

自动化 专业本科系列教材

Kongzhi Xitong Jisuanji Fuzhu Sheji

# 控制系统计算机辅助设计

01010010000100001

蔡启仲 等编著

重庆大学出版社

# 控制系统计算机辅助设计

蔡启仲 等编著

重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本书基本上按照工科本科生学习控制理论内容的顺序,系统地介绍了控制界最为流行的 MATLAB 语言在控制系统计算机辅助分析与设计中的应用。主要内容包括:控制系统计算机仿真的基本原理与应用;连续和离散控制系统的性能分析与控制器的辅助设计;连续和离散状态空间法分析与设计;控制系统的符号运算;SIMULINK 的应用;仿真实验;MATLAB 语言基础及语法规则;提供《控制系统分析与设计 CSCAD (V1.2) 教学示范软件包》光盘,第 3~7 章例题程序也全部附在光盘上。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化、测控技术及仪器仪表、机电一体化等工科专业的教材,也可作为广大科技人员、工程技术人员及高校教师的自学教材和参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制系统计算机辅助设计/蔡启仲等编著. —重庆:重庆大学出版社,2003.8  
(自动化专业本科系列教材)  
ISBN 7-5624-2835-2

I. 控... II. 蔡... III. 控制系统—计算机辅助设计 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 064405 号

## 控制系统计算机辅助设计

蔡启仲 等编著

责任编辑:曾显跃 版式设计:曾显跃

责任校对:蓝安梅 责任印制:秦 梅

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鹤盛

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A 区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆铜梁正兴印务有限公司印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:18.25 字数:455 千

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2835-2/TP·390 定价:29.50 元(含光盘)

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

# 前言

计算机仿真软件 MATLAB 以矩阵作为基本数据结构和以矩阵运算为基础,集科学计算和图形可视化为一体。MATLAB 是高层次的矩阵/数组语言,具有条件控制、函数调用、数据结构、输入输出、面向对象等程序语言特性。控制系统计算机辅助分析与设计作为 MATLAB 的主要应用领域之一,在 MATLAB 中具有各种用于控制系统仿真的特殊功能的工具箱,例如:控制系统工具箱、信号处理工具箱、系统辨识工具箱、鲁棒控制工具箱、神经网络工具箱、多变量频域设计工具箱、最优化工具箱、符号数学工具箱等,以及 SIMULINK 对动态系统进行建模、仿真和分析的软件包。而控制科学与工程是一门研究自动控制的理论、方法、技术及其工程应用的学科,它是 20 世纪最重要的科学理论和成就之一,其各阶段的理论发展及技术进步都与生产和社会实践需求密切相关。目前,控制科学和工程的应用遍及工业、农业、交通、环境、军事、生物、医学、经济、金融、人口和社会各个领域。在控制科学与工程学科的发展过程中,控制系统的计算机辅助分析与设计对于控制工程的理论研究和应用研究起着极其重要的作用。在本科教学中,《控制系统的计算机辅助分析与设计》课程与自动化专业其他控制类课程密切相关,例如:《自动控制原理》、《现代控制理论》、《计算机控制技术》、《运动控制系统》、《过程控制》、《模糊控制》等本科专业课程,它是这些课程内容的仿真和辅助分析与设计必不可少的实验工具,也是学生进行毕业设计的计算机辅助分析和设计的参考书。所以,本教材在阐述计算机辅助分析和设计基本理论的基础上,尤其注意与其他控制类课程的密切联系,使之成为这些课程计算机仿真实验的参考书。并在计算机仿真实验部分也注重与其他课程实验装置的结合,可分为控制类课程理论验证实验和设计实验。为了便于学生在学习过程中易于掌握计算机仿真的方法,本书在内容的安排上,采用不同于现已出版的同类型国内外教材,基本上按照本科学生学习控制类课程的顺序,并考虑到部分院校将该课程部分内容和《自动控制原理》课程同时开出的情况,在内容编排上采

