

薛定宇 著

反馈控制系统设计与分析

—— MATLAB 语言应用

MATLAB



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

反馈控制系统设计与分析

—MATLAB 语言应用

薛定宇 著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了反馈控制系统分析与设计的理论问题,并介绍了 MATLAB 语言及相应工具箱在控制系统分析与设计中的应用。本书既包括了传统控制理论课程中的核心内容,又适当地引入控制系统理论的新进展,诸如控制系统的鲁棒分析、PID 控制的各种设计方法及线性系统的鲁棒控制等问题,取材合理,形成了一个完整的体系。

本书可作为高校自动化类专业的研究生与高年级本科生反馈控制课程教材,也可作为“自动控制原理”、“线性系统”、“控制系统计算机辅助设计”等课程的教材或参考书,还可供其它专业的学生和科技工作者、教师作为学习自动控制理论的参考材料。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

MATLAB, Simulink, Control Systems Toolbox, Robust Control Toolbox, Symbolic Toolbox 为 The MathWorks 公司的注册商标

书 名: 反馈控制系统设计与分析—MATLAB 语言应用

作 者: 薛定宇

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研楼,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京市昌平环球印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 26 字数: 602 千字

版 次: 2000 年 4 月第 1 版 2000 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-00853-1/TP·306

印 数: 0001~5000

定 价: 36.00 元

前 言

MATLAB[®] 语言的两个最显著特点, 即其强大的矩阵运算能力和完美的图形可视化功能, 使得它成为国际控制界应用最广的首选计算机工具。现在, MATLAB 语言不但广泛应用于控制领域, 也应用于其它的工程和非工程领域。在控制界, 很多知名学者都为其擅长的领域写出工具箱, 而其中很多工具箱已经成为该领域的标准, 如本书深入介绍的控制工具箱[®]。

子曰: “工欲善其事, 必先利其器”。作者认为, 以 MATLAB 语言为主线, 全面介绍反馈控制系统分析与设计的基本理论和计算机实践, 无疑会对学生深入理解反馈控制的基本原理、掌握一个能方便进行控制系统分析和设计的工具大有裨益。因为掌握了这样一门工具后, 可以把控制系统的研究者从繁琐的计算机程序编码中解放出来, 将精力更有效地投放在解决专业技术的问题上, 这当然会使得研究人员的研究效率大大地提高。

作者 1996 年在清华大学出版社出版的《控制系统计算机辅助设计—MATLAB 语言与应用》一书受到了国内外中文读者的普遍欢迎。

本书不是作者早期著作的再版, 而是以更系统的角度全面介绍单变量反馈控制系统分析与设计的理论问题、介绍了 MATLAB 语言及相应工具箱在控制系统分析与设计中应用的教材。本书既包括了传统控制理论课程中的核心内容, 又适当地引入控制系统理论的新进展, 诸如控制系统的鲁棒分析、PID 类控制器的各种设计方法及线性系统的鲁棒控制等问题, 形成了一个完整的体系。

本书 1997 年底初步形成, 并以英文讲义的形式印刷发行, 其中大部分内容曾在东北大学自动化类专业高年级本科生教学中实际使用, 收到了预期的效果, 受到了学生的欢迎。同时, 作者还开发了基于 MATLAB 语言的反馈控制系统计算机辅助分析与设计程序 CtrlLAB[®], 该软件在互联网上公布以来, 引起了世界上很多用户的兴趣, 许多学校将其作为教学软件。

本书可作为高校自动化技术专业及相关专业的研究生与高年级本科生反馈控制课程教材, 也可作为“自动控制原理”、“线性系统”、“控制系统计算机辅助设计”等课程的教材或参考书, 还可供其它专业的学生和科技工作者、教师作为学习自动控制理论的参考材料。

本书由东北大学控制仿真研究中心徐心和教授主审。本书从酝酿到整个写作过程始终得到徐老师的鼓励和支持, 他仔细地阅读了全书原稿, 并提出了许多建设性的宝贵意见。作者的导师、东北大学任兴权教授、英国 Sussex 大学的 Derek P. Atherton 教授也对本书的最终成形提供了很多帮助。

