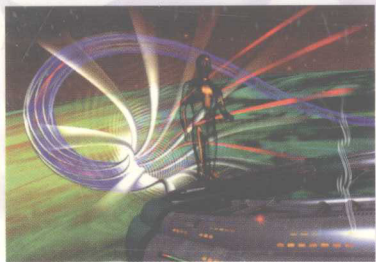


FANGZHEN JISHU JIQI YINGYONG

# 仿真技术及其应用

杜长龙  
赵继云  
储祥辉 编著

FANGZHEN JISHU  
JIQI YINGYONG



中国矿业大学出版社



# 仿真技术及其应用

杜长龙 赵继云 储祥辉 编著

中国矿业大学出版社

## 内容简介

本书着重从应用的角度介绍计算机仿真技术,并按照仿真研究的一般步骤展开内容。全书共分八章,在对仿真的概念、仿真研究过程和仿真类型作概述性介绍后,先讲述系统建模方法和状态空间法仿真模型,再分别介绍连续系统的各种数字仿真方法及应用,包括数值积分法、离散相似法和快速仿真方法,同时还简要介绍了采样控制系统的仿真,最后对基于仿真技术的系统参数优化设计方法及仿真优化的应用作了详细论述。

本书可用作高等理工院校机械及机电类专业研究生和本科生的教材,也可供从事机电液系统设计研究的科研和工程技术人员参考。

责任编辑 李士峰

## 图书在版编目(CIP)数据

仿真技术及其应用/杜长龙,赵继云,储祥辉编著.  
—徐州:中国矿业大学出版社,2000.11  
ISBN 7-81070-259-9  
I. 仿… II. ①杜…②赵…③储… III. ①计算机仿真  
②计算机仿真-应用-液压 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 56311 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

中国矿业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 850×1168 1/32 印张 6 字数 150 千字

2000 年 11 月第 1 版 2000 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—2050 册 定价 12.00 元

# 前 言

计算机仿真是近几十年发展起来的一种综合性实验技术。该技术已广泛地应用于各类系统的分析、设计与综合,并取得显著的效果。

为了学习掌握这项实用的先进技术,各理工科院校大都在研究生和本科生中开设了计算机仿真课。作者自1989年开始为机械和机电类的研究生开设这门课程,并一直从事液压系统的计算机仿真研究。《仿真技术及其应用》一书即是作者在十多年讲授计算机仿真课程的基础上,结合数年来在液压系统仿真方面的研究成果和工程实践,并参考80年代以来出版的有关计算机仿真方面的教材及文献编写而成的。本书着重从应用出发,按照仿真研究的一般过程和步骤,系统地介绍了仿真技术的原理、方法及应用,通俗易懂,便于对仿真技术的自学和掌握。该书既可用作高等理工科院校机械及机电类专业研究生和本本科生的教材,也可作为从事机电液系统设计研究的科技和工程技术人员的参考用书。

全书共分八章:第一章是关于计算机仿真的概念性介绍,使读者对仿真的涵义、仿真研究过程、仿真类型以及各类仿真方法有一个总体了解。第二章介绍系统的建模方法,这是进行仿真研究的基础。第三章讲解状态空间法仿真模型,在介绍状态空间法的概念及其表达的基础上,讨论了由各种形式的数学模型转化为状态空间仿真模型及其离散化仿真模型的原理和方法。第四章到第六章详细介绍了连续系统的各种数字仿真方法及应用,包括数值积分法、离散相似法和快速仿真方法。第七章简要介绍了采样控制系统的

仿真技术。第八章论述了基于仿真技术的参数优化设计方法及其在液压系统设计中的实际应用,这是仿真技术在应用方面的重要内容。第三章至第六章是全书的重点,也是计算机仿真的核心内容。

作为教材,本书所需的前置课程有线性代数、拉普拉斯变换、计算方法、控制工程、优化设计和计算机算法语言等。

全书讲授约 30 学时,同时安排 6~8 个学时的编程和上机。

书中带 \* 的章节为自学内容。

本书的撰写,参考了有关计算机仿真方面的教材和文献,谨向教材和文献的作者表示谢意!

