

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Modeling, Simulation and Design of
Mechatronics Control System

机电控制系统建模 仿真与设计

赵江波 王军政 汪首坤 ◎ 编著



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

机电控制系统建模 仿真与设计

赵江波 王军政 汪首坤 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

机电控制系统建模仿真与设计 / 赵江波, 王军政,
汪首坤编著. -- 北京: 北京理工大学出版社, 2022. 1
ISBN 978-7-5763-0803-7

I. ①机… II. ①赵… ②王… ③汪… III. ①机电一
体化-控制系统-系统建模 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 010527 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 19.5

彩 插 / 4

字 数 / 499 千字

版 次 / 2022 年 1 月第 1 版 2022 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 76.00 元

责任编辑 / 徐 宁

文案编辑 / 国 珊

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

机器人、机械臂、工程机械、工业过程、生产线等自动化装置与系统的分析、设计越来越离不开仿真手段。通过仿真，在控制系统实物构建之前就可以得到其控制效果和运行性能，从而为系统的优化设计提供依据和手段。因此，控制系统的建模与仿真技术也日益受到重视。

对控制系统进行建模仿真的手段，大致可以分成两大类：一是传统的分析方法，即借助理论分析或实验数据，建立被控对象的数学模型，然后在数学模型的基础上，利用计算机软件进行控制系统的性能分析；二是借助各种专业的商用仿真建模软件进行系统的分析，而且这种方式越来越受到工程技术人员的青睐，因为成熟的商业软件会将该行业领域内常用到的理论分析与计算方法进行集成，提供良好的人机交互界面，非常方便应用，使得技术开发人员可以将主要精力放在如何解决问题上，而不是如何搭建仿真系统或进行仿真计算上。但是借助专业仿真建模软件，使用者并不清楚整个仿真系统的运作机理，对仿真系统的底层缺乏了解。所以学习掌握前一种仿真分析手段还是非常有必要的，尤其是对于学生或科研人员，更是如此。本书正是基于上述目的而编写。

本书共分为七章，从控制系统仿真的基本概念、仿真工具软件的使用，到控制系统建模的基础知识、控制系统的仿真分析、控制器的辅助设计，进行了由浅入深、通俗易懂的讲述。特别是书中结合仿真工具软件对相关理论知识进行了实现描述，给出了相应的代码，做到了理论讲述与实践应用相结合，让读者学有所得、学有所用。

第1章通过分析控制系统分析的三种基本方法：解析法、实验法和仿真实验法，引出本书要讲述的控制系统仿真方法，进而对系统仿真的基本概念、应用及发展等基础知识进行讲解。

第2章以本书所用到的仿真工具软件 MATLAB 为背景，讲述了系统仿真中用到的相关内容和知识。考虑到 MATLAB 工具软件的通用性，大部分读者都具有一定基础，因此这部分内容的讲述相对简短。

第3章对 Simulink 工具的使用进行了讲解，尤其是对通过编写 S-函数实现特定算法或完成特定硬件的驱动进行了重点描述，并进一步讲解了利用 Simulink 构建半实物实时仿真系统的实现过程。

第4章从连续系统与离散系统两个方面讲述了控制系统模型的几种不

同的描述形式、各种描述形式在 MATLAB 仿真软件中的表述方式，即系统仿真中的二次模型化，以及不同表述方式间的相互转换。

第 5 章以机电控制系统为背景，讲述了其机理建模和统计建模的基本思路和方法，即系统仿真中的一次模型化。其中，在机理建模方面，以常见的传动机构（如减速机、丝杠）、执行机构（如电机、液压缸）为代表讲述了其建模的基本过程，并针对复杂机电系统，结合实际工程应用，介绍了如何进行运动学和动力学建模。在统计建模方面，主要就建模用激励信号的设计、阶跃响应数据建模、频率响应数据建模、最小二乘法建模等内容进行了讲述。

第 6 章主要是基于所建立的控制系统模型，结合仿真工具软件，讲述了对控制系统稳定性、稳态性能、动态性能、可控性和可观性等性能指标的定量或定性分析方法，所涉及的控制系统分析方法主要包括时域分析、根轨迹分析、频域分析、状态空间分析。

第 7 章以控制器的辅助设计为主要内容展开。首先讲述了控制系统数字仿真的实现，以四阶龙格-库塔算法为核心讲解了如何编写程序求解一阶常微分方程，使读者了解掌握控制系统仿真的实现机理。然后以最基本的 PID 控制方法为基础，结合实例及具体代码讲解了控制器设计的基本过程、3 个控制参数的整定方法。并进一步讲述了自抗扰控制器、基于状态空间模型的控制器设计方法与过程。