用先连续线性控制系统,后离散线性控制系统,先古典控制,后状态空间法的顺序。先编写对系统的分析,后编写对系统的校正设计,并将控制器的辅助设计作为重点内容予以介绍。本书阐述了控制系统仿真的编程方法、SIMULINK 的应用,介绍了符号法仿真的编程方法,以及控制系计算机辅助分析与设计实验的内容。附录 I 介绍了 MATLAB 语言基础及语法规则,附录 II 给出了一些有用的程序。本书还提供《控制系统分析与设计 CSCAD (V1.2) 教学示范软件包》光盘,附录 III 对该软件包的使用方法进行了说明;为了便于教学,第 3~7 章例题程序以命名为 example 的文件夹的形式全部附在光盘上。

本书由广西工学院蔡启仲及兄弟院校教师等编著。蔡启仲负责第 1、2、7 章,第 9 章 9.4 节第 10 章的 10.2、10.3 节,附录 I,附录 II,附录 III,《控制系统分析与设计 CSCAD (V1.2) 教学示范软件包》以及对全书进行修改与统稿。昆明理工大学廖远江负责第 3、4 章,第 9 章 9.1 节,第 10 章 10.4 节,广西工学院陈政强负责第 6 章、第 9 章 9.3 节,陕西工学院王春侠负责第 5、8 章,第 9 章 9.2 节,第 10 章 10.1 节。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化、测控技术及仪器仪表、机电一体化等工科专业的教材,也可作为广大科技人员、工程技术人员及高校教师的自学教材和参考书。

由于作者水平有限,书中的缺点错误在所难免,欢迎读者批评指教。

编者  
2003 年 3 月

# 目 录

第 1 章 控制系统仿真的基本概念 .....	1
1.1 发展历史 .....	1
1.2 系统的定义和分类 .....	2
1.3 系统仿真技术的基本概念 .....	3
1.4 系统仿真的应用 .....	6
1.5 控制系统的计算机仿真 .....	6
1.6 教材的基本结构以及本课程与其他课程的关系 .....	7
习题 .....	8
第 2 章 控制系统数学模型与 MATLAB 控制类工具箱 .....	9
2.1 控制系统的数学模型描述 .....	9
2.2 控制类工具箱 .....	15
习题 .....	17
第 3 章 单输入单输出控制系统的分析 .....	18
3.1 单输入单输出(SISO)控制系统的模型及其转换 .....	18
3.2 系统的稳态误差 .....	23
3.3 系统稳定性分析 .....	24
3.4 SISO 线性控制系统的时域分析 .....	27
3.5 SISO 线性控制系统的根轨迹分析 .....	32
3.6 SISO 线性控制系统的频域分析 .....	36
习题 .....	42
第 4 章 单输入单输出控制系统的校正 .....	46
4.1 串联校正装置的设计 .....	46
4.2 PID 控制器设计 .....	71
习题 .....	88
第 5 章 计算机控制系统的分析与校正 .....	90
5.1 模型的表达与转换 .....	91
5.2 计算机控制系统(采样控制系统)的性能分析 .....	95
5.3 计算机控制系统的离散化设计 .....	101
5.4 计算机控制系统的模拟化设计 .....	104
习题 .....	107

<b>第 6 章</b>	<b>连续和离散状态空间模型的仿真与设计</b>	109
6.1	状态空间模型的建立和转换	109
6.2	系统性能分析	116
6.3	极点配置与控制器设计	122
6.4	LQ 控制器设计	127
6.5	鲁棒控制器设计	132
	习题	135
<b>第 7 章</b>	<b>控制系统的符号运算</b>	137
7.1	基本符号运算	137
7.2	积分变换与反变换	140
7.3	单输入单输出连续和离散控制系统符号运算	141
7.4	有限拍调节器的设计	144
7.5	状态空间模型控制系统符号运算	147
	习题	151
<b>第 8 章</b>	<b>SIMULINK 的应用</b>	153
8.1	SIMULINK 界面与仿真环境	153
8.2	控制仿真模型的建立	154
8.3	控制框图模型的系统仿真	162
8.4	SIMULINK 的数据传递与交换	164
8.5	SIMULINK 建模、仿真举例	167
	习题	170
<b>第 9 章</b>	<b>控制系统计算机辅助分析与设计实验</b>	173
9.1	单输入单输出连续控制系统仿真与设计实验	173
9.2	计算机控制系统仿真实验	186
9.3	状态空间控制模型系统仿真与设计	188
9.4	控制系统的符号运算实验	190
<b>第 10 章</b>	<b>控制系统设计与仿真应用实例</b>	191
10.1	直流拖动控制系统	191
10.2	汽车运动控制系统的设计	193
10.3	跷跷板控制系统的设计	195
10.4	玻璃窑炉温度控制系统	199
<b>附录 I</b>	<b>MATLAB 语言</b>	204
I.1	MATLAB 简介及操作环境	204
I.2	MATLAB 基本特性	209
I.3	数组、矩阵的基本运算	222
I.4	关系与逻辑运算	231
I.5	向量与多项式	233
I.6	控制流与若干控制命令	237