在本书撰写、打印和出版过程中,得到了同事和朋友的热情帮助和大力支持,在此表示衷心的感谢!

限于作者水平,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2000 年 9 月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 1 计算机仿真概论 .....             | 1  |
| 1.1 计算机仿真的基本概念 .....        | 1  |
| 1.1.1 仿真的涵义和一般过程 .....      | 1  |
| 1.1.2 仿真的类型 .....           | 5  |
| * 1.2 模拟仿真与数字仿真 .....       | 6  |
| 1.2.1 模拟仿真 .....            | 6  |
| 1.2.2 数字仿真 .....            | 8  |
| * 1.3 连续系统仿真与离散事件系统仿真 ..... | 10 |
| 1.3.1 连续系统仿真 .....          | 10 |
| 1.3.2 离散事件系统仿真 .....        | 12 |
| * 1.4 计算机仿真的发展及应用 .....     | 17 |
| 1.4.1 计算机仿真的发展 .....        | 17 |
| 1.4.2 仿真技术的应用 .....         | 18 |
| * 2 系统建模方法 .....            | 21 |
| 2.1 建模基础 .....              | 21 |
| 2.1.1 数学模型与建模原则 .....       | 21 |
| 2.1.2 建立数学模型的信息来源 .....     | 22 |
| 2.1.3 建模的途径 .....           | 23 |
| 2.1.4 模型可信性 .....           | 23 |
| 2.1.5 建模步骤 .....            | 24 |
| 2.2 数学模型的表述形式 .....         | 25 |
| 2.2.1 微分方程 .....            | 25 |

|       |                |    |
|-------|----------------|----|
| 2.2.2 | 传递函数           | 27 |
| 2.2.3 | 状态变量模型         | 27 |
| 2.2.4 | 结构图模型          | 28 |
| 2.3   | 解析建模与辨识建模      | 28 |
| 2.3.1 | 解析建模           | 28 |
| 2.3.2 | 辨识建模           | 32 |
| 2.4   | 工程系统中典型环节的数学模型 | 35 |
| 3     | 状态空间法仿真模型      | 46 |
| 3.1   | 状态空间法的基本概念及其表达 | 46 |
| 3.2   | 微分方程转化法建模      | 51 |
| 3.2.1 | 高阶微分方程转化       | 51 |
| 3.2.2 | 任意排列的微分方程组转化   | 54 |
| 3.3   | 结构图转换法建模       | 59 |
| 3.3.1 | 典型环节的确定及其矩阵表达  | 59 |
| 3.3.2 | 连接矩阵           | 60 |
| 3.3.3 | 状态方程           | 61 |
| 3.4   | 连续系统的离散化模型     | 64 |
| 3.4.1 | 状态转移矩阵和转移方程    | 64 |
| 3.4.2 | 差分方程           | 66 |
| 4     | 连续系统数值积分法仿真    | 68 |
| 4.1   | 数值积分法的基本概念     | 68 |
| 4.2   | 数值积分法          | 71 |
| 4.2.1 | 龙格—库塔法         | 71 |
| 4.2.2 | 阿当姆斯法          | 75 |
| 4.2.3 | 汉明法            | 76 |
| 4.3   | 数值积分法的选用及步长确定  | 78 |
| 4.3.1 | 数值积分法选用        | 78 |
| 4.3.2 | 计算步长的确定        | 80 |

