



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)规划教材

CAD Control Systems
(MATLAB Programming Language)

控制系统 CAD

——基于 MATLAB 语言

第 2 版

© 张晋格 陈丽兰 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电气工程与自动化（应用型）规划教材

控制系统 CAD

——基于 MATLAB 语言

第 2 版

主 编 张晋格 陈丽兰
参 编 赵 丽 李晓秀 马立勇
主 审 梁景凯 管 萍



机械工业出版社

本书以 MATLAB 为工具,系统地阐述了控制系统 CAD 的有关概念,概括了控制系统分析与设计中的主要内容。全书共分 7 章,第 1~2 章从应用角度介绍了 MATLAB 语言的基础知识和控制系统工具箱函数以及仿真工具 Simulink 的使用方法;第 3~6 章按照控制理论体系,依次讲述了如何利用 MATLAB 和 Simulink 进行控制系统的模型建立、特性分析、时域响应分析和复频域分析等;第 7 章介绍了控制系统的频域设计法和状态空间设计法、系统仿真以及结果分析等。

图书在版编目 (CIP) 数据

控制系统 CAD: 基于 MATLAB 语言/张晋格, 陈丽兰主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2010. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育电气工程与自动化(应用型)规划教材

ISBN 978-7-111-30988-8

I. ①控… II. ①张…②陈… III. ①控制系统—计算机辅助设计—软件包, MATLAB—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 150358 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王保家 责任编辑: 王雅新 裴 昱

责任校对: 陈延翔 封面设计: 张 静

责任印制: 乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2010 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15.75 印张·388 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-30988-8

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者服务部: (010)68993821

第2版前言

本书自2004年6月初版发行以来，已被多所院校选作教材使用，印刷多次，取得了良好的教学效果。为了适应新世纪高素质科技人才培养的需要，根据近几年教学实践的体会，结合广大学生和有关教师的反馈意见，对原书的知识体系、软件平台版本、例题与习题等方面作了认真地分析和研究，决定在保持原书特点的基础上，对本书进一步修改与充实，主要修订情况如下：

1. 由于MATLAB的软件升级，以MATLAB R2007a为平台，修订了全书的相关内容与应用平台。
2. 对本书涉及到自动控制理论方面的基本理论和知识作了进一步的充实与说明。
3. 对原书第5章和第2章重复的内容作了删减，各章后面增加了习题。
4. 对全书的内容、格式、例题的形式和章节的编号等作了统一编排，错误地方做了更正。
5. 为了便于课堂多媒体教学，第2版增加了电子课件及光盘，供任课教师选用。

本书的修订是在原书作者张晋格、陈丽兰、李晓秀等同志集体讨论的基础上，由陈丽兰主要执笔，由张晋格最后定稿的，马立勇同志也参加了部分修订工作，为各章后面提供了部分习题。梁景凯、管萍教授任主审，提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。虽然各位编写老师做了许多细致的工作，但错误与不妥仍在所难免，恳请读者批评指正，以便今后做进一步的修订与完善。

编 者

第 1 版前言

计算机辅助设计 (Computer Aided Design) 技术, 简称 CAD 技术, 是随着计算机技术的发展而产生的一门应用型技术, 已在工程设计的各个领域得到广泛的应用, 如机械设计中的 AutoCAD, 电子线路设计中的 Protel 等。在控制领域, 由于科学技术的迅速发展, 控制系统的性能要求越来越高, 控制算法越来越复杂, 控制器的设计也变得更加困难, 单纯靠手工或简单的计算工具已经很难达到预期效果。因此控制系统 CAD 应运而生, 并在近年来得到迅速发展, 目前已经达到相当高的水平, 成为控制系统分析、设计与仿真不可缺少的工具, 并为控制理论的发展和实际应用开辟了广阔的前景。其中, MATLAB 语言由于其强大的矩阵运算能力和良好的图形可视化功能, 已成为控制界应用最广的首选计算机辅助工具。与 1992 年推出的基于模型图形化组态软件 Simulink 的集成, 使控制系统 CAD 技术进入一个崭新的发展阶段, 成为当今最具影响力的控制系统 CAD 软件。目前, 国际上许多高等院校教材和科技书籍都将 MATLAB 语言用于控制系统建模、分析计算、设计与仿真研究, 并取得了良好效果。我国也将其作为一门综合性、实践性较强的课程列入本科教学目录中, 其目的是为了让学生在深入学习反馈控制理论的基础上, 掌握一种能方便地对系统进行分析与设计的工具, 以便使控制系统的研究者从繁杂的计算中解脱出来, 把精力集中到解决专业问题上, 从而大大提高工作效率和设计质量。

本书以 MATLAB 语言为主要工具, 系统地介绍了控制系统分析与设计的基本原理和设计方法。第 2 章是在第 1 章的基础上, 首先从应用角度介绍了 MATLAB 语言的基础知识和控制系统主要的工具箱函数及其用法, 然后介绍了仿真工具 Simulink 的用户界面和用法; 第 3~6 章, 按照控制理论体系, 依次讲述了如何应用计算机辅助工具 MATLAB 和 Simulink 进行控制系统的模型建立, 特性分析, 时域响应分析以及复频域分析等; 第 7 章主要讲述控制系统的频域设计方法和状态空间设计法、系统仿真方法以及结果分析等。

本书在论述中力求突出以下特点:

1. 内容少而精。尽管本课程涉及多个学科, 但本科高年级学生已具备相当基础, 因此本书在概括地总结控制理论体系的基础上, 重点阐述如何利用 MATLAB 工具解决实际工程问题和计算机实践问题, 以适应有限学时的教学要求。
2. 注重上机实践。本书加强了上机实践的指导说明和例题、练习题的指导力度。学生通过编程和上机练习, 可进一步理解控制系统的基本理论和计算机辅助工具的用法及作用。
3. 加强综合运用能力的培养, 建立系统的概念。本书在论述中通过实例使学生了解从系统建模到设计、仿真的全过程。