I.7	数据的可视化 .....	244
I.8	$M$ 函数 .....	252
附录 II	程序 .....	259
附录 III	《控制系统分析与设计 CSCAD(V1.2) 教学示范 软件包》说明 .....	270
III.1	功能介绍与操作指导 .....	270
III.2	模型参数的输入与修改 .....	271
III.3	各种系统模型信息 .....	275
III.4	系统性能分析 .....	275
III.5	系统辨识模型的选择 .....	276
III.6	系统的辅助设计 .....	277
III.7	数字校正控制器设计 .....	282
III.8	模型的保存与读入 .....	282
III.9	控制系统传递函数的符号运算 .....	283
参考文献	.....	284



# 第 1 章

## 控制系统仿真的基本概念

计算机的出现和发展对现代科学技术以及人们生活的绝大多数领域产生了极其深远的影响。尤其是数值计算、数据处理、通信、数理统计、人工智能以及自动控制等方面已离不开计算机的应用。在控制系统方面,计算机除了能够直接进行在线实时控制和构成控制网络之外,而且对于控制系统的分析、设计、综合和仿真也起着越来越大的作用,计算机技术成为科学技术和工程技术人员应用计算机进行控制系统分析和设计的一项专门技术。

### 1.1 发展历史

对实际系统进行分析、综合、设计和预测研究时,需要得出系统的动态特性,这时控制系统尚未完成,需应用控制系统计算机仿真技术对系统进行预先研究;或者出于经济性和安全性的考虑,或者在实际控制系统上做实验时间长、成本高,也需用控制系统仿真技术。

控制系统仿真就是对控制系统模型的实验,它的应用已有很长的历史,大致经历了五个发展阶段。

20 世纪 50 年代以前,仿真主要是物理仿真,用物理模型仿真实际系统。例如,用 RLC 振荡电路模拟机械振动系统;用运算放大器组成电路模拟被控对象的动态模型,再用运算放大器电路组成控制器,构成闭环反馈控制系统仿真实际控制系统;又如利用许多小容量的同步机、感应电动机与直流电机组成一个系统,作为电力网的模型,研究电力系统的稳定性。

50 年代,模拟计算机和数字机仿真刚刚开始发展。

60~70 年代,数字与模拟混合仿真得到了快速发展,尤其是数字仿真发展迅速,出现了很多的数字仿真语言,例如,DSL、CSSL、DARE-P 等,使数字仿真技术得到了普及。混合仿真系统有两种基本结构:一种是在模拟机基础上增加一些数字逻辑功能——混合模拟机;另一种是由模拟机、数字计算机及其接口电路组成——数字—模拟混合计算机。模拟机计算速度快,但精度低;数字计算机计算精度高,但相对模拟机而言,计算速度较慢。混合仿真兼顾了两者的优点。

80 年代,微计算机技术得到迅速的发展,采用微机阵列、基于并行处理原理的全数字仿真系统有取代混合仿真系统的趋势。

90年代以后,随着计算机运算速度和存储容量的极大提高,以及在80年代末90年代初适于控制系统仿真的MATLAB的出现,使得在控制系统仿真领域数字仿真技术已占主导地位。MATLAB使得从事仿真技术工作的科研和工程技术人员从繁重的具体算法设计及编程中解放出来,能够集中精力对控制系统结构、性能、控制器设计及参数选择进行仿真与设计,大大地提高了工作效率和质量。