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 4.4   | 仿真程序设计.....                  | 82  |
| 4.4.1 | 仿真程序的基本功能与一般结构.....          | 82  |
| 4.4.2 | 程序设计.....                    | 84  |
| * 4.5 | 数值积分法仿真应用.....               | 84  |
| 5     | 连续系统离散相似法仿真.....             | 96  |
| 5.1   | 按系统离散相似法仿真.....              | 96  |
| 5.1.1 | 离散系数矩阵的计算.....               | 96  |
| 5.1.2 | 仿真程序设计.....                  | 99  |
| 5.2   | 按环节离散相似法仿真 .....             | 101 |
| 5.2.1 | 典型环节的离散系数矩阵及其离散方程 .....      | 101 |
| 5.2.2 | 仿真程序设计 .....                 | 107 |
| * 5.3 | 含有非线性环节的系统仿真 .....           | 110 |
| 5.3.1 | 典型非线性环节仿真子程序 .....           | 111 |
| 5.3.2 | 含有非线性环节的离散相似法仿真程序设计<br>..... | 114 |
| 5.3.3 | 非线性系统仿真举例 .....              | 114 |
| 6     | 连续系统的快速仿真 .....              | 118 |
| 6.1   | 增广矩阵法 .....                  | 118 |
| 6.1.1 | 基本思想 .....                   | 118 |
| 6.1.2 | 典型输入信号的增广矩阵 .....            | 120 |
| 6.1.3 | 采用增广矩阵法求取仿真模型的步骤 .....       | 123 |
| 6.2   | 时域矩阵法 .....                  | 124 |
| 6.2.1 | 时域矩阵法的原理及时域矩阵 .....          | 124 |
| 6.2.2 | 时域矩阵 G 的求取 .....             | 126 |
| 6.2.3 | 用时域矩阵法求闭环系统的响应 .....         | 128 |
| 6.3   | 替换法 .....                    | 133 |
| 6.3.1 | 替换法原理及替换步骤 .....             | 133 |
| 6.3.2 | 双线性变换算法及程序 .....             | 135 |

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 6.3.3 | 高阶差分方程的仿真计算 .....     | 137 |
| * 7   | 采样控制系统仿真 .....        | 140 |
| 7.1   | 采样控制系统的特点和仿真方法 .....  | 140 |
| 7.1.1 | 采样控制系统的组成及其特点 .....   | 140 |
| 7.1.2 | 采样控制系统的仿真方法 .....     | 141 |
| 7.2   | 常用数字控制器模型 .....       | 144 |
| 7.2.1 | PID 控制器模型 .....       | 144 |
| 7.2.2 | 最小拍系统控制器模型 .....      | 145 |
| 7.3   | 采样控制系统仿真应用举例 .....    | 147 |
| 8     | 基于仿真技术的参数优化设计方法 ..... | 149 |
| * 8.1 | 优化设计基础 .....          | 149 |
| 8.1.1 | 优化设计数学模型 .....        | 150 |
| 8.1.2 | 优化设计方法 .....          | 152 |
| 8.2   | 仿真优化的特点和方法 .....      | 166 |
| 8.2.1 | 仿真优化的特点和一般步骤 .....    | 166 |
| 8.2.2 | 系统的性能指标及目标函数处理 .....  | 168 |
| 8.2.3 | 仿真方法和优化方法的选取 .....    | 171 |
| * 8.3 | 仿真优化技术的应用 .....       | 171 |
|       | 参考文献 .....            | 179 |

# 1 计算机仿真概论

计算机仿真是近几十年发展起来的一种综合性实验技术,它建立在系统科学、系统建模、控制理论、计算机技术及计算方法等学科的基础上,已成为分析、研究各类系统的一种先进、有效的手段。

本章将介绍计算机仿真的基本概念,主要包括:仿真的涵义、仿真过程和仿真的类型;模拟仿真与数字仿真的基本方法;连续系统与离散事件系统仿真的概念和方法;最后对计算机仿真的发展及应用作一简单介绍。

## 1.1 计算机仿真的基本概念

### 1.1.1 仿真的涵义和一般过程

所谓仿真,就是模仿真实事物,也就是用一个模型来模仿真实系统。基于这种定义,仿真分为物理仿真和数学仿真。物理仿真指的是用一个物理模型来仿真实际系统,也就是用一个由实际系统放大或缩小的模型来进行实验研究,它的理论基础是相似原理。而数学仿真则是通过数学模型来仿真实际系统。由于数学仿真需要对数学模型进行大量的解算,而这项工作往往依靠计算机来完成。因此,数学仿真又称为计算机仿真,在本书中所提到的仿真均指计算机仿真。