本书前言、第 1 章、第 7 章及附录由张晋格编写; 第 2.1 节由李晓秀编写, 第 2 章的其余部分、第 3 章、第 6 章由陈丽兰编写; 第 4 章、第 5 章由赵丽编写; 张晋格任主编, 负责全书统稿, 陈丽兰任副主编。张晓华教授任本书主审。在本书的编写过程中, 还得到王新生博士及哈工大(威海)自动化教研室的大力支持, 在此一并表示衷心的感谢。

由于水平所限, 书中错误与不当之处在所难免, 恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

第 1 章 概述	1
1.1 控制系统 CAD 的发展概况	1
1.2 系统、模型与仿真	2
1.2.1 系统	2
1.2.2 模型	3
1.2.3 仿真	3
1.3 控制理论与控制系统 CAD	4
习题 1	5
第 2 章 MATLAB 与 Simulink 简介	6
2.1 MATLAB 的基础知识	6
2.1.1 MATLAB 语言系统	6
2.1.2 MATLAB 的运算	11
2.1.3 MATLAB 的绘图	19
2.1.4 MATLAB 循环与转移控制	23
2.2 MATLAB 的控制系统工具箱函数	26
2.2.1 模型建立函数	26
2.2.2 模型转换及参数获取函数	31
2.2.3 模型特性函数	35
2.2.4 时域响应函数	38
2.2.5 频域响应函数	40
2.2.6 根轨迹函数	47
2.2.7 估计器/调节器设计函数	50
2.3 仿真工具 Simulink 简介	53
2.3.1 Simulink 界面	53
2.3.2 控制系统动态结构图模型建立	59
2.3.3 利用 Simulink 进行数字仿真	64
习题 2	77
第 3 章 控制系统的数学模型	79
3.1 系统建模的方法	79
3.1.1 解析法建立数学模型	79
3.1.2 实验法建立数学模型	79
3.2 数学模型的几种形式及模型间的 转换	80
3.2.1 数学模型的形式	80
3.2.2 模型之间的转换	81

3.3 复杂模型的处理方法	86
3.3.1 Simulink 建模方法	86
3.3.2 非线性系统的线性化	86
习题 3	89
第 4 章 控制系统的特性分析	91
4.1 稳定性分析	91
4.1.1 直接求根判定系统稳定性	91
4.1.2 绘制系统零点、极点图判定 稳定性	93
4.1.3 Lyapunov 稳定性判据	94
4.2 能控能观性分析	95
4.2.1 能控能观性判定	95
4.2.2 能控性和能观性的对偶关系	98
4.2.3 系统的结构分解	98
4.2.4 状态空间表达式的能控标准型 和能观标准型	101
4.2.5 能控性和能观性与传递函数 之间的关系	105
习题 4	106
第 5 章 控制系统的时域分析	107
5.1 控制系统时域响应解的表达	107
5.1.1 线性系统的数学模型	107
5.1.2 线性定常系统时域响应解	108
5.1.3 非线性系统时域响应	111
5.2 阶跃响应分析	111
5.2.1 暂态响应性能指标	112
5.2.2 稳态响应性能指标	112
5.2.3 基于 MATLAB 的时域特性 分析	113
5.3 脉冲响应分析	117
5.3.1 基于 MATLAB 的脉冲 响应分析	117
5.3.2 MATLAB 中的图形工具 LTI Viewer	120
5.4 二阶系统分析	123
5.4.1 二阶系统的单位阶跃响应	123
5.4.2 二阶系统的单位脉冲响应	126

5.5 迟后系统的时域响应分析	128	6.5.2 控制系统的闭环频域响应	167
5.5.1 迟后系统的近似时域分析	128	6.5.3 基于 MATLAB 的闭环系统性能 分析	169
5.5.2 利用 Simulink 对迟后系统进行 时域分析	131	习题 6	173
习题 5	131	第 7 章 控制系统设计方法	175
第 6 章 复频域分析	133	7.1 串联校正	175
6.1 根轨迹分析	133	7.1.1 相位超前校正	175
6.1.1 根轨迹的定义	133	7.1.2 相位滞后校正	179
6.1.2 连续系统的根轨迹	134	7.1.3 相位超前滞后校正	183
6.1.3 离散系统和时间延迟系统的根 轨迹	137	7.2 反馈校正	186
6.1.4 控制系统的性能分析	139	7.3 PID 控制器设计	189
6.2 频域分析与奈氏图	142	7.3.1 PID 控制器的控制特性	189
6.2.1 频率特性的概念及表示方法	142	7.3.2 PID 控制器的参数整定	194
6.2.2 连续系统的奈氏图	143	7.3.3 PID 控制器参数的智能整定 (参数优化方法)	200
6.2.3 离散系统的奈氏图	146	7.4 状态反馈与极点配置	200
6.2.4 基于 MATLAB 的奈氏图分析	148	7.4.1 状态反馈	200
6.3 Bode 图分析	152	7.4.2 极点配置控制器设计	201
6.3.1 连续系统的 Bode 图	152	7.5 状态观测器与基于观测器的极点 配置	206
6.3.2 基于 MATLAB 的动态性能 分析	155	7.5.1 全阶状态观测器	206
6.3.3 复杂系统的 Bode 图	157	7.5.2 最小阶状态观测器	208
6.3.4 离散系统的 Bode 图	158	7.6 线性二次型最优控制	212
6.3.5 最小相位系统与非最小相位 系统	158	7.6.1 线性二次型最优控制策略	212
6.4 Nichols 图分析	159	7.6.2 线性二次型调节器问题	214
6.4.1 基于 MATLAB Nichols 图的 分析	159	习题 7	218
6.4.2 基于 MATLAB Nichols 图的 设计	163	附录	220
6.5 闭环频域响应特性	167	附录 A MATLAB 常用命令函数参考	220
6.5.1 闭环频域响应的性能指标	167	附录 B MATLAB 工具箱函数参考	229
		参考文献	245