本书可供高等院校自动化、机械电子类专业的学生学习使用，也可供机电工程领域的工程技术人员、科研人员作为参考书使用。

由于作者水平有限，书中难免有不当或疏漏之处，恳请读者批评指正。

作者

2021 年 12 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 概述	001
1.1 控制系统研究分析方法	001
1.1.1 解析法	001
1.1.2 实验法	001
1.1.3 仿真实验法	003
1.2 系统仿真的基本知识	004
1.2.1 系统与模型	004
1.2.2 系统仿真的分类	006
1.2.3 系统仿真的原则	007
1.2.4 控制系统数字仿真的主要内容与过程	009
1.3 仿真技术的应用与发展	010
1.3.1 系统仿真技术的应用实例	010
1.3.2 系统仿真的作用和意义	010
1.3.3 仿真技术的发展趋势	011
1.4 控制系统仿真软件	012
1.4.1 MATLAB 与 Simulink	012
1.4.2 MATLAB 与其他软件的联合仿真	013
1.4.3 半实物仿真系统	015
1.5 本章小结	016
习题	016
第 2 章 MATLAB 语言基础	018
2.1 MATLAB 的基本操作	018
2.1.1 MATLAB 的工作空间	019
2.1.2 MATLAB 的命令窗口	019

2.1.3	MATLAB 的工作目录	020
2.1.4	MATLAB 的帮助	020
2.2	MATLAB 的数值计算	023
2.2.1	变量与常量	023
2.2.2	数据结构	025
2.2.3	基本计算功能	029
2.3	矩阵操作与运算	031
2.3.1	矩阵的生成	031
2.3.2	矩阵的基本操作	033
2.3.3	矩阵运算	035
2.3.4	矩阵函数	036
2.4	多项式运算	038
2.5	符号运算	040
2.6	其他运算	043
2.6.1	关系运算	043
2.6.2	逻辑运算	043
2.7	MATLAB 语言程序设计	044
2.7.1	M 文件编辑器	044
2.7.2	程序结构流程	046
2.7.3	M 文件编程	049
2.8	MATLAB 的图形绘制	051
2.8.1	二维图形绘制	051
2.8.2	三维图形绘制	063
2.8.3	图形的输出	064
2.9	本章小结	065
	习题	065
第 3 章 Simulink 基础与应用		067
3.1	Simulink 基本操作	067
3.1.1	Simulink 介绍	067
3.1.2	Simulink 启动与基本操作	068
3.1.3	Simulink 的帮助与学习系统	068
3.1.4	Simulink 的工作原理	072
3.2	Simulink 模型的建立	073
3.2.1	Simulink 模块库	073
3.2.2	模型的搭建	078
3.3	Simulink 仿真	082
3.3.1	仿真设置	082
3.3.2	仿真运行	087

3.4 子系统与模块封装	094
3.4.1 模型子系统	094
3.4.2 子系统封装	095
3.5 S-函数的设计与应用	098
3.5.1 S-函数简介	098
3.5.2 S-函数的工作原理	099
3.5.3 S-函数的编写	101
3.5.4 S-函数的应用	111
3.6 Simulink 中硬件板卡的使用	117
3.6.1 Data Acquisition Toolbox 工具箱	117
3.6.2 应用示例	118
3.7 实时仿真系统的搭建	120
3.7.1 桌面实时系统 Simulink Desktop Real-Time	121
3.7.2 高实时性的实时仿真系统 Simulink Real-Time	124
3.8 本章小结	128
习题	128
第4章 控制系统的数学描述	130
4.1 连续系统的数学描述	130
4.1.1 微分方程描述	130
4.1.2 传递函数描述	131
4.1.3 零极点增益描述	134
4.1.4 部分分式描述	135
4.1.5 状态空间描述	135
4.2 离散系统的数学描述	137
4.2.1 差分方程描述	137
4.2.2 z 传函描述	138
4.2.3 离散状态方程描述	139
4.3 系统模型转换及连接	140
4.3.1 描述模型的转换	140
4.3.2 传递函数描述模型的简化与连接	146
4.4 本章小结	151
习题	151
第5章 机电控制系统的建模	152
5.1 机械结构	152
5.1.1 减速机	152
5.1.2 丝杠	156
5.1.3 联轴器	158