作者的一些同事和朋友也先后给予作者许多建议，并使作者获得了许多有益的信息和材料，这当中包括新加坡 Seagate 公司的陈阳泉博士、加拿大 Northern Telecom 公司的庄敏霞博士、新加坡国立大学的葛树志博士、南非 Pretoria 大学的夏小华教授、新加坡大众钢铁公司的张慧先生、英国谢菲尔德大学的杨永耀博士、吴占元博士、郎自强博士、诸自强博士、香港城市大学的谢力博士、东北大学控制仿真研究中心的郝培锋博士、肖文栋博士等，在英文讲义试用本完成以来还得到许多国内外同行的建议和意见，在此作者表示衷心的感谢。

本书在出版过程中得到清华大学出版社蔡鸿程总编的关怀和帮助，在此深表谢意。

本书的出版还得到了 MATLAB 软件的开发者——美国 The MathWorks 公司图书计划的支持，如果读者想购买 MATLAB 软件及系列产品，请和该公司直接联系：

The MathWorks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Natick, MA, 01760-2098 USA

Tel: 508-647-7000

Fax: 508-647-7101

E-mail: info@mathworks.com

Web: www.mathworks.com

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。

几年来，作者的妻子杨军在生活和事业上给予了作者莫大的帮助与鼓励，作者谨以此书献给她和女儿薛杨。

薛 定 宇

2000年3月7日于东北大学

<http://xuedy.363.net/>

目 录

第 1 章 反馈控制系统引论	1
1.1 反馈控制系统的基本结构	1
1.2 反馈控制理论的发展综述	2
1.3 本书的结构	3
1.4 计算机辅助工具 MATLAB 语言简介	5
1.4.1 MATLAB 语言引论	5
1.4.2 标准 MATLAB 语句与函数	5
1.4.3 MATLAB 语言的图形功能	6
1.4.4 MATLAB 语言的联机帮助功能	7
1.4.5 MATLAB 工具箱介绍	7
习 题	9
第 2 章 反馈控制系统的数学模型	12
2.1 系统建模举例	12
2.2 Laplace 变换与传递函数模型	13
2.3 其它数学模型的表示方法	18
2.3.1 状态方程模型	18
2.3.2 零极点模型	22
2.4 相互连接框图的模型表示	24
2.4.1 串联连接结构	24
2.4.2 并联连接结构	25
2.4.3 反馈连接结构	26
2.4.4 更复杂的连接结构	27
2.5 不同模型对象间的相互转换	31
2.5.1 由 LTI 对象转换为传递函数	32
2.5.2 将 LTI 对象转换成零极点模型	33
2.5.3 系统的状态方程实现	35
2.6 更复杂系统的模型处理方法	44
2.6.1 Simulink 建模方法	44
2.6.2 非线性系统的线性化	47
习 题	51
第 3 章 线性控制系统的性质	55
3.1 线性系统的稳定性分析	55
3.1.1 直接判定方法	55
3.1.2 间接判定方法	57
3.1.3 反馈控制系统的内部稳定性	64

3.2	控制系统的可控性和可观测性分析	67
3.2.1	系统的可控性分析	67
3.2.2	系统的可观测性分析	69
3.2.3	系统的可控性和可观测性 Gram 矩阵	71
3.2.4	系统的可镇定性和可检测性分析	72
3.3	线性系统的 Kalman 分解	75
3.3.1	Kalman 分解	75
3.3.2	最小实现问题的再认识	78
3.4	系统的时间矩量与 Markov 参数	79
3.4.1	关于 $s = 0$ 展开 — 时间矩量	80
3.4.2	关于 $s = \infty$ 展开 — Markov 参数	81
3.5	反馈控制系统的鲁棒性分析	82
3.5.1	信号与系统的范数测度	82
3.5.2	计算 \mathcal{H}_2 范数的方法	83
3.5.3	计算 \mathcal{H}_∞ 范数的方法	85
3.5.4	灵敏度和补灵敏度函数	87
3.5.5	稳定性裕量分析	88
	习 题	91
第 4 章	线性系统的时域分析	93
4.1	系统时域响应的解析解算法	93
4.1.1	部分分式展开方法	94
4.1.2	状态空间解法	99
4.2	二阶系统的演示例子	106
4.2.1	解析解研究	106
4.2.2	不同参数下的系统响应比较	107
4.2.3	脉冲响应分析	109
4.3	线性系统的阶跃响应分析	112
4.3.1	时域响应指标	112
4.3.2	求取阶跃响应的方法	113
4.4	线性系统的脉冲响应分析	122
4.5	任意输入下的时域响应分析	126
4.5.1	利用 MATLAB 进行线性系统分析	126
4.5.2	应用 MATLAB 语言分析非线性系统	129
4.5.3	应用 Simulink 分析系统时域响应	130
4.6	带有延迟的系统时域响应分析	133
4.6.1	时间延迟函数的 Padé 近似	134
4.6.2	闭环系统的近似分析	137
4.7	控制系统工具箱中的系统分析工具 LTIView	139
	习 题	139