第 1 章 概 述

本章主要介绍自动控制系统的计算机辅助分析和设计的发展过程；系统、建模和仿真三者关系；目前自动控制系统分析和设计非常有用的工具—MATLAB 软件系统。

1.1 控制系统 CAD 的发展概况

控制系统 CAD 作为 CAD 技术在自动控制系统分析与设计方面应用的分支，至今已有 40 多年的发展历史。在其发展进程中，各类应用软件频繁出现，种类繁多。其中有的是用 FORTRAN 语言或其他语言编写的软件包，有的是人机交互式的软件系统，还有各种专用的仿真语言等，近年来在控制领域广为流传的就多达几十种。纵观国际上控制系统 CAD 软件的发展历程，大体上经历了软件包阶段、交互式语言阶段和目前面向对象的程序环境阶段。

20 世纪 50 ~ 60 年代，在控制系统的分析与设计中，频域法得到迅速发展，当时控制工程师主要是通过手工计算和一些图表的帮助来进行控制系统的初步设计。为了求出复杂系统在时域中的解，曾广泛采用模拟计算机仿真的办法作为系统设计的辅助工具。由运算放大器组成的模拟计算机具有编程简单、形象直观、并行运算等特点，在控制系统 CAD 的发展史上曾起过重要的作用。但随着数字计算机的迅速发展，模拟计算机无论在精度、柔性及价格上都无法与数字计算机相比拟，于是逐渐被替代。

20 世纪 70 年代以后，陆续出现了控制系统计算机辅助设计的各种软件包。美国学者 Melsa 和 Jones 在 1973 年出版了一本有关控制系统计算机辅助分析与设计的专著，其中包括根轨迹法、频率响应、时域响应以及各种设计中常用的子程序，如 Kalman 滤波、Luenberger 观测器等。瑞典学者 K. J. Astrom 主持开发了交互式控制系统 CAD 软件 INTRAC 和仿真程序 SIMNON。该软件在结构上采用命令式的人机交互界面，其仿真过程要求用户根据它所提供的语句编写一个描述系统的程序后，才能进行仿真。日本学者古田胜九主持开发的 DPACS - F 软件，在多变量系统的分析与设计上颇具特色。此外，还有基于特征值的软件包 EISPACK 和线性代数软件包 LINPACK 等。这些软件大多数都是使用 FORTRAN 语言编写的源程序，对于绘图是很困难的，另外还存在编程困难、调用过程繁琐、执行程序过多、不利于数据传输等缺点。

20 世纪 80 年代以后，在众多软件包和仿真程序的基础上，美国 Mathwork 公司推出了 Cleve Moler 等人开发的交互式 MATLAB 软件系统。该软件提供了丰富的矩阵处理功能，使用简单，很快受到控制界研究者的普遍重视，并陆续开发了与之配套的各种工具箱，如在控制领域广为流行的控制系统工具箱（Control System Toolbox）、系统辨识工具箱（System Identification Toolbox）、多变量频域设计工具箱（Multivariable Frequency Design Toolbox）、最优化工具箱（Optimization Toolbox）、鲁棒控制工具箱（Robust Control Toolbox）、信号处理工具箱（Signal Processing Toolbox）以及仿真环境 Simulink 等。应当指出，图形交互式模型输入计算机仿真环境 Simulink 的出现为 MATLAB 的进一步推广、应用起到了积极的推动作用。

参加这些工具箱开发的设计者中不乏国际控制界的名流和相应领域的著名专家，这无疑也提高了 MATLAB 的声誉和可信度，使其迅速风靡国际控制界，成为最流行的一种语言。

从功能上 MATLAB 语言除了传统的交互式编程方式以外，还提供了丰富的矩阵运算、数据处理、图形绘制、图像处理以及 Windows 编程等便利工具。MATLAB 还提供了与其他高级语言（对 MATLAB 来说是低级语言），如 C 语言、FORTRAN 语言等的接口，使其功能日益强大，成为控制工程研究人员不可缺少的有力工具。

1.2 系统、模型与仿真

在控制系统 CAD 技术中，仿真技术一直是被研究的热点问题，由于 Simulink 是面向对象的模型化组态软件，因此，它与 MATLAB 的集成好似如虎添翼，并将控制系统 CAD 的水平推向一个新的阶段。首先，我们引入与系统仿真技术有关的几个概念。

1.2.1 系统

在给“系统”一词下定义之前，大家一定接触过许多系统，如调速系统、随动系统、企业管理系统、经济系统等。这些系统的物理规律、描述形式、处理方法以及规模各不相同，下面给出的定义虽然比较抽象，但是对于概括多种不同类型的系统或许有所帮助，同时便于进一步引出系统仿真的概念。

所谓系统是相互联系又相互作用着的对象的组合。根据系统的物理特征，通常可以将其分成两大类：

- 1) 工程系统：如电气、机械、化工、热工等。
- 2) 非工程系统：如经济、管理、生态、社会等。

尽管上述两类系统的物理本质截然不同，但它们有共同的特征。

(1) 实体 系统都是由相互联系的实体组合而成的。例如，轧钢机可以看成一个系统，它是由主传动、轧辊、辊道等几个实体有机组合而成的。若再细分一下，它的主传动又可以看成一个系统（子系统），它是由晶闸管调速装置、直流电动机、测速发电机、指令控制器等实体组成一个有机的整体。