5.1.4	机械传动中的非线性	158
5.2	电动执行机构	161
5.2.1	直流伺服电机	161
5.2.2	步进电机	164
5.2.3	高压交流永磁式伺服电机	168
5.3	液动执行机构	170
5.3.1	电液伺服阀	170
5.3.2	液压缸及液压马达	172
5.4	复杂运动系统的机理建模	174
5.4.1	基本概念	174
5.4.2	运动学分析	175
5.4.3	动力学分析	181
5.5	机电控制系统的统计建模	187
5.5.1	激励信号的设计	187
5.5.2	阶跃响应建模法	191
5.5.3	频率响应建模法	193
5.5.4	最小二乘建模法	196
5.6	本章小结	199
	习题	200
第 6 章	控制系统分析	202
6.1	时域分析	202
6.1.1	时域分析基础	202
6.1.2	时域下的主要性能指标	203
6.1.3	线性系统的时域分析	203
6.1.4	阶跃响应性能指标的求取	212
6.1.5	稳定性分析	215
6.1.6	LTI Viewer 在时域分析中的应用	217
6.2	根轨迹分析	220
6.2.1	根轨迹基础	220
6.2.2	MATLAB 相关的根轨迹分析工具	221
6.2.3	根轨迹分析工具	223
6.3	频域分析	225
6.3.1	频域分析的基本概念	225
6.3.2	频域下的特性分析	226
6.3.3	MATLAB 相关的频域分析工具	228
6.4	状态空间分析	232
6.4.1	状态空间的基本概念	232
6.4.2	可控可观性分析	234

6.4.3 线性系统稳定性分析	236
6.4.4 李雅普诺夫稳定性分析	237
6.5 本章小结	241
习题	241
第7章 控制器设计与仿真	243
7.1 控制系统数字仿真的实现	243
7.1.1 常微分方程数值求解的基本概念	243
7.1.2 常微分方程数值解的基本方法	244
7.1.3 龙格-库塔法求解常微分方程	245
7.1.4 数值积分算法的基本分析	247
7.1.5 面向简单结构图的数字仿真	252
7.2 PID 控制器的设计	255
7.2.1 连续 PID 控制器设计与仿真	256
7.2.2 离散 PID 控制器设计与仿真	257
7.2.3 PID 控制器积分与微分的处理	261
7.2.4 常规的 PID 控制器参数整定	264
7.2.5 最优性能指标整定方法	268
7.2.6 迭代反馈整定	272
7.2.7 极值搜索算法控制器参数整定	277
7.3 自抗扰控制器的设计	282
7.3.1 自抗扰控制器的结构	282
7.3.2 自抗扰控制器的实现	286
7.3.3 ADRC 的 S-函数	288
7.4 基于状态空间模型的控制器设计	292
7.4.1 状态反馈	292
7.4.2 极点配置	292
7.4.3 状态观测器	295
7.4.4 线性二次型指标最优控制器设计	297
7.5 本章小结	299
习题	299
参考文献	301

第 1 章

概 述

1.1 控制系统研究分析方法

在控制系统的理论分析与工程实践中，往往需要对系统本身进行必要的分析、综合与设计。目前普遍采用的方法有解析法、实验法和仿真实验法三种，其中仿真实验法是本书的重点讲述内容。

1.1.1 解析法

解析法又称分析法，它是应用解析式去求解数学模型的方法，也就是运用已知的基础理论知识对控制系统进行理论上的分析、计算。这是一种纯理论意义上的分析方法，也是研究问题的普遍手段。

例如：工程机械中最常用到的执行机构之一——液压缸，在分析其控制特性时，可用图 1-1 描述其受力情况。根据牛顿经典力学知识，可得到液压缸工作时的动态过程描述方程为

$$F(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} + B_c \frac{dx}{dt} + kx \quad (1-1)$$

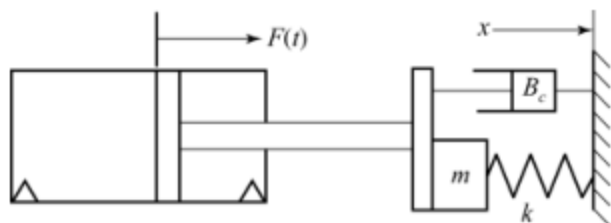


图 1-1 液压缸受力分析图

对液压缸的受力分析转变成为对式 (1-1) 所示的二阶常微分方程的分析。同理，汽车轮子悬挂系统的受力问题、二级水箱的液位问题、RLC 电路问题，也可以抽象为式 (1-1) 所示的二阶常微分方程。可见，通过理论分析可以提炼不同问题的共性，更容易总结规律，得到新的理论。

但是，解析法也有其自身的缺点，如：受分析工具的限制，对于复杂大系统具有一定的局限性；分析过程容易受理论的不完善性及对事物认知的不全面性影响；在许多工程实际问题中，难以综合全面地考虑所有因素，分析结果往往存在偏差。