仿真技术在生态系统和自然环境领域得到了迅速的发展(如分布式仿真、图形与动画仿真等)。仿真的应用领域已在不断地扩大,已从航空、航天及国防部门转向冶金、化工、电力和其他工业部门,以及转向生物、生态、环境、经济及管理部门。涌现出一批先进的仿真软件,例如,一体化仿真软件,它以工程数据库、模型库及方法库为核心,将建模、仿真、优化及结果分析等多种功能集成在一个软件系统中,并配有很强的图形输入/输出功能,使各类用户都能方便地使用它;又如面向专用领域仿真用途的仿真软件(或称仿真器 Simulator,有面向工业过程、面向航空、面向电站、面向制造、面向控制系统、信号处理等仿真软件)。当前仿真技术已成为发展高科技必不可少的工具。

## 1.2 系统的定义和分类

### 1.2.1 系统的定义

系统是由具有特定功能的、相互间具有一定规律联系的物体所组成的总体。系统具有两个基本特性:整体性和相关性。整体性是指它是一个整体,它的各部分是不可分割的。例如,一个工厂系统,它由管理部门、生产车间、原材料仓库以及销售采购部门所组成,如缺少其中一个部门,也就无法构成一个工厂系统了。对于自动控制系统,其基本组成(如控制对象、测量元件、调节器)部分同样不可缺少其中任何一个部分。相关性是指系统内部各物体之间相互以一定规律联系,它们的特定关系形成了具有特定性能的系统。例如,电动机调速系统,它由电动机、测量元件、调节器、电机驱动电路等组成。它们相互间形成一个特定关系,因而形成了调速系统能够调速的特定性能。

### 1.2.2 系统的分类

系统的分类方法有很多,按照不同分类方法可以得到各种类型的系统,但其中最重要的一种分类方法是按其状态变化是否连续分为连续系统和离散事件系统两种。

#### (1) 连续系统

若一个系统的状态是随时间连续变化的,称为连续系统。其动态特性可以用微分方程或一组状态方程来描述。

对于采样系统,其被控量是连续的,采样数据是间断的,可用差分方程来描述,在仿真系统中仍属于连续系统。所以控制系统仿真技术基本上属于连续系统仿真范畴。

#### (2) 离散事件系统

离散事件系统的状态变化只在离散时刻发生,而且往往是随机的。通常用“事件”来表征这种变化。例如,公共汽车在行驶过程中,车上的人是不变的,而一到站台,就有人上车和下

车,这种上下车的动作称为“事件”。而且,这种“事件”只在某些时刻发生,通常是随机的。例如,“事件”发生时,上车的人数和下车的人数是随机的。

### 1.3 系统仿真技术的基本概念

仿真技术是以相似原理、系统技术、信息技术及其与应用领域有关的专业技术为基础,以计算机和各种物理效应设备为工具,利用系统模型对真实的(或设想的)系统进行动态试验研究的一门多学科的综合技术。目前,比较流行于工程技术界的仿真定义是:系统仿真是通过对系统模型的实验,研究一个存在或设计中的系统。简而言之,系统仿真是对系统动态模型的实验。系统仿真对于航天、电力、核能、石化工业等庞大而昂贵(或带有危险性)的工程系统,以及难以进行试验的社会经济、生态环境和社会灾害等问题,可以提供经济、安全和快速的定量分析;在复杂的科研课题与产品研制中,仿真技术可用来实现特定理想条件下的原理性检验和方案论证,并贯穿于研制工作的各个阶段。仿真技术还可用声、光、电、三维动画等手段来模拟实际的工作环境,进行人一机对话、接口实验和人员培训。自计算机问世以来,随着系统理论、计算机技术和建模技术的发展,仿真技术也得到了迅速的发展。现代高新技术的发展推动了仿真技术的发展,同时社会的进步、技术的更新又给仿真技术提出了诸多的问题,要求仿真技术不断持续地发展。

仿真技术是一门综合性的技术学科,它为进行系统的研究、分析、决策、设计以及对专业人员的培训提供了一种先进的手段,增加了人们对客观世界内在规律的认识能力,有力地推动了那些过去以定性分析为主的学科向定量分析的方向发展。在系统研究及人员培训中采用仿真技术,可大大地减少费用,缩短周期。仿真技术广泛地应用于工程及非工程的广大领域,并取得了巨大的社会经济效益。