(2) 属性 组成系统的实体所具有的任何有效特征，称之为具有一定的属性。如调速系统中电动机转动的速度，加热炉系统中的温度偏差，阀门开口度等。

(3) 活动 系统内部发生的变化过程称为内部活动；系统外部发生的对系统产生影响的变化过程称为外部活动（外部扰动）。例如，阀门开口度的变化是温度系统的内部活动；电网电压波动是电力拖动系统的外部活动。

综上所述，任何系统都是由一些实体组合而成的，每个实体都有各自的属性，整个系统有它的主要活动。因此，实体、属性、活动构成了组成系统的三大要素。据此不难看出，任何系统都有整体性、相关性和隶属性。所谓整体性是指系统中各部分不可随意分割，是有机的整体；所谓相关性是指各部分之间按着一定的规律和方式相联系，决定了其特定的功能；所谓隶属性是指系统内、外的划分常常根据所研究的问题和对象而异，如前面提到的轧钢机系统中，主传动就是它的子系统，即内部因素，而对主传动系统而言，轧钢机的其他部分就是外部因素。隶属界限的划分常随研究目的不同而变化，弄清隶属界限往往会使仿真问题得

以简化。

自动控制系统通常指工程系统，分类方法有多种，若以时间为依据，可将系统分为连续系统和离散系统。若系统中各部分信号都是随时间 t 变化的连续函数，则称为连续时间系统；若系统中的信号有一处或几处是以脉冲或数码形式传递的系统，则称为离散时间系统，如采样控制系统、计算机控制系统等。

1.2.2 模型

为了分析与设计控制系统，需要对这些系统进行试验，通常有两种试验方案：一种是在真实系统上进行；一种是按着真实系统的“样子”构造一个模型，称之为系统模型。系统模型是对系统属性和变化规律的一种定量抽象，是人们认识事物的一种方法和手段。人们通常更多地将试验在系统模型上进行，其理由如下：

1) 系统还处于设计阶段，真实系统还没有建立起来，不可能在真实系统上做试验。

2) 试验时间太长，或造价太高，有风险。

3) 试验后无法复原，如有些改造项目，不能先改建，因为一旦改建后就无法回到原来状态，甚至有可能毁掉原有设备。

模型按其性质分为物理模型、数学模型和描述模型三种：

(1) 物理模型 按照真实系统的物理性质构造系统的模型称为物理模型。

(2) 数学模型 根据真实系统中变化量之间的数学关系构造系统的模型称为数学模型。

(3) 描述模型 有些系统很难按着它的物理性质或用数学方法描述，而只能用语言（程序语言或自然语言）来描述。例如，在模糊（Fuzzy）控制系统中，就是用一组基于经验和知识的语句（如 if-then-else）来描述系统。

本书主要采用数学模型的形式来描述系统。

1.2.3 仿真

如前所述，在模型上做试验已成为对系统进行分析研究的有效手段。系统模型建立后，在模型上进行试验的过程称为系统仿真。根据模型的种类不同，系统仿真又可以分成物理仿真、数学仿真、数学-物理仿真三种形式。

物理仿真的优点是形象、直观，但是构造物理模型投资大、周期长、修改结构较难，因此试验往往会受到一定的限制。物理仿真又称为实物仿真。

数学仿真经济、方便、灵活，一般采用数字计算机进行仿真，因此又称为计算机仿真或数字仿真（若采用模拟计算机则称为模拟仿真）。

在有些系统的研究中，将系统一部分建立数学模型，并采用计算机仿真实现；另一部分用物理模型或干脆用实物，然后将它们连接成系统进行试验，这种方式称为数学-物理仿真或半实物仿真。

本书主要采用以数学模型为基础的数字仿真。

综上所述，系统、模型、仿真三者之间的关系十分密切。系统是我们研究的对象，模型是系统特性的一种表述，而且应当可以合理简化。而仿真则包括两个过程：仿真模型的建立和仿真试验。由此看出，数字仿真的全过程实际上包括三个基本要素：实际系统、数学模型和计算机。由三项基本活动联系这三个要素，即根据实际系统的信息或资料建立数学模型

(又称为一次模型化); 再根据数学模型建立仿真模型 (又称为二次模型化); 最后根据仿真模型编制仿真程序, 并进行仿真试验及仿真结果分析。上述仿真过程的基本活动可用图 1-1 来表示。

由图可见, 将实际系统抽象为数学模型称为一次模型化, 这一活动有时涉及系统辨识的技术问题, 即建模问题; 将数学模型转化为计算机可以接受的仿真模型称为二次模型化, 这将涉及仿真技术问题, 其中包括仿真算法的选择及仿真程序的编制和调试等问题; 仿真程序的运行及仿真结果分析统称为仿真试验, 通过仿真试验来检验仿真程序的正确性和可信度。