所以,计算机仿真是指在建立数学模型的基础上,以计算机为工具对实际系统进行实验研究的一种方法。

仿真既可以对已有的系统进行研究,也可以对即将设计的系统进行研究。

在对已有的系统进行仿真时,大致可由以下过程组成:首先,根据实际物理系统通过理论推导或系统辨识,建立描述该系统的数学模型,然后,通过“模化”建立仿真模型,并编制仿真程序,将仿真程序在计算机中运行,从而验证该系统的优劣,给系统的改进和评价提供可靠数据。

对即将设计的系统进行仿真时,其过程可由以下内容组成:首先,根据技术要求,由设计者拟订初步方案,并通过静态设计确定系统各部分参数,然后,通过理论推导建立描述该系统的数学模型,将该数学模型进行模化处理形成仿真模型,并编制仿真程序,输入计算机运行,从而进行方案论证和参数分析,也可通过仿真优化技术求得最佳参数匹配,最后通过绘图机为设计者提供整套设计图纸。

综上所述,进行仿真研究的过程可以归纳为以下几个步骤:

- (1) 建立描述系统的数学模型;
- (2) 通过模化把系统的数学模型转变成能在计算机中运行的仿真模型;
- (3) 根据仿真模型编制仿真程序;
- (4) 在计算机中运行仿真程序,根据技术的要求修改模型和校核。

上述步骤涉及到三个具体的部分:一是系统;二是数学模型;三是计算机,并且有两次模型转化。第一次是将系统转变成数学模型,第二次是将数学模型转变成仿真模型,这可用图 1-1 来表示。

通常将一次模型化的技术称为系统建模技术,而将二次模型化、仿真模型编程和校核的技术称为仿真技术。前者是研究系统与数学模型之间的关系,后者是研究数学模型与计算机之间的关系。

基于以上论述,可以给计算机仿真下一个定义:将一个能描述

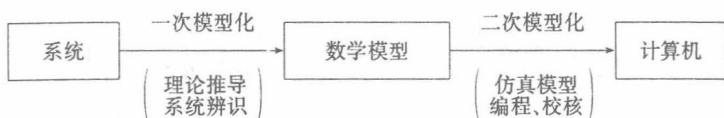


图 1-1 两次模型化过程

系统的数学模型进行二次模型化处理,变成一个仿真模型,然后将它放到计算机中运行的过程就称为计算机仿真。下面以一机械系统为例,说明仿真的过程。

图 1-2 所示为大家所熟悉的质量—阻尼—弹簧机械运动系统,应用牛顿定律,该系统可以用如下数学模型描述:

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

式中  $y$ ——质量  $m$  的位移;

$f$ ——作用于质量  $m$  上的力。

二阶微分方程式(1-1)可改写成两个一阶微分方程:

设  $x_1 = y, x_2 = \frac{dy}{dt}$

则有:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\frac{k}{m}x_1 - \frac{B_c}{m}x_2 + \frac{f}{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式(1-2)用矩阵表示为:

$$\frac{dX}{dt} = AX + Bu \quad (1-3)$$

其中:

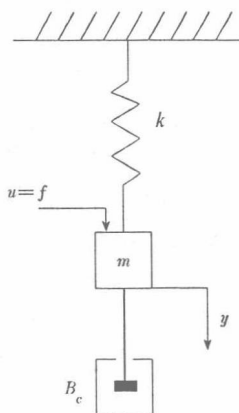


图 1-2 质量-阻尼-弹簧机械系统

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \frac{dX}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{B_c}{m} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}, u = f$$

(1-1)~(1-3)式是图 1-2 所示机械系统数学模型描述的不同形式。

将(1-3)式进行模化处理,可得以下仿真模型:

$$X[(n+1)T] = (TA + I)X(nT) + TBu(nT) \quad (1-4)$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

式中  $T$ ——时间增量,即仿真步长;