控制系统仿真是仿真技术的一个重要分支,具有一般仿真系统的特点与要素。由于控制系统的分析与设计是控制系统设计的主要工作内容,因此控制系统仿真技术主要研究控制系统的分析和设计,为实际控制系统的设计与实现,提供预研成果和设计以及系统调试的方案。

#### 1.3.1 系统仿真的分类

系统仿真的分类方法主要有以下几种:

##### (1) 根据计算机分类

- ①模拟计算机仿真 即将系统的模型编排在模拟计算机上,并使之运行。
- ②数字计算机仿真 即将系统模型用一组程序来描述,并使之在计算机上运行。
- ③数模混合仿真 即将系统模型分为两部分,一部分放在模拟计算机上,另一部分放在数字机上,两台计算机之间用 D/A、A/D 转换交换信息。

目前仿真方法以数字计算机仿真为主。

##### (2) 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类

利用数字计算机仿真时的动态数学模型的时间标尺可以与实际物理系统的时间标尺不同。前者受仿真时钟控制,而后者受实际时钟控制。

- ①实际时钟仿真 即仿真时钟与实际时钟是完全一致的。
- ②欠实际时钟仿真 即仿真时钟比实际时钟慢。
- ③超实际时钟仿真 即仿真时钟比实际时钟快。

(3) 根据系统模型分类

- ①连续系统仿真;
- ②离散事件系统仿真。

1.3.2 系统仿真的步骤

要对一实际系统做仿真实验,首先必须建立数学模型,即系统建模或系统辨识;然后需建立仿真模型,并予以编程调试,得出计算结果。

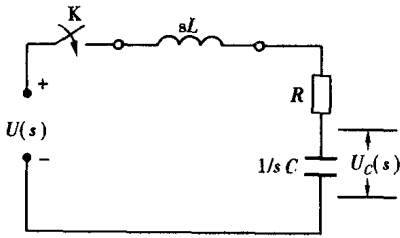


图 1.1 RLC 振荡电路

(1) 问题的描述

仿真首先要对将要仿真的对象进行认真分析,了解对象的特性,尤其要弄清楚研究的问题是什么,对问题进行描述,以便建立对象的模型。

例 1.1 RLC 振荡电路(图 1.1)。在这里所要研究的问题是:系统在零状态条件下,开关 K 在  $t=0$  时刻闭合之后,在电源  $U$  的作用下输出的响应曲线,并研究  $R$ 、 $L$ 、 $C$

的参数变化对响应曲线的影响。

(2) 建立系统的数学模型

建立模型是十分重要的一步。通常通过对问题的分析,得到所要仿真对象的物理模型(例 1.1 RLC 的电路图为对象的物理模型),接着对物理模型进行分析和数学推导(很多情况下,需要对模型进行理想化或进行近似处理),得到系统的数学模型。一般地,数学模型是由一组微分方程来描述的。例如,对例 1.1 的电路进行分析,可列出电路的微分方程:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + U_c(t) = U(t) \tag{1.1}$$

$i(t)$  满足方程:

$$i(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt} \tag{1.2}$$

将式(1.2)代入式(1.1)得:

$$LC \frac{d^2U_c(t)}{dt^2} + RC \frac{dU_c(t)}{dt} + U_c(t) = U(t) \tag{1.3}$$

式(1.3)即为该电路的数学模型。通常在电路分析和对控制系统的描述中,采用拉普拉斯变换将微分方程变换为代数方程,或将微分方程变换为状态方程。也可对例 1.1 的电路直接采用符号法求出输出像函数与输入像函数之比(传递函数):

$$U_c(s) = \frac{U(s) \cdot (1/sC)}{sL + R + (1/sC)} = \frac{U(s)}{LCs^2 + RCs + 1}$$

即

$$\frac{U_c(s)}{U(s)} = \frac{1/LC}{s^2 + (R/L)s + 1/LC} \tag{1.4}$$

### (3) 建立仿真模型

如果仿真手段采用计算机仿真,系统的数学模型必须改写成适合于计算机处理的形式,称为仿真数学模型。系统数学模型是系统的一次近似模型,仿真数学模型则是系统的二次近似模型。在二次建模中,计算机算法是个核心问题,计算机算法将系统数学模型用数字的方法求出问题的解。对于例 1.1 的问题,从计算机算法的角度来看,实质上是要求得到解微分方程的算法,才能得到问题的解;另一方面,也希望得到  $U_c(t)$  的时间响应曲线。计算机仿真数学模型的建立是一个非常复杂的问题,在后面章节中将做一些介绍。