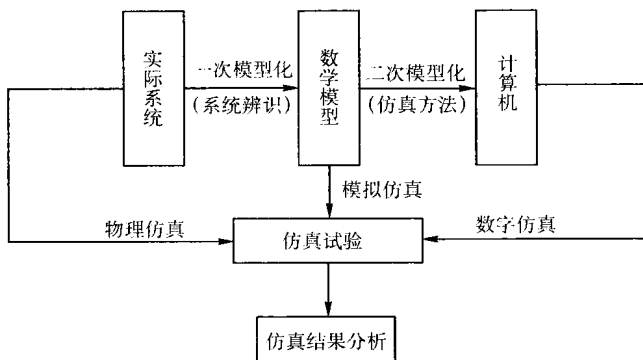


图 1-1 数字仿真过程的基本活动

长期以来, 仿真研究的重点一直集中在仿真模型的建立 (二次模型化) 这一活动上, 即设计一种计算机算法, 以便使系统模型为计算机所接受, 然后再选择适当语言编制成计算机程序并在计算机上运行。于是产生了各种仿真算法和仿真软件。由于对系统模型建立 (一次模型化) 和仿真结果分析研究较少, 因此当一个问题提出之后, 往往需要较长的建模时间。另外, 仿真结果分析也经常要依靠专家, 缺乏直接的指导作用, 从而影响了仿真结果的可信度和真实性, 这在一定程度上阻碍了仿真技术的发展。

近年来, 仿真领域普遍重视了建模和仿真结果分析, 提出了结构化仿真、一体化仿真支撑系统等新概念, 并取得了不少研究成果。

由于仿真技术具有安全、快捷的特点和其他特殊用途, 使其在工程领域的设计、开发、理论研究以及在非工程领域, 如经济、医学、社会学等方面正在发挥着越来越重要的作用。例如, 在空间飞行器控制系统的设计中, 借助于仿真技术可以采用各种最优化原理和方法, 使设计结果达到某种性能“最佳”, 从而实现系统的优化设计。而这种系统结构与参数的优化过程在真实系统上是很难做到的。在非工程领域, 如国民经济预测、宏观调控以及商贸对策等方面, 仿真技术已经成为不可缺少的得力工具。此外, 在人口增长、能源消耗、环境污染等方面, 利用仿真技术可以有效地解决预测与控制问题。

目前, 仿真技术正朝着高速、实时、网络化、智能化的方向发展, 对于科技进步和产业革命有着不可估量的影响和作用。

1.3 控制理论与控制系统 CAD

本书以 MATLAB 的控制系统 CAD 为主要工具, 按照控制理论的内容体系, 将两者相结合, 依次讨论了有关控制系统的模型建立、分析设计与仿真等问题。为此, 第 2 章介绍了控制系统 CAD 的有关基础内容: 包括 MATLAB 的语言基础、控制系统工具箱的主要函数和仿真工具 Simulink 的使用方法等。

自动控制理论主要是研究反馈控制系统的分析与设计问题。为了完成这一任务, 首先必须了解系统的数学模型。对于线性连续单变量系统, 其数学模型的表达形式主要有传递函

数、状态方程、零极点模型、动态结构图等。

传递函数是基于拉普拉斯变换,将常微分方程转换为代数方程的研究方法,也是控制理论建模问题中最重要的基本概念。

状态方程是通过状态变量在时域里描述系统内部结构的一种有效方法。它不仅用于线性系统,也适用于非线性、多变量系统的模型分析。线性代数是建立系统状态方程的数学基础。

零极点模型实际上是传递函数的因式表达形式,这种形式有利于将系统中的某些特性以更显著的方式表达出来。

动态结构图对于研究复杂系统的结构更为直观、方便。

对于同一个控制系统,尽管可以有各种不同的表达形式,但是我们能够通过某种方法进行相互转换。当然,这种转换用人工或简单计算工具做起来是相当麻烦的,对于高阶系统则更加困难,然而利用 MATLAB 却显得轻而易举。关于控制系统的模型建立及模型之间的转换问题将在第 3 章进行介绍。

控制系统的模型建立之后,接下来就是系统的分析与设计问题。控制理论通常提供了两种分析与设计方法:频域法和时域法(又称状态空间法)。

频域法一般属于经典控制理论的研究范畴。它主要是借助于传递函数,通过劳斯判据、奈氏图、博德图、根轨迹等概念和方法来分析系统的各种特性,如稳定性、动态特性、稳态误差等。然而在分析的过程中会遇到各种繁琐的数学推导和复杂绘图处理的问题,如高阶代数方程根的求解、根轨迹、奈氏图、博德图、尼克尔斯图的绘制等。在设计过程中,为了得到校正装置的结构和参数,计算和绘图过程则更为复杂。然而借助于控制系统 CAD 中的工具箱函数,将为设计者提供极大的方便。

时域法是以状态方程为基础,在时域内对系统进行分析与设计,习惯上归为现代控制理论的研究内容。在系统特性分析方面,包括李亚普诺夫稳定性分析、能控能观性分析等;设计方面有极点配置与观测器设计、二次型最优控制器设计等内容。按时域法分析与设计系统涉及到大量矩阵运算及矩阵方程的求解,通常求解过程十分复杂,有时靠人工计算是很难完成的。正因如此,现代控制理论在其发展过程中,曾有一段时间理论应用与实践遇到很大困难。然而,当计算机技术迅速发展之后,借助于控制系统 CAD 不仅可以顺利地完成任务,而且也现代控制理论的应用和实践开辟了广阔的前景,使原来人们认为难以实现的设计方法成为可能。与此同时,又促进了控制理论的进一步发展。

应当指出,Simulink 的出现,对于仿真技术的发展起到了极大的推动作用。

综上所述,控制系统 CAD 与控制理论之间的关系并不是简单地使用计算机代替人工计算和绘图,而是通过设计者与 CAD 之间的交互作用,从本质上增强设计人员的想象力和创造力,有效地提高了设计人员的能力和 design 水平。

习 题 1

- 1-1 何谓控制系统 CAD?
- 1-2 何谓仿真?何谓数字仿真?
- 1-3 为什么要对控制系统进行仿真?主要目的是什么?
- 1-4 控制系统仿真主要分为哪几类?
- 1-5 简述控制系统数学仿真的过程。