第 5 章 线性系统的复域与频域分析	143
5.1 线性系统的根轨迹分析	143
5.1.1 二阶系统的根轨迹分析	144
5.1.2 根轨迹绘制原理	147
5.1.3 绘制根轨迹的 MATLAB 工具	147
5.1.4 主导极点的等 ζ 和等 ω_n 线	156
5.1.5 时间延迟系统的根轨迹	158
5.1.6 基于根轨迹的系统设计工具 RLTool	159
5.2 线性系统的频域分析与 Nyquist 图	160
5.2.1 频域分析入门	160
5.2.2 Nyquist 图的一般描述	163
5.2.3 二阶系统的 Nyquist 图	164
5.2.4 Nyquist 图与稳定性定理	166
5.2.5 常规 Nyquist 图的非线性变换	172
5.3 线性系统的闭环频域响应	174
5.3.1 等 M 圆与等 N 圆	174
5.3.2 频域响应的闭环特性	175
5.4 线性系统的 Bode 图分析	178
5.4.1 线性系统的 Bode 图	178
5.4.2 二阶系统的 Bode 图	178
5.4.3 Bode 图的渐近线	179
5.4.4 由 Bode 图判定系统稳定性	180
5.4.5 应用 MATLAB 绘制 Bode 图	180
5.5 Nichols 曲线	183
5.5.1 等 $M(\omega)$ 线和等 $\alpha(\omega)$ 线	183
5.5.2 Nichols 曲线的系统分析方法	184
5.6 系统频域分析的其它内容	185
5.6.1 幅值裕量与相位裕量	185
5.6.2 非最小相位系统的频域响应	190
5.6.3 时间延迟系统的频域响应	192
5.6.4 灵敏度函数的频域表示	195
习 题	196
第 6 章 控制系统的经典设计技术	199
6.1 串联超前滞后补偿器设计	199
6.1.1 超前滞后校正入门	199
6.1.2 由相位裕量设定的方法进行超前滞后校正	208
6.2 线性二次型最优控制	213
6.2.1 线性二次型最优控制策略	213
6.2.2 线性二次型调节器问题	214

6.2.3	加权矩阵选择	217
6.2.4	观测器与观测器设计	221
6.2.5	状态反馈与基于观测器的调节器与控制器设计	224
6.3	极点配置控制器设计	228
6.3.1	极点配置算法	228
6.3.2	部分极点配置问题	231
6.3.3	应用极点配置技术设计观测器	232
6.3.4	基于观测器的极点配置调节器与控制器	234
6.4	模型跟踪控制	236
6.4.1	不同指标下的标准模型格式	236
6.4.2	模型跟踪控制器设计	238
	习 题	242
第 7 章	PID 控制器设计	245
7.1	PID 控制器简介	245
7.1.1	比例、积分、微分控制作用分析	245
7.1.2	微分动作在反馈回路的 PID 控制	248
7.2	Ziegler-Nichols 整定公式	250
7.2.1	Ziegler-Nichols 整定经验公式	250
7.2.2	微分动作在反馈回路中实现的控制	253
7.2.3	带有时间延迟的一阶系统模型拟合	255
7.2.4	改进的 Ziegler-Nichols 整定公式	260
7.3	其它 PID 控制器的整定方法	262
7.3.1	PID 控制器的 Chien-Hrones-Reswick 整定算法	262
7.3.2	Cohen-Coon 整定公式	265
7.3.3	精调的 Ziegler-Nichols 整定算法	267
7.3.4	预测性 PI 整定算法	268
7.4	高级 PID 整定方法	271
7.4.1	幅值与相位裕量设定的算法	271
7.4.2	内部模型控制器	272
7.4.3	极点配置控制器整定	275
7.5	最优 PID 控制器设计	276
7.5.1	设定点最优 PID 控制器整定	277
7.5.2	扰动抑制的 PID 控制器整定	277
7.5.3	基于幅值和相位裕量设定的 PID 控制器设计	280
7.5.4	改进的幅值相位方法	281
7.6	PID 控制的进一步内容	282
7.6.1	积分器回绕与抗回绕 PID 控制器	282
7.6.2	自整定 PID 控制器	284
7.6.3	控制策略选择	287