$I$ ——单位矩阵。

根据(1-4)式的仿真模型即可编制仿真程序,其程序框图如图 1-3 所示。编写完仿真程序后,即可上机调试运行。

在对仿真概念、仿真步骤介绍完后,再给出一个仿真研究的详细过程(图 1-4),以便对仿真研究有一个更加明确的认识。

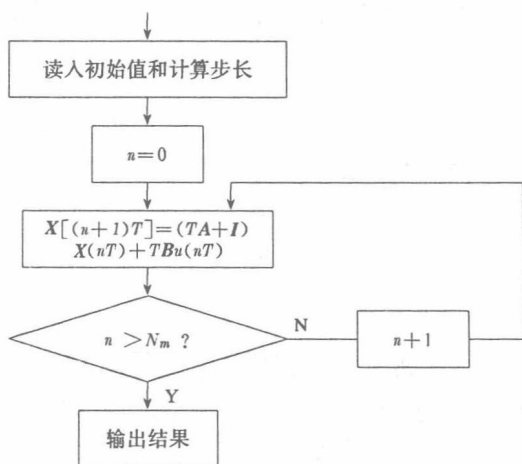


图 1-3 仿真程序框图

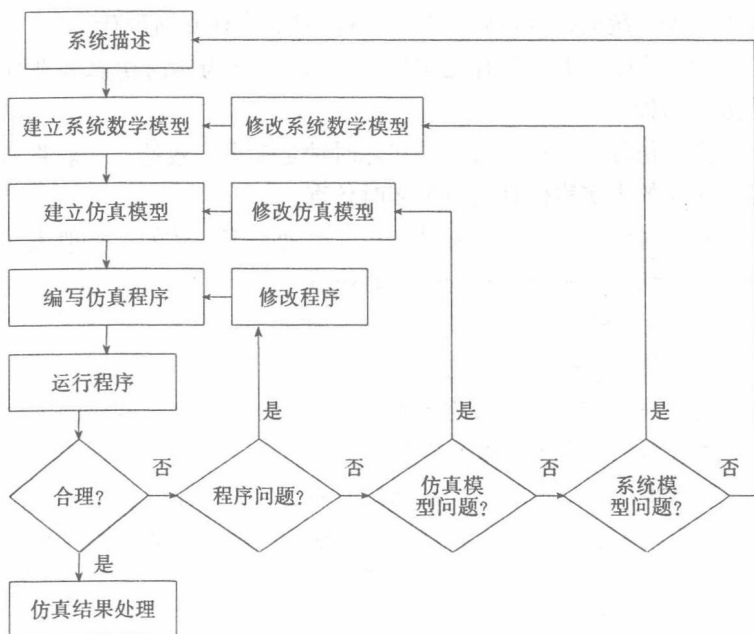


图 1-4 仿真研究流程图

### 1.1.2 仿真的类型

(1) 计算机仿真按所采用的计算机种类不同,可分为模拟仿真、数字仿真和模拟数字混合仿真三种。

模拟仿真——将系统模型编排在模拟计算机中并使之运行。

数字仿真——将系统模型用一组程序来描述,并使它在数字计算机中运行。

模拟数字混合仿真——将系统模型分为两部分,其中一部分放在模拟计算机中,而另一部分放在数字计算机中,两台计算机之间利用 D/A 及 A/D 转换、交换信息。

在 20 世纪 50~60 年代,模拟仿真十分流行,现在已基本被数字仿真所取代。混合仿真在 60~70 年代广泛用于航空、航天、核

电等大型系统的研究,但现在也已逐渐被数字仿真所取代。

(2) 计算机仿真按有无实物的介入,可分为实时仿真和非实时仿真两种。

实时仿真——仿真时钟与实际时钟是完全一致的。一般将有实物介入的半实物仿真归属于实时仿真。

非实时仿真——仿真时钟与实际时钟是不一致的。一般无实物介入的纯计算机仿真称为非实时仿真。

(3) 计算机仿真按其所仿真的系统模型的特性,可分为连续系统仿真和离散事件系统仿真两种。

连续系统仿真——系统模型中的状态变量是连续变化的。这种模型一般可以表示为微分方程的形式。

离散事件系统仿真——系统模型中的状态变量只在某些离散时刻由于某种事件而发生变化。这种模型一般不能表示为方程式的形式,只能用一组逻辑条件或流程图来表示。

## 1.2 模拟仿真与数字仿真

模拟仿真与数字仿真是两种基本的仿真方法,本节将对这两种仿真的基本方法作一简要介绍。

### 1.2.1 模拟仿真

模拟仿真是基于数学模型相似原理上的一种方法,仿真的主要工具是模拟计算机。

模拟计算机是把实际系统的各物理量用电压量表示,以运算放大器为基本部件,可以进行积分、求和和反号等运算的计算装置,它的输入和输出均是连续的电压量。它适用于以微分方程描述的系统仿真。