第2章 MATLAB 与 Simulink 简介

本章主要介绍 MATLAB R2007a 的基础知识；控制系统的工具箱函数；MATLAB 最重要的组件之一——Simulink 的仿真环境，为后面各章提供知识基础和操作基础。

2.1 MATLAB 的基础知识

2.1.1 MATLAB 语言系统

1. MATLAB 简介

MATLAB (MATrix LABoratory, 矩阵实验室) 是美国 Cleve Moler 教授利用自己研制的基于特征值计算和线性代数软件包开发的一种高级语言。MATLAB 的第一个商业版本 (DOS 版本 1.0) 发行于 1984 年。1990 年推出的 MATLAB3.5i 是第一个可以运行于 Microsoft Windows 的版本, 它可以在两个窗口上分别显示命令行计算结果和图形结果。稍后推出的 Simulink 环境首次引入基于框图的仿真功能, 该环境就是我们现在所知的 Simulink, 其模型输入的方式使得一个复杂的控制系统的数字仿真问题变得十分直观而且相当容易。2000 年 10 月, MATLAB6.0 问世, 较之以前的版本在操作界面有了很大的改观, 同时给出了程序窗口、历史信息窗口和变量管理窗口。

经过多年来版本的不断更新, 新版本 MATLAB 的功能已经十分强大, 其应用领域日益广泛, 速度更快, 数值性能更好; 用户图形界面设计更趋合理; 与 C 语言接口及转换的兼容性更强; 新的虚拟现实工具箱更给仿真结果三维视图下的显示带来了新的解决方案。

MATLAB 具有以下主要特点:

1) 超强的数值运算功能。在 MATLAB 里, 有超过 500 种的数学、统计、科学及工程方面的函数可供使用, 而且使用简单快捷。由于库函数都由本领域的专家编写, 用户不必担心函数的可靠性。

2) 语法限制不严格, 程序设计自由度大。例如, 在 MATLAB 里, 用户无需对矩阵预定义就可使用。

3) 程序的可移植性很好, 基本上不做修改就可以在各种型号的计算机和操作系统上运行。

4) 强大的数据可视化功能。在 FORTRAN 和 C 语言里, 绘图都很不容易, 但在 MATLAB 里, 数据的可视化非常简单。MATLAB 还具有较强的编辑图形界面的能力。

5) 丰富的工具箱。由各学科领域内学术水平很高的专家编写的功能强劲的工具箱, 使用户无需编写自己学科范围内的基础程序, 而直接进行高、精、尖的研究。

2. MATLAB 的工作环境

启动 MATLAB R2007a 后, 显示的窗口如图 2-1 所示。

MATLAB 的工作环境包括菜单栏、工具栏以及指令窗口、工作空间窗口、当前目录窗口、

命令历史窗口、图形文件窗口和 M 文件窗口。

(1) 菜单栏 菜单栏中主要包含 File、Edit、Debug、Desktop、Window 和 Help 六项菜单，用于完成基本的文件输入、编辑、显示、MATLAB 工作环境交互性设置等操作。

(2) 命令窗口 “Command Window” 命令窗口是用户与 MATLAB 交互的主窗口。用户只要单击命令窗右上角的 ↗ 按钮，即可独立打开命令窗口，如图 2-2 所示；而选中命令窗口中 Desktop 菜单的 “Dock command Window” 子菜单又可以让命令窗口返回桌面（MATLAB 桌面的其他窗口也具有同样的操作功能）。窗口中的符号 “>”，表示 MATLAB 已准备好，正等待用户输入命令。用户可以在 “>” 提示符后面输入命令，实现计算或绘图功能。

在命令窗口中，可使用方向键对已输入的命令行进行编辑，如用 “↑” 键或 “↓” 键回到上一句指令或显示下一句命令。

在命令窗口中，可用 〈Ctrl〉+〈C〉组合键来终止正在运行的程序。

(3) 工作空间窗口 “Workspace” 工作空间指运行 MATLAB 程序或命令所生成的所有变量构成的空间。每打开一次 MATLAB，MATLAB 会自动建立一个工作空间。