习 题	288
第 8 章 鲁棒控制系统设计	290
8.1 线性二次型 Gauss 控制	290
8.1.1 线性二次型 Gauss 问题	290
8.1.2 使用 MATLAB 求解 LQG 问题	291
8.1.3 带有回路传输恢复的 LQG 控制	296
8.2 鲁棒控制问题的一般描述	304
8.2.1 小增益定理	304
8.2.2 非结构化的不确定性	304
8.2.3 鲁棒控制结构	305
8.2.4 MATLAB 环境下的模型表示	305
8.2.5 处理虚轴上的极点	308
8.3 \mathcal{H}_∞ 控制器设计	310
8.3.1 在加权函数下增广系统模型	310
8.3.2 在 MATLAB 下进行加权模型增广	312
8.3.3 加权灵敏度问题——一个简单的情况研究	314
8.3.4 \mathcal{H}_∞ 控制器设计——一般问题考虑	320
8.3.5 最优 \mathcal{H}_∞ 控制器设计	329
8.4 最优 \mathcal{H}_2 控制器设计	332
8.5 关于 \mathcal{H}_∞ 控制器设计的其它问题	336
8.5.1 特殊的 \mathcal{H}_∞ 控制结构	336
8.5.2 \mathcal{H}_∞ 控制中加权函数的影响	338
8.5.3 灵敏度问题的加权函数选择	343
习 题	346
参考文献	349
附录 A Laplace 变换的计算机求解	351
A.1 基本 Laplace 变换表	351
A.2 其它函数的导出变换	351
A.3 计算机辅助 Laplace 变换求解	353
A.3.1 应用 Mathematica 软件进行 Laplace 变换	353
A.3.2 使用 MATLAB 的符号运算工具箱进行 Laplace 变换	356
习 题	359
附录 B 反馈系统分析与设计工具 CtrlLAB 简介	361
B.1 引 言	361
B.1.1 CtrlLAB 简介	361
B.1.2 程序安装与系统要求	362
B.1.3 CtrlLAB 程序的运行	362

B.1.4	CtrlLAB 的版权与声明	362
B.2	系统模型输入与转换	363
B.2.1	传递函数模型输入	363
B.2.2	其它模型表达式输入	364
B.2.3	更复杂的系统模型的输入	365
B.3	模型变换与降阶	366
B.3.1	模型显示	366
B.3.2	状态方程实现	369
B.3.3	模型降阶	369
B.4	控制系统分析	370
B.4.1	控制系统的频域分析	371
B.4.2	控制系统的时域响应分析	372
B.4.3	系统特性分析	375
B.5	系统设计的应用实例	376
B.5.1	经典控制系统设计功能	376
B.5.2	PID 控制器设计	377
B.5.3	鲁棒控制器设计	379
B.6	基于图形界面的辅助工具	382
B.6.1	矩阵处理程序	382
B.6.2	图形处理程序	386
习 题	390
附录 C	作者编写的 MATLAB 函数清单	392
索 引		403

第 1 章 反馈控制系统引论

1.1 反馈控制系统的基本结构

典型反馈控制系统结构如图 1.1 所示。在该结构下包含了 3 个典型的部分，即对象模型、控制器模型和反馈模型。为简单起见，本书在控制系统的方框图表示中，只对负有运算的路径用减号标注，而略去所有的加号标注。在这样的结构下，系统的对象模型和控制器模型共同构成了系统的前向通路，而所谓的反馈模型构成了系统的反馈通路。这样的结构在过程控制和其它控制中是普遍应用的。

