a_ny[(k+n)T]+a_{n-1}y[(k+n-1)T]\\&+\cdots+a_1y[(k+1)T]+a_0y[kT]\\=&b_nu[(k+n)T]+b_{n-1}u[(k+n-1)T]\\&+\cdots+b_1u[(k+1)T]+b_0u[kT]\end{aligned} \tag{2-8a}$$

对式（2-8a）两边进行 Z 变换并移项，得系统的 Z 传递函数为

$$\frac{Y(z)}{U(z)}=\frac{b_nz^n+b_{n-1}z^{n-1}+\cdots+b_1z+b_0}{a_nz^n+a_{n-1}z^{n-1}+\cdots+a_1z+a_0} \tag{2-8b}$$

式中 $Y(z)$——系统输出量 y〔kT〕的 Z 变换；

$U(z)$——系统输入量 u〔kT〕的 Z 变换。

以后将看到，差分方程即为所求的仿真模型。

§2-2 微分方程、传递函数、状态方程之间的转换

由于在仿真中经常用到的是状态方程，所以有些用微分方程、传递函数描述的系统在仿真前先要将微分方程、传递函数转化成状态方程描述的形式。下面就举几个例子来说明它们之间的转换方法。

一、由微分方程求状态方程

1. 输入函数无导数项时

【例 2-2】 把由如下微分方程描述的系统转化为状态方程描

述的形式。

$$\dddot{y}+2\ddot{y}+3\dot{y}+4y=5u \tag{2-9}$$

$$y(0)=1,\dot{y}(0)=2,\ddot{y}(0)=3$$

【解】 令 $x_1=y$，$x_2=\dot{y}$，$x_3=\ddot{y}$，则

$$\dot{x}_1=x_2,\quad \dot{x}_2=x_3,\quad \dot{x}_3=-4x_1-3x_2-2x_3+5u$$

写成矩阵形式，即可得状态方程

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\-4&-3&-2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\0\\5\end{bmatrix}u$$

输出方程 $y=[1\ 0\ 0]\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{bmatrix}$

状态变量初值

$$\begin{cases}x_1(0)=y(0)=1\\ x_2(0)=\dot{y}(0)=2\\ x_3(0)=\ddot{y}(0)=3\end{cases}$$

对于用一般微分方程描述的系统

$$y^{(n)}+a_{n-1}y^{(n-1)}+\cdots+a_1y^{(1)}+a_0y=b_0u \tag{2-10}$$

其状态方程描述为

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \vdots\\ \dot{x}_{n-1}\\ \dot{x}_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&1&0&\cdots&0\\0&0&1&\cdots&0\\ \vdots&\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\0&0&0&&1\\-a_0&-a_1&-a_2&\cdots&-a_{n-1}\end{bmatrix}$$

$$\times\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\\vdots\\x_{n-1}\\x_n\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\0\\\vdots\\0\\b_0\end{bmatrix}u \tag{2-11}$$

输出方程为 $$y=[1\ 0\ \cdots\ 0]\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\\vdots\\x_n\end{bmatrix} \tag{2-12}$$

状态变量初值为

$$\begin{bmatrix}x_1(0)\\x_2(0)\\\vdots\\x_n(0)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}y(0)\\\dot{y}(0)\\\vdots\\y^{(n-1)}(0)\end{bmatrix} \tag{2-13}$$

其中：$x_1=y$，$x_2=\dot{y}$，$x_3=\ddot{y}$，…，$x_n=y^{(n-1)}$。

2. 输入函数有导数项时

【例 2-3】 把由如下微分方程描述的系统转化为状态方程描述的形式

$$\dddot{y}+2\ddot{y}+3\dot{y}+4y=5\dot{u}+6u \tag{2-14}$$

式中，u 为单位阶跃函数；$y(0)=1,\dot{y}(0)=2,\ddot{y}(0)=3$。

【解】 此方程不能用上述公式及方法直接求解，因为等式右侧含有导数项，所以改用下述的降阶法。

对式（2-14）两边同时取不定积分一次，即

$$\ddot{y}+2\dot{y}+3y+\int 4y\mathrm{d}t=5u+\int 6u\mathrm{d}t \tag{2-15}$$

把积不出结果的项移到等式右边，得

$$\ddot{y}+2\dot{y}+3y=5u+\int(6u-4y)\mathrm{d}t \tag{2-16}$$

令 $\dot{x}_3=6u-4y$，则得

$$\ddot{y}+2\dot{y}+3y=5u+x_3 \tag{2-17}$$

用同样的方法对式(2-17)两边再积一次分并整理，得

$$\dot{y}+2y=\int(5u+x_3-3y)\mathrm{d}t \tag{2-18}$$

令 $\dot{x}_2=5u+x_3-3y$，则得

$$\dot{y}+2y=x_2 \tag{2-19}$$

同理对式(2-19)积分得

$$y=\int(x_2-2y)\mathrm{d}t \tag{2-20}$$

令 $\dot{x}_1=x_2-2y$，则得

$$y=x_1 \tag{2-21}$$

把式(2-21)代入式(2-16)、式(2-18)、式(2-20)，即可得到该系统的状态方程描述为

$$\left.\begin{aligned}\dot{x}_1&=x_2-2x_1\\ \dot{x}_2&=x_3-3x_1+5u\\ \dot{x}_3&=-4x_1+6u\end{aligned}\right\} \tag{2-22}$$

输出方程为 $y=x_1$ (2-23)

由式(2-17)、式(2-19)、式(2-21)可得到各状态变量的初值

$$x_1(0)=y(0)=1$$

$$x_2(0)=\dot{y}(0)+2y(0)=2+2\times1=4$$

$$\begin{aligned}x_3(0)&=\ddot{y}(0)+2\dot{y}(0)+3y(0)-5u(0)\\ &=3+2\times2+3\times1-5\times0=10\end{aligned}$$

根据上述方法，可以得到一般的通式：

对于微分方程描述的系统

$$\begin{aligned}&y^{(n)}+a_{n-1}y^{(n-1)}+\cdots+a_1y^{(1)}+a_0y\\ &=b_nu^{(n)}+b_{n-1}u^{(n-1)}+\cdots+b_0u\end{aligned} \tag{2-24}$$

$$y(t)|_{t=0}=y(0),\ \dot{y}(t)|_{t=0}=y_1(0)\cdots$$

$$y^{(n-1)}(t)|_{t=0}=y^{n-1}(0)$$

其状态方程描述为