工作空间窗口如图 2-3 所示。在工作空间窗口里，用户可以查看和改变工作空间的内容。包括变量的名称、数学结构，该变量的字节

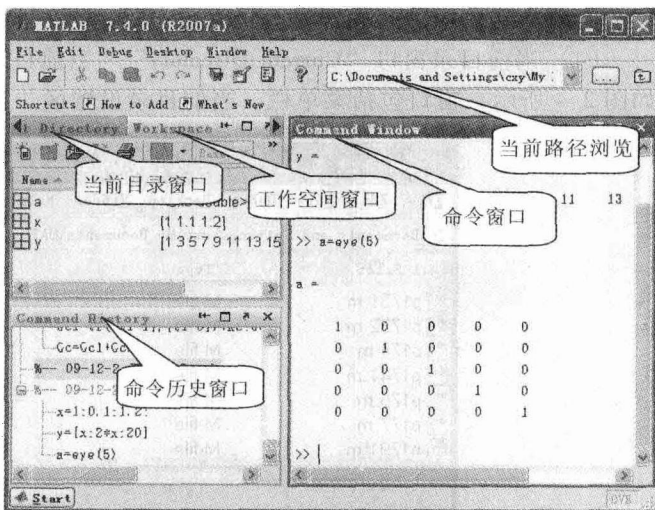


图 2-1 MATLAB 操作界面

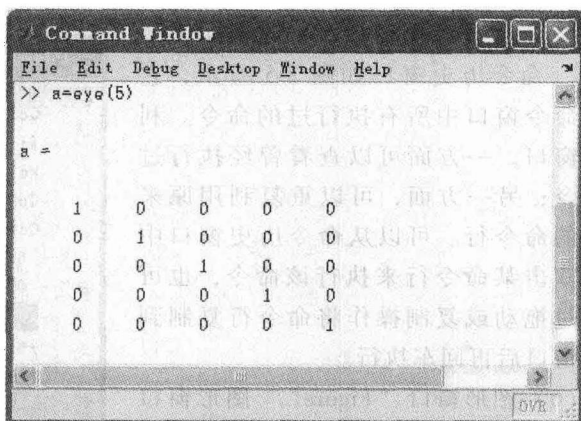


图 2-2 命令窗口

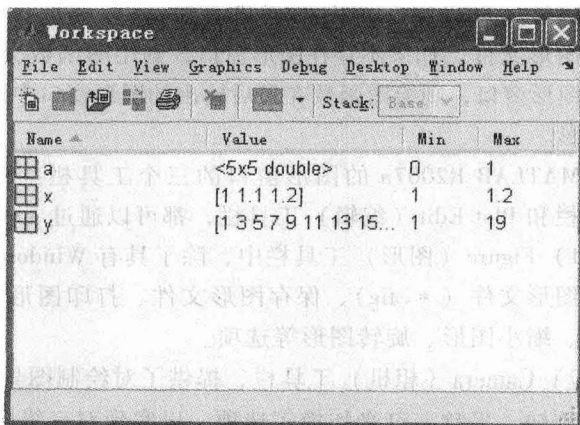


图 2-3 工作空间窗口

数及类型。

(4) 当前目录窗口 “Current Directory” 当前目录窗口显示当前用户工作所在的路径, 如图 2-4 所示, 窗口包括菜单栏、当前目录设置区、工具栏和文件的详细列表。

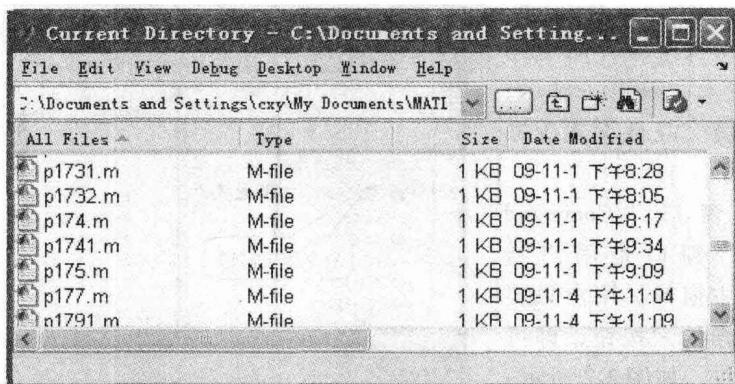


图 2-4 当前目录窗口

(5) 命令历史窗口 “Command History” 命令历史窗口如图 2-5 所示, 它显示命令窗口中所有执行过的命令。利用该窗口, 一方面可以查看曾经执行过的命令; 另一方面, 可以重复利用原来输入的命令。可以从命令历史窗口中直接双击某命令行来执行该命令, 也可以通过拖动或复制操作将命令行复制到命令窗口后再回车执行。

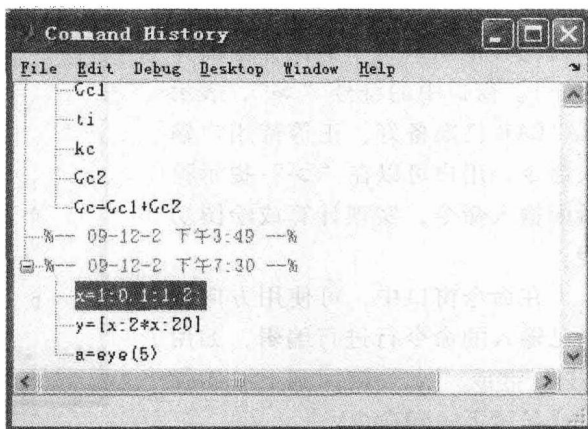


图 2-5 命令历史窗口

(6) 图形窗口 “Figure” 图形窗口如图 2-6 所示。MATLAB 的图形窗口具有操作系统的属性, 也具有 MATLAB 的图形属性, 可以将一个图形窗口看做是一个图形文件。

如果不存在图形窗口, 则绘图函数会自动新建一个图形窗口; 如果已经存在几个图形窗口, 则绘图函数在最后输出的图形窗口中输出图形, 或在最后点击的图形窗口中输出图形。

MATLAB R2007a 的图形窗口的三个工具栏: Figure (图形) 工具栏、Camera (相机) 工具栏和 Plot Edit (编辑) 工具栏, 都可以通过 View 菜单来选择打开或关闭。

1) Figure (图形) 工具栏中, 除了具有 Windows 一般应用程序所具有的新建图形窗口、打开图形文件 (*.fig)、保存图形文件、打印图形选项外, 还有进入编辑图形状态、放大图形、缩小图形、旋转图形等选项。

2) Camera (相机) 工具栏, 提供了对绘制图景进行移动相机位置、移动场景灯光、相机的旋转、平移、灯光切换等选项, 以实现三维图形的视图控制、光照控制等, 获得不同的视图效果。