1.1.2 实验法

实验法是指对于已经存在的实际物理系统，利用各种检测传感器、信号处理装置、测试

仪器等，对系统施加一定类型的激励信号，通过测量系统对特定信号的响应来确定系统的性能的方法。该方法具有简明、直观、可靠性高等优点，在一般的系统分析和测试中经常使用。

例如：如图 1-2 所示，为了研究飞行器舵机的控制特性，通常采用实验法对舵机控制系统进行测试建模。施加给舵机控制系统的激励信号包括正弦扫频信号、阶跃信号，从而得到舵机控制系统开环或闭环 Bode 图及阶跃响应特性。

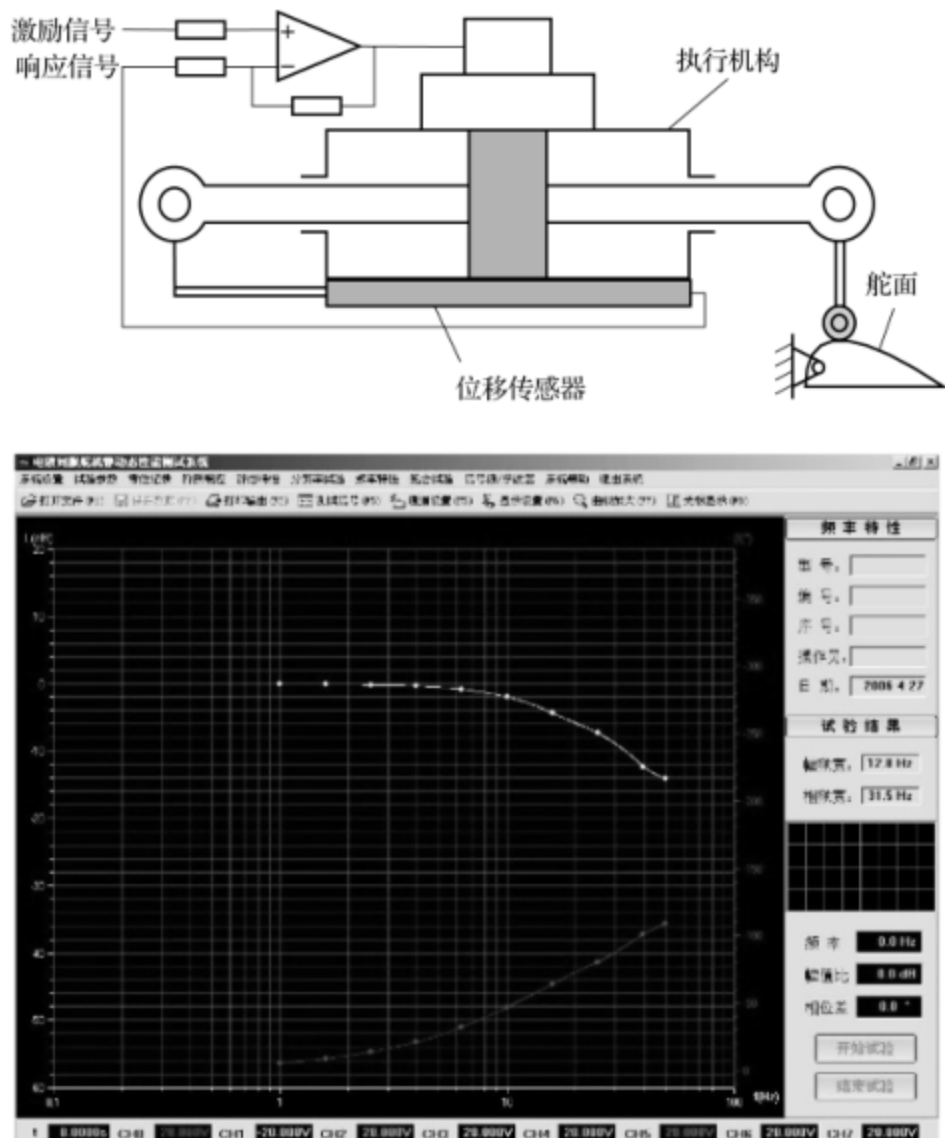


图 1-2 舵机控制系统实验测试原理图

受各种条件所限，实验法同样存在一定的缺点，如：

(1) 有些实际的物理系统不允许进行实验研究，如炼钢生产线的控制系统、化工过程控制系统，随意改变系统的运行参数或者输入信号，会导致产品报废，造成巨大的经济损失，甚至导致安全事故。