在 MATLAB 中,许多计算机算法已经用  $M$  函数的形式存储在相应的工具箱中,使得问题变得简单,也就是说, MATLAB 的使用者利用  $M$  函数而不需要过多地考虑算法问题,但要注意怎样用 MATLAB 来描述问题。对于例 1.1 的问题,由式(1.4),其分子和分母都是多项式,利用 MATLAB 语言,其表达为:

$$\text{num} = [0, 0, 1/LC]; \text{den} = [1, R/L, 1/LC]$$

或  $\text{sys} = \text{tf}(\text{num}, \text{den})$

num, den 和 sys 代表了 MATLAB 对例 1.1 问题的数学表达。

### (4) 编程

要使所研究的问题得以在计算机上得到实验结果,需将仿真的模型加以计算机语言化,即编写程序。

### (5) 调试程序

调试程序的任务是检查程序的错误,并予以改正,使程序能够顺利地在计算机上通过,并让程序处于正确的运行状态。

### (6) 确认模型

对于所研究的问题的数学模型是否正确地代表了所要研究的系统,即是否真实地反映了实际系统运行过程的特性,这就要用仿真运行所获得的数据和曲线与真实运行的情况相比较对照,以确认模型。

### (7) 实验设计

仿真实验设计的任务是:要根据研究目的合理地安排仿真实验,以较少的实验次数获得较多的关键性数据,得到正确的结论。对于例 1.1,当  $R=0$  时,系统等幅振荡;并根据  $\omega_n^2 = LC$ ,  $2\zeta\omega_n = R/L$ , 取  $\zeta < 1$ ,  $\zeta = 1$ ,  $\zeta > 1$  的参数(即取实验点)。显然,选取的点数有无数个,盲目地选择是不合适的,故可以有选择地选取参数来确定实验如何进行。对该例可选取  $\zeta = 0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1, 1.5, 2, \dots$ ;  $\omega_n = 0.01, 0.1, 1, 10, 100$  等来实验。

### (8) 实验的实施及结果分析

根据以上的实验方案,即可在计算机上进行仿真实验,然后根据程序的运行结果,可以得到系统响应在各种条件下的终值、超调量、上升时间、调节时间的参数以及响应曲线,对此进行分析,得到系统的运行特征。

综上所述可知,仿真具有很强的实验性,是通过仿真实验来研究系统的综合实验技术,具有一般实验的性质,不论是系统分析还是设计,都可以通过一系列的仿真实验来完成。

通过仿真实验来设计和分析系统的过程如图 1.2 所示。

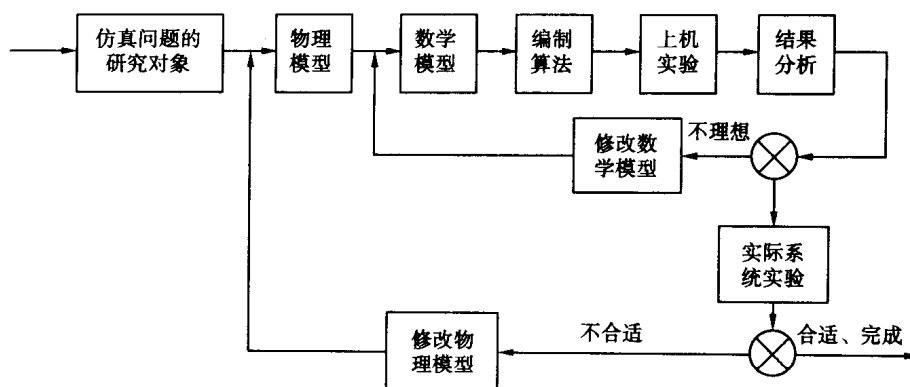


图 1.2 通过仿真实验设计和分析系统的过程

## 1.4 系统仿真的应用

根据应用的目的可划分成如下几种：

### (1) 系统分析

仿真应用于系统分析,了解一个现存系统的性能,提出对系统的改进意见。

### (2) 系统设计

仿真应用于系统设计,可以预测待设计或准备改进的系统之性能,检验是否可达到设计要求,这个设计方案是否可以被接受,是否能够付诸实施。如果不合乎需要,则继续通过仿真实验探索改进的方法或进行重新设计。