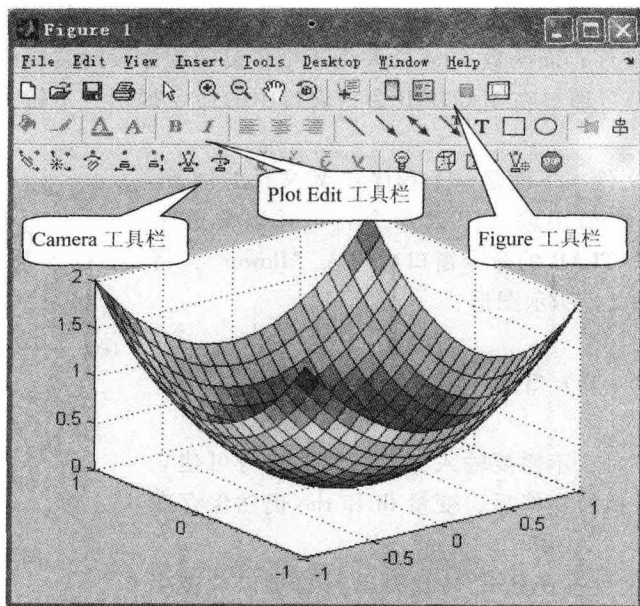


图 2-6 图形窗口

3) Plot Edit (编辑) 工具栏, 可以插入文本、插入箭头、插入线和对文本进行编辑。

(7) M 文件窗口 由 MATLAB 桌面的 File 菜单可以打开或新建一个如图 2-7 所示的 M 文件窗口。利用该窗口菜单栏中的各选项, 可以对 M 文件进行编辑、调试和运行等操作, 详细内容见有关章节。

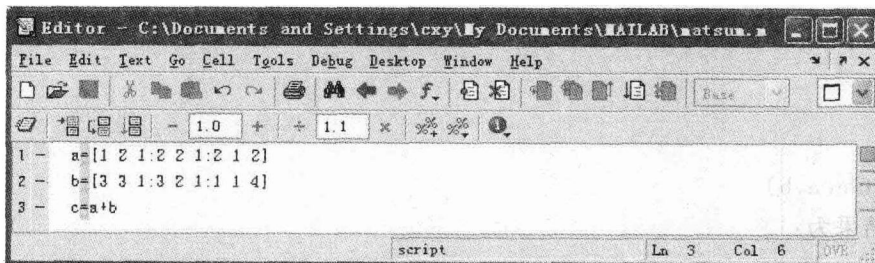


图 2-7 M 文件窗口

3. MATLAB 的 M 文件

所谓 M 文件, 就是用户把要实现的命令写在一个以 .m 为扩展名的文件中。与在命令窗口中输入命令行方式相比, M 文件的优点是可调试、可重复使用。在打开的 M 文件窗口中输入程序, 用 Debug 和 Breakpoints 菜单中的选项, 就可以进行单步运行、分段运行、设置和取消断点等对程序进行调试。事实上, MATLAB 是一个开放的编辑系统, MATLAB 中的许多函数本身就是由 M 文件扩展而成的。对用户来说, 他们也完全可以利用文件来生成和扩充自己的函数库。

M 文件有两种格式, 即函数式 M 文件和程序式 M 文件, 统称为 M 文件。一般来说, 程

序式 M 文件用于把很多需要在命令窗口输入的命令放在一起,就是命令的简单叠加,类似于 DOS 下的批处理文件;而函数式 M 文件用于把重复的程序段封装成函数供用户调用。

这两类 M 文件都可通过在 MATLAB 命令窗口中的命令提示符下键入文件名直接运行来完成相应功能。

(1) 程序式 M 文件 下面是一个程序式 M 文件的例子。在新建立的 M 文件窗口中输入下列命令行,并以文件名 flower.m 保存。在 MATLAB 的命令窗口中键入“flower”,将会执行该文件画出图 2-8 所示图形:

```
th = -pi:0.01:pi;
rho = 5 * cos(3.5 * th).^3;
polar(th,rho)
```

调用该命令文件时,不需要输入参数,文件自身可建立需要的变量。当文件执行完毕后,变量 th 和 rho 仍然保存在工作空间窗口中。

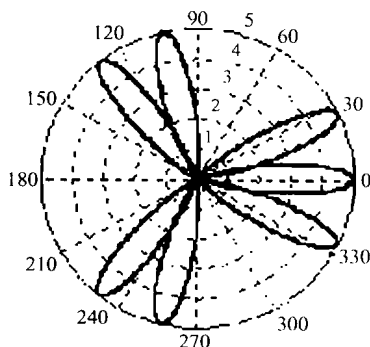


图 2-8 花瓣图案

(2) 函数式 M 文件 函数式 M 文件首行总是以关键字“function”开头,并在首行中列出全部输入、输出参数以及函数名。函数名应置于等号右侧并与对应的 M 文件名相同,输出参数紧跟在“function”之后,常用中括号括起来(若仅有一个输出参数则无需中括号);输入参数紧跟在函数名之后,常用小括号括起来。如果函数有多个输入或输出参数,则多个参数之间用英文状态下的逗号加以分隔。下面是一个只有两行的函数文件的例子:

```
function c = myfile(a,b)
c = sqrt((a.^2) + (b.^2))
```

一旦函数式 M 文件建立,在 MATLAB 的命令窗口或在其他文件中,就可以用下列命令调用:

```
a = 4;
b = 3;
c = myfile(a,b)
执行结果为:
c =
```

5.0000

文件中的第一行为函数定义行

```
function c = myfile (a, b)
```

其中, function 是函数文件的关键字,表明该文为函数文件; c 是输出参数; myfile 为函数名(文件名应与函数名相同,即 myfile.m); a, b 为输入变量。

4. MATLAB 的帮助系统

MATLAB 具有完善的帮助系统,帮助内容丰富,获取帮助的形式多样。MATLAB R2007a 的帮助系统包括命令行帮助、联机帮助和演示帮助等。充分利用帮助系统,可以更快更准确地掌握 MATLAB 的使用方法。

(1) 命令帮助 在命令窗口运行 help 命令可以获得范围不同的帮助信息,查询信息直