(2) 对于某些控制问题的研究，往往难以搭建实际的物理系统，或者在分析、设计控制系统之前，还未建立实际系统。

(3) 有些实验研究的代价太大，难以承受，如火炮的稳定器控制系统，需要到不同的地形下进行实际跑车实验，需要很高的实验费用。再比如原子能系统的实验还存在很高的危险性。

1.1.3 仿真实验法

仿真实验法是指在物理的或数学的模型上所进行的系统性能分析与研究的实验方法。随着计算机技术以及软件实现技术的不断发展,研究人员越来越倾向于采用数字模型在计算机上进行仿真研究。

采用数字仿真实验的最大优点是,只需要建立起被研究对象的精确模型,就可以通过数值求解微分方程的方法得到对象的各种特性,不依赖于实际的物理系统,经济性好,便于调整控制系统的各种设计参数和条件。

例如对于图 1-3 所示的液压阀控制液压缸系统,采用仿真实验法时,可以建立如式 (1-2) 所示的精确数学模型,并利用 MATLAB 仿真软件,设计控制算法,对式 (1-2) 描述的微分方程组进行数值求解,实现对控制系统的设计。图 1-4 所示为采用迭代反馈控制时,利用 MATLAB 仿真,得到的系统阶跃响应及正弦跟踪响应曲线。

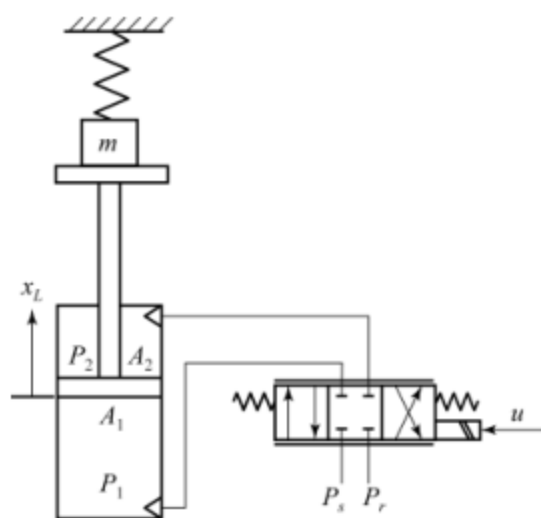


图 1-3 液压阀控制液压缸系统

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m}(A_1 x_3 - A_2 x_4) - \frac{1}{m}kx_1 + \delta_m - g \\ \dot{x}_3 &= f_1 \beta_e [-A_1 x_2 + g_1(x_3 - x_4, \text{sgn}(x_2))] \\ \dot{x}_4 &= f_2 \beta_e [A_2 x_2 + g_2(x_3 - x_4, \text{sgn}(x_2))] \end{aligned} \quad (1-2)$$