### (3) 理论验证

仿真应用于理论验证,可检验一些新提出的理论或假设的正确性,揭示这些理论和假设与实际不符或矛盾之处。

### (4) 环境的仿真

利用计算机三维动画、声、光、电,以及人的视觉、触觉等,模拟自然环境或太空中的环境,使操作者具有临场感。

### (5) 人员训练

可以利用训练仿真器培训操作人员或管理人员,例如,宇航员的仿真培训、汽车驾驶员的仿真培训、大型发电厂的操作与工程技术员培训仿真装置等。这些训练仿真器是采用计算机技术、自动化技术、光学仿生技术、传感器技术、仪表技术等组成一套专门用于训练人员的仿真系统。

## 1.5 控制系统的计算机仿真

控制系统的计算机仿真技术的发展目前已达到相当高的水平,并一直受到控制界的普遍重视。1982年12月和1984年2月,控制系统领域在国际上最具权威的IEEE控制系统学会

(Control Systems Society, 简称 CSS)的控制系统杂志(Control System Magazine)和 IEEE 系统的科研报告第一次分别出版了关于 CACSD 的专刊。美国的著名学者 Jamshich 与 Herget 分别于 1985 年和 1992 年出版了两本著作来展示 CACSD(Computer-Aided Control System Design)领域的最新进展。在国际自动控制联合会(简称自控联)世界大会(IFAC World Congress)、美国控制会议(American Control Conference, 简称 ACC)及 IEEE 的控制与决策会议(Conference on Control and Decision 简称为 CDC)等各种国际控制界的重要学术会议上都有有关 CACSD 的专题会议及各种研讨会,可见该领域的发展是异常迅速的。

国际上控制系计算机辅助设计软件的发展大致分为三个阶段:软件包阶段、交互式语言、当前的面向对象的运行环境阶段。

早期的软件包通常是用 FORTRAN 语言编写, FORTRAN 语言绘图并不是轻而易举的事情,这就需要用相应的软件包来做进一步处理。

1980 年美国的 Cleve Moler 博士研制的 MATLAB 环境(或语言)对后来的控制系统的理论及计算机辅助设计技术起到了巨大的推动作用,该语言最初目的是为线性代数等课程提供一种方便可行的实验,该软件出现以后一直在美国的 New Mexico 等大学作为教学辅助工具使用。MATLAB 于 1984 年推出了正式版本。

由于 MATLAB 的使用极其容易,且提供了丰富的矩阵处理功能,因此控制理论领域的研究人员很快注意到了这样的特点,并在它的基础上开发了控制理论与 CAD 专门的应用程序集(又称为工具箱)。使之很快地在国际控制界流行起来,目前已经成为国际控制界最流行的语言,并且出现了数以万计的各种实用工具箱。MATLAB 当前的功能可以说是将可靠的数值运算(特别是不局限于矩阵运算)、图像与图形显示及处理、高水平的图形界面设计风格集于一身。此外,还提供了与其他高级程序设计语言(对 MATLAB 语言来说是低级语言)如 FORTRAN, C++ 等接口,使其功能更加强大,成为控制系统研究人员所必不可少的有力工具。

## 1.6 教材的基本结构以及本课程与其他课程的关系

本门课程与自动化专业其他控制类课程密切相关,例如,《自动控制原理》、《现代控制理论》、《计算机控制技术》、《运动控制系统》、《过程控制》、《智能控制技术》、《模糊控制》等本科专业课程,本教材是这些课程仿真、辅助分析和设计必不可少的理论研究的仿真与实验工具,也是学生进行毕业设计的计算机辅助分析和设计的参考书。同时本门课程也具有自身的理论基础和实践的特点,本教材在阐述计算机辅助分析和设计基本理论的基础上,尤其注意与其他控制类课程的密切联系。在计算机仿真实验部分也应注意与其他课程实验装置的结合,实验可分为控制类课程理论验证实验和控制系统设计实验。这样在教材结构的安排上,采用不同于现已出版的同类型教材,将其内容分为以下 6 部分:

- ①计算机系统仿真基本理论。
- ②基本上按自动化本科控制类课程讲授的先后顺序,先连续系统,后离散系统;先传递函数后状态方程,分门别类地撰写。系统的分析与校正作为重点内容。
- ③实验(注意与控制实验箱、实验装置的实验相结合)。
- ④控制类课程相关内容与计算机辅助分析和设计的例子。

⑤MATLAB 语言及编程等。

⑥控制系统分析与设计 CSCAD(V1.2)教学示范软件包。

对于将本课程部分内容与《自动控制原理》课程同时开出的情况,可以首先讲授附录 I: MATLAB 和第 1 章、第 2 章、第 7 章和第 8 章,其他章节的内容结合其他控制类课程予以讲授和做实验。对于将控制类课程作为本门课程的前修课程,且这些前修课程在应用 MATLAB 开出仿真实验的情况,授课课时和实验课时可以酌情减少,重点放在控制系统的分析与校正,放在控制系统的辅助设计实验上,使学生系统地掌握控制系统仿真与辅助设计知识。

由于在 MATLAB 的帮助文件和程序中,采样周期用“ $T_s$ ”表示,而在控制类教材和文献中,采样周期一般用“ $T$ ”表示,所以,在本书中,“ $T_s$ ”和“ $T$ ”都表示采样周期。

本书中的所有程序在 MATLAB6.1 版本中都通过调试,大部分程序在 MATLAB5.3 版本中通过调试。

### 习 题

- 1.1 试举 1~2 个你所知道和见到的计算机辅助分析和设计应用的例子。
- 1.2 试述系统、模型及仿真三者之间的关系。
- 1.3 对系统进行计算机仿真研究时,为什么要进行实验设计?
- 1.4 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系,是如何将计算机仿真分类的?
- 1.5 试通过上网查阅科技网站,简述控制系统计算机辅助分析和设计理论最新的进展和应用状况。
- 1.6 试通过上网查阅网站 [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com),以及国内有关 MATLAB 应用方面的网站,论述 MATLAB 的应用领域,尤其是控制系统计算机辅助分析和设计领域的应用方面, MATLAB 的最新版本,它的新特点和新的工具箱。
- 1.7 简述 MATLAB5.3 和 MATLAB6.1 版本在控制类工具箱功能方面的异同之处。



# 第 2 章

## 控制系统数学模型与 MATLAB 控制类工具箱

为了研究控制系统的动态特性,除了对其物理性质有一个正确认识外,还必须抽象出它的数学模型,然后将数学模型用 MATLAB 表达出来,用编程或控制方框图的方法仿真。MATLAB 中有各种控制类工具箱,使用者也可针对具体系统设计自己的工具箱。

### 2.1 控制系统的数学模型的描述

#### 2.1.1 连续控制系统

连续控制系统常用的数学模型有 5 种:

##### (1) 微分方程

设控制系统的微分方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ & = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t) \quad (m \leq n) \end{aligned} \quad (2.1)$$

式中: $u(t)$ 为系统输入(驱动函数); $y(t)$ 为系统输出(响应函数)。

设已知输出变量 $y(t)$ 以及 $y(t)$ 各阶导数的初始值为:

$$y(0) = y_0; \frac{dy(0)}{dt} = y_0^1; \cdots; \frac{d^{n-1} y(0)}{dt^{n-1}} = y_0^{n-1} \quad (2.2)$$

由于自动控制过程本来就是与时间联系在一起的,因此,微分方程及其时域解是最基本的描述方式。但由于用古典方法来解微分方程较为复杂,譬如,对二阶系统已研究得很清楚了,但对高阶系统(4 阶以上)一般没有封闭解或解析解,故一般采用拉普拉斯变换法求解。在 MATLAB 语言中,通常都是用传递函数或状态方程等方式来表示系统的数学模型。

##### (2) 传递函数

对式(2.1),若其初始条件:

$$y(0) = \frac{dy(0)}{dt} = \frac{d^2 y(0)}{dt^2} = \cdots = \frac{d^{n-1} y(0)}{dt^{n-1}} = 0 \quad (2.3)$$