下面以图 1-2 所示的机械系统为例,说明应用模拟机进行仿真的基本方法。

如图 1-2 所示,现在要求用模拟机对该系统进行仿真,求出位移  $y$ 。

首先,要建立这一系统的数学模型,这在前面已经导出,现重写如下:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + B_c \frac{dy}{dt} + ky = f \quad (1-5)$$

根据实际问题定出初始条件。现假设:

$$\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = a, \quad y(0) = b$$

由于在模拟机上仿真求解微分方程是采取逐项积分的方法,所以需要把(1-5)式改写为如下形式:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{B_c}{m} \frac{dy}{dt} - \frac{k}{m} y + \frac{1}{m} f \quad (1-6)$$

由上式可画出模拟仿真结构如图 1-5 所示。

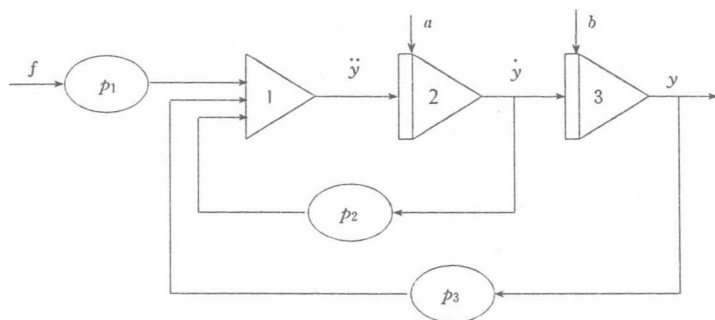


图 1-5 模拟仿真结构图

在图 1-5 中,  $p_1 = 1/m$ ,  $p_2 = -B_c/m$ ,  $p_3 = -k/m$ ,  $a$ 、 $b$  为已知的初始条件,积分器 3 的输出即为位移  $y$ 。由图 1-5 可知,为了仿真求解这一微分方程,模拟机必须具备以下部件和设备:加法器,积分器,常系数器,反相器,模拟输入量的时间函数发生器  $f(t)$ ,

设置初始条件的装置,显示或记录输出量的设备。但是,以上这些部件只能用于仿真求解常系数微分方程,如果所仿真的系统是用变系数微分方程描述的,还需要增加非线性函数发生器、乘法器等部件。

按照上述仿真结构图即可连接成模拟电路进行仿真。

需要说明的是,由于模拟机中的运算放大器有一定的线性工作范围,所以,在进行实际系统仿真时,必须合理地选择仿真时间比例尺和各变量的幅度比例尺。

从以上例子可以初步了解仿真的基本原理和方法。有关仿真的具体内容可参阅文献[1]。

由于仿真的所有运算都是同时进行的,所以运算速度快,其输出量为连续量,易于与实物连接。但仿真解题精度较低,存储和逻辑功能差,产生多变量函数困难,目前已很少使用。

### 1.2.2 数字仿真

数字仿真基于数值计算原理,其主要工具是数字计算机和仿真软件。由于数字计算机中的运算是数值计算,仿真模型一般应是离散模型,所以,为了更好地将各种原始的数学模型转变成适应于数字计算机仿真的仿真模型,需要研究各种仿真方法。

本书后面的若干章节将专门介绍数字仿真的内容,这里仅以图 1-2 所示的系统为例来说明数字仿真的基本思想。

如图 1-2 所示机械系统,要求用数字计算机对该系统进行仿真,求出位移  $y$ 。

与模拟仿真一样,首先,要建立该系统的数学模型,并确定初始条件,即

$$\begin{cases} m \frac{d^2 y}{dt^2} + B_c \frac{dy}{dt} + ky = f \\ \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = a, y(0) = b \end{cases} \quad (1-7)$$