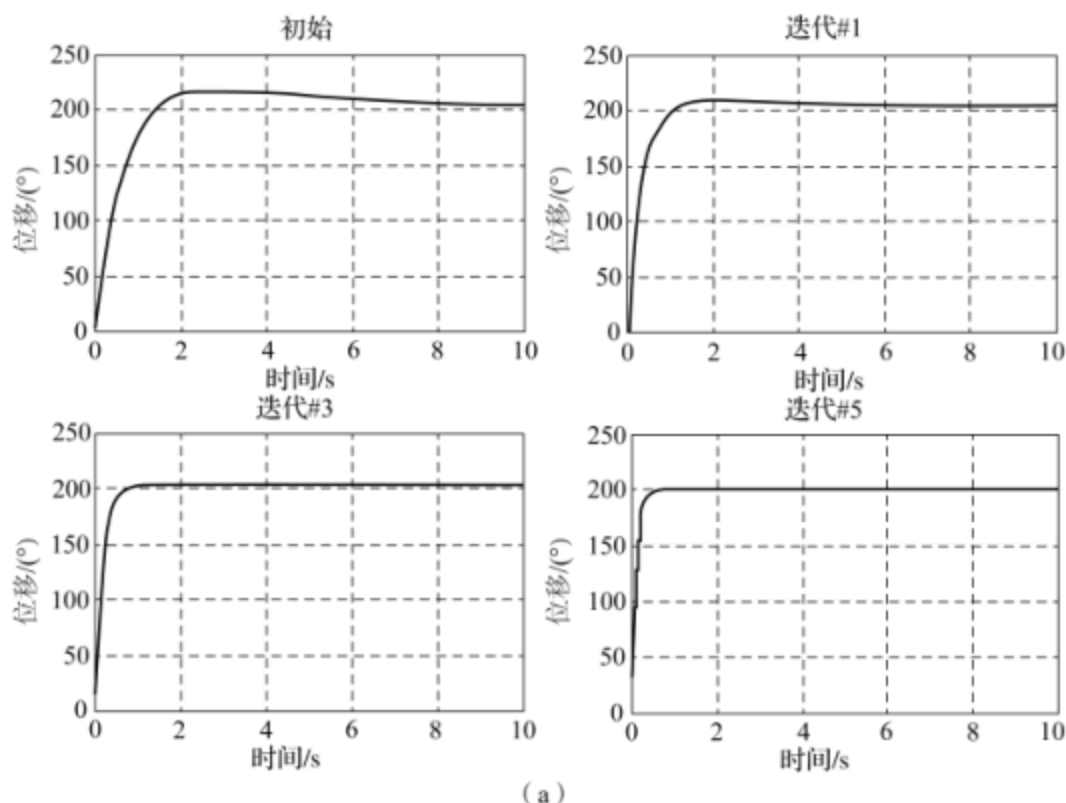


图 1-4 利用 MATLAB 软件进行的仿真实验结果 (书后附彩插)

(a) 不同迭代次数下的阶跃响应曲线

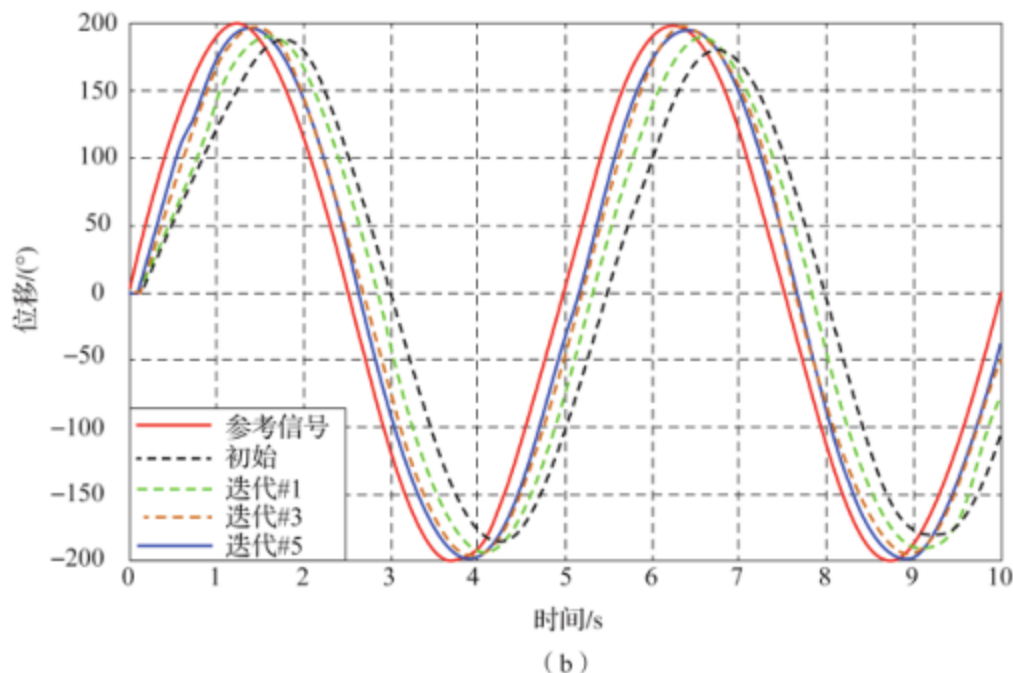


图 1-4 利用 MATLAB 软件进行的仿真实验结果 (续) (书后附彩插)

(b) 不同迭代次数下的正弦跟踪响应

仿真实验法最大的缺点就是, 仿真结果容易受到建模精度影响, 尤其是对于复杂系统, 往往很难完善而又精确地采用数学工具描述其动态过程, 因此仿真结果和理论分析往往会存在一定的偏差。

1.2 系统仿真的基本知识

1.2.1 系统与模型

1. 系统

系统是仿真实验的基本对象, 是物质世界中相互制约又相互联系的、以期实现某种目的的一个运动整体。如果系统用于自动控制, 则称之为自动控制系统。

1) 系统的分类

系统以“时间”为依据, 可以分为四类。

(1) 连续系统。连续系统是指系统中的状态变量随时间连续变化的系统, 如电机速度控制系统、液压缸活塞杆位置控制系统等。

(2) 离散时间系统。离散时间系统是指系统中状态变量的变化仅发生在一组离散时刻上的系统, 如计算机构成的采样控制器等。

(3) 离散事件系统。离散事件系统是指系统中状态变量的改变是由离散时刻上所发生的事件所驱动的系统, 如大型仓储系统中的库存问题, 其库存量是受入库、出库事件所驱动变化的。再比如控制系统中的事件驱动控制问题。