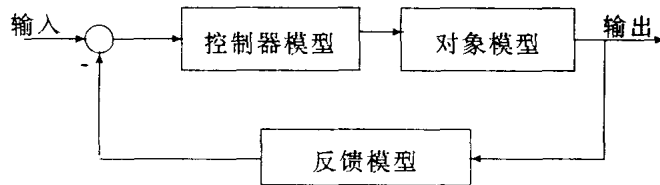


图 1.1 典型反馈控制结构

在控制系统中，反馈的概念是很重要的。假设在图 1.1 中的控制系统没有反馈回路，这样整个系统将在给定的输入信号作用下经控制器调节，得出输出响应，这种控制策略又称为开环控制。这在理想的条件下，有时是可行的。有一些开环控制的例子如洗衣机的控制和暖气控制等。再举一个简单的例子，我们想把一壶水烧开，最直接的办法是将水壶放在煤气炉上加热。如果只采用开环控制的方法，则一壶水在烧开后继续加热，将直至水全部被汽化，并将对水壶产生破坏。在电动水壶中，我们由某种方式检验壶中水的汽化程度，在烧开后会自动关闭加热器。可以看出，电动水壶的控制还是比较理想的，至少会节约能源，另外还可避免事故发生。

自然界中系统是没有多少现象可以满足这里所谓的“理想”条件的。例如，外界可能对系统有某些扰动信号，而在开环控制下这样的扰动是不能在控制器中反映出来的，控制器将以一成不变的形式对原系统继续控制，而忽略扰动信号的存在。这样系统的输出很难和我们所预期的一致，甚至会出现系统的不稳定现象。

有了反馈信号以后，我们可以通过系统的实际输出信号和预期的输出信号之间的偏差来调节整个系统的响应，而实际的输出信号就是由反馈环节提供的。如果系统的输出信号偏移了期望的输出信号，则控制器将发生作用，迫使实际的输出信号再发生变化，去逼近期望的输出信号。

从图 1.1 中的系统可见，我们可以由反馈环节取得实际输出信号，并加以处理，再从

输入信号中减去这样的反馈信号，将结果输入到控制器中去控制整个系统，而在反馈控制系统中我们经常研究的问题是如何让输出信号去跟踪输入的信号。这样的控制结构经常称为负反馈控制。如果系统结构图中的减号变成加号，则称为正反馈系统。正反馈系统一般是不能改进系统性能的。相反，这样的结构常常使得整个系统的性能变坏。

在实际控制系统中，更一般的系统结构如图 1.2 所示，其中负反馈模型简化成 1。对线性系统来说，不等于 1 的反馈环节经常可以等效地变换成图 1.2 (a) 所示的形式。因为这里有两个子模型可以用于控制系统的设计中，故这样的结构往往又称为二自由度

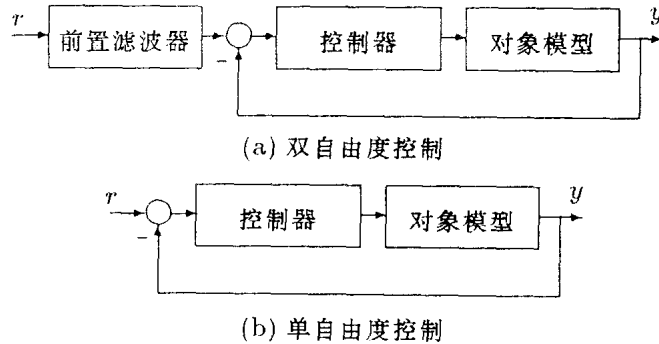


图 1.2 反馈控制系统结构

控制结构。在实际设计中，我们经常也将前置的控制器假设为 1，这样控制器的结构就简化成图 1.2 (b) 所示的形式，这种系统又称为单自由度的控制问题。本书中将着重介绍单自由度的反馈控制系统分析与设计问题。

1.2 反馈控制理论的发展综述

自动控制系统的早期应用可以追溯到两千多年前古埃及的水钟控制与中国汉代的指南车控制。

1788 年英国科学家 James Watt 为内燃机设计的飞锤调速器可以认为是最早的反馈控制系统的工程应用。由于当时应用的调速器出现振荡现象，所以出现了 Maxwell 对微分方程系统稳定性的理论研究 (1868)，后来又出现了 Routh (1874) 和 Hurwitz (1895) 等人的稳定性研究成果。控制器的设计问题是由 Minorsky 在 1922 年开始研究的，其研究成果可以看成是现在广泛应用的 PID 控制器的前身，而 1942 年，Ziegler 与 Nichols 提出了调节 PID 控制器参数的方法，其方法对当今的 PID 控制器整定仍有影响。