(4) 混合系统。混合系统是指系统中一部分是连续系统, 另一部分是离散系统, 其间有连接环节将两者联系起来的系统, 如采用数字控制器实现的电机转速控制系统, 其中的控

制器部分为离散时间系统，电机部分为连续系统。随着数字技术的不断发展，现在大部分的物理控制系统都可以划归为混合系统。

2) 系统的组成

系统包含三个要素，分别为实体、属性和活动。

(1) 实体。实体是指存在于系统中的具有明确意义的物体，如图1-2、图1-3中的液压缸、飞行器舵机等。

(2) 属性。属性是指实体所具有的任何有效特征，如液压缸的活塞杆运动位移、运动速度，飞行器舵机的偏转角度等。

(3) 活动。活动可分为内部活动和外部活动。系统内部发生的任何变化过程称为内部活动；而系统外部发生的对系统产生影响的任何变化过程称为外部活动。比如图1-3中，液压缸活塞腔内的压力变化就是内部活动，而液压油源供给液压阀的压力变化就称为外部活动，在控制系统设计中，这种外部活动被称作外部扰动。

3) 系统的特性

通常系统具有三种特性，即整体性、相关性和隶属性。

(1) 整体性。系统中的各部分不能随意分割。比如任何一个闭环控制系统的组成中，对象、传感器及控制器缺一不可。因此，系统的整体性是一个重要特性，直接影响系统的功能与作用。

(2) 相关性。系统中的各个部分以一定的规律和方式相联系，由此决定了系统特有的性能。比如液压阀控制液压缸系统，其中液压阀、液压缸、位移传感器、控制器等组成了一个完整的系统，并形成了液压缸能够调节位移的特性。

(3) 隶属性。有些系统并不像控制系统那样可以清楚地分出系统的内部与外部，它们常常需要根据所研究的具体问题来确定哪些是属于系统的内部因素，哪些属于系统的外界因素，其界限也常常随着不同的研究目的而变化，这一特性称为隶属性。分清系统的隶属界限是十分重要的，它往往可以使系统仿真问题得以简化，以有效地提高仿真效率。例如在研究图1-3所示的液压阀控制液压缸系统时，如果目的是考察液压缸位置控制精度，那么整个系统的液压能源供给压力变化就属于外部因素。相反，如果目的是考察液压能源供给压力与液压缸输出力之间的关系，那么液压能源供给压力变化就属于内部因素。

2. 模型

系统动态过程采用与之相应的数学模型进行表征。模型是对系统的特征与变化规律的一种定量抽象，是人们用以认识事物的一种手段。

1) 模型的分类

(1) 物理模型。物理模型是指根据相似性原理，把真实的系统按比例放大或缩小制成的模型，其状态变量与原系统完全相同。例如在研究飞行器舵机控制时，为了模拟飞行器在空中飞行时受到的空气动力负载，在实验室中建立负载模拟装置。

物理模型总是有实物介入的，具有实时性和在线性的特点，在物理模型上所做的仿真研究具有效果逼真、精度高的优点。但是，要研制物理模型需要耗费一定的资金与周期，具有一定的局限性。

(2) 数学模型。数学模型是指用数学方程或信号图、结构图来描述系统性能的模式。它又可分为静态模型和动态模型，静态模型仅能描述系统处于平衡状态下的特性，动态模型

则可以描述系统随时间变化的瞬态特性。数学模型的仿真是在计算机上完成的，是建立在性能相似的基本原则上的，具有非实时性和离线性的特点。相比物理模型，其具有经济、快捷的优点。本书将以数学模型为对象，讲述控制系统仿真的相关知识。

(3) 混合模型。将系统的数学模型、物理模型甚至是系统本身部分实物有机结合在一起的模型称为混合模型或半实物模型。混合模型仿真兼顾纯实物模型仿真和纯数学模型仿真的优点，既考虑到经济性和周期性，又兼顾仿真结果的可信性，实物在环的半实物仿真研究手段越来越受到研究人员的重视。

2) 模型的建立

建立系统模型就是以一定的理论为依据，把系统的行为概括为数学的函数关系，具体包括以下内容。

- (1) 确定模型的结构，建立系统的约束条件，确定系统的实体、属性与活动。
- (2) 测取有关的模型数据。
- (3) 运用适当的理论建立系统的数学描述，即数学模型。
- (4) 检验所建立的数学模型的准确性。

由于控制系统的数字仿真是以其数学模型为前提的，所以对于仿真结果的可靠性而言，系统的建模至关重要，它在很大程度上决定了数字仿真实验的成败。

1.2.2 系统仿真的分类

根据关注的重点不同，系统仿真也可以分为几种不同的方式，具体包括以下几种分类方式。

1. 按模型分类

- (1) 物理仿真。仿真实验所采用的模型是物理模型，称为物理仿真。
- (2) 数字仿真。仿真实验所采用的模型是数学模型，称为数字仿真。
- (3) 硬件在回路仿真。仿真模型中包含数学模型、物理模型和系统的实际部件，称为硬件在回路仿真。
- (4) 人在回路仿真。人作为系统仿真的组成部分参与到仿真实验中，称为人在回路仿真。其重点是解决人的感觉生成技术，如视觉、听觉、动感、力感等仿真环境，又称为虚拟仿真。

2. 按计算机分类

1) 模拟计算机仿真

模拟计算机使用一系列运算放大器和无源阻容器件组成放大器、积分器、微分器、加减法器，并相互连接成仿真电路，实现特定的算法功能。由于各种运算器并行操作，其运算速度快、实时性好、结果可信。它对连续物理系统的动态过程仿真比较自然逼真。其缺点是对于复杂模型的仿真，电路搭建复杂烦琐，改变模型的工作量大，而且难以实现离散系统的仿真。

图 1-5 所搭建的模拟计算机排版图，即可实现式 (1-1) 所描述的液压缸运动过程的动态特性仿真。

2) 数字计算机仿真

将系统模型用计算机程序来描述，并在数字计算机上借助数值算法所进行的仿真称为数

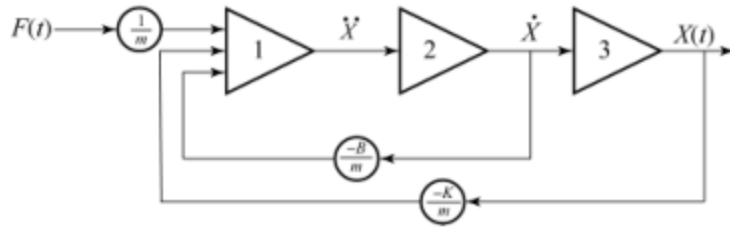


图 1-5 模拟计算机排版图

字计算机仿真。数字计算机仿真具有简便、快捷、经济的特点，同时还包括如下的优缺点。

(1) 计算与仿真的精度较高。由于计算机的字长可以根据精度要求来设计，因此从理论上讲，数字仿真的精度可以是无限的。但是，受到误差累积、仿真时间限制等因素的影响，仿真精度不宜要求过高。

(2) 对离散系统的仿真比较方便。数字计算机仿真由于可以灵活地设置仿真补偿，因此对于离散系统的仿真分析具有天然的优势。

(3) 仿真实验的自动化程度较高。数字计算机仿真基本都是通过编程来完成仿真过程，因此可以很方便地根据实际需求编辑程序功能，而且能够通过程序的设计，自动完成实验过程。

(4) 计算速度会影响仿真的可信度。在对一些高频响的控制系统进行仿真时，受计算机运行速度的影响，所计算出的仿真结果与实际物理系统会有一定的差异，从而影响仿真结果的可信度。

3) 分布式数字仿真

对于算法复杂的大型数字仿真问题，单台计算机完成仿真任务往往会受到仿真速度与精度这一对矛盾的影响。尽管数字计算机的运行速度一直在不断地提升，但是仿真任务的复杂程度和精度要求也越来越高。大型计算机虽然具有卓越的计算性能，但是其昂贵的价格限制了其普及应用。

分布式数字仿真技术的发展则可以很好地解决这一问题。分布式数字仿真将整个仿真任务分割成若干子任务，分别运行于不同的计算机上，并通过网络交换信息，协调仿真任务的完成。分布式数字仿真具有近似的多 CPU（中央处理器）并行计算的性能，仿真速度和精度均能得到保证。

3. 按系统随时间的变化状态分类

(1) 连续系统仿真。连续系统仿真是指系统的输入输出信号均为时间的连续函数，可用一组数学表达式来描述，如采用微分方程、状态方程等。

(2) 离散系统仿真。离散系统仿真是指系统的状态变化只在离散时刻发生，可用一组数学表达式来描述，如采用差分方程、离散状态空间模型等。

1.2.3 系统仿真的原则

系统仿真所遵循的基本原则是相似性原则，如几何相似、时间相似、速度相似、环境相似、性能相似等。

性能相似也称数学相似，是指不同的问题可以用相同的数学模型来描述，这是数字仿真中所遵循的最基本的原则。