系统的频域分析技术是在 Nyquist (1932 年)、Bode (1945 年) 等早期的关于通信学科的频域研究工作的基础上建立起来的，Harris 于 1942 年提出的传递函数的概念首先将通信学科的频域技术移植到了控制领域，构成了控制系统频域法理论研究的基础。Evens 在 1946 年提出的线性反馈系统的根轨迹分析技术是那个时代的另一个里程碑。

原苏联学者 Pontryagin 于 1956 年提出的极大值原理、Bellman 的动态规划 (1957 年) Kalman 的状态空间分析技术 (1960 年) 开创了控制理论研究的新时代，他们的理论

当时统称为“现代控制理论”。在那个时期以后，控制理论研究中出现了线性二次型最优调节器 (Kalman 1959)、最优状态观测器 (Kalman 1960) 及线性二次型 Gauss (简称 LQG) 问题的研究，并在后来出现了引入回路传输恢复技术的 LQG 控制器。

鲁棒控制是控制系统设计中的另一个令人瞩目的领域，早在 1981 年，美国学者 Zames 提出了基于 Hardy 空间范数最小化方法的鲁棒最优控制理论，而 1992 年 Doyle 等人提出的最优控制的状态空间数值解法在这个领域有着重要的贡献。

本书将系统地演示计算机技术在反馈控制系统的分析与设计中的应用。控制系统计算机辅助分析与设计的早期应用可以在 Jones 和 Melsa^[19] 在 1970 年出版的专著中反映出来，该书中给出了大量的 Fortran 源程序，可以直接用于控制系统的分析与设计。这也可以被认为是第一代控制系统计算机辅助分析与设计软件。

第二代的系统分析与设计软件的一个显著的特点是其人机交互性，这类软件的典型代表是 Moler 开发的 MATLAB 软件环境 (1980) 和 Åström 的 INTRAC 软件 (1984)。这样的软件和当时流行的 C 与 Fortran 语言一样，往往需要用户掌握其编程方法。所不同的是，由于这些软件的专用性，故其集成度和编程效率大大高于 C 这类语言，从而得到广大使用者的喜爱。

当今的控制系统计算机辅助分析与设计软件的特点是其面向对象的程序设计结构，这种新的概念在 MATLAB 语言和其支持工具 Simulink[®] 中反映出来。

1.3 本书的结构

系统的数学模型表述在控制系统的分析与设计中是相当重要的，对大多数分析与控制算法来说，我们必需首先知道系统的数学模型完成分析与设计任务。本书将集中研究线性连续单变量系统的数学模型，而本书的绝大部分都将以这类模型为出发点。我们用四种方法介绍并研究这类模型，如线性系统的传递函数方法、状态方程方法、零极点模型与更一般的方框图模型。

我们将首先介绍基于 Laplace 变换的传递函数模型，该模型是将常微分方程用一种有效的方法映射成代数方程进行研究的方法，有很多的控制系统的分析与设计工具都是针对这样的模型结构提出来的。

状态方程模型是一种描述系统内部相位的一种有效方法，值得指出的是，这种系统不但适用于线性模型的分析，也适用于非线性模型的分析。在线性系统的状态方程研究中，将大量地使用线性代数的方法和结论。

零极点模型实际上是用因式形式描述的传递函数模型，该方法对系统的某些特性可以以更显著的分式表现出来。方框图模型表示方法可以用来研究更复杂的控制系统结构。尽管各种模型的形式是不同的，但我们可以通过某种方法进行相互转换，具体的模型表示与转换问题将在第 2 章中介绍。

本书将介绍的控制系统的分析方法将集中在线性时不变反馈控制系统的结构下，分析的内容将作如下归类：

- **参数化性质分析:** 这里我们将以参数的形式来分析控制系统的性质, 诸如系统的鲁棒性与稳定性等。还将分析系统的可控性和可观测性、Kalman 规范分解、时间矩量和 Markov 参数等, 在系统的鲁棒性分析中将着重介绍系统的范数测度, 这些相关的内容将在第3章中给出。
- **时域分析:** 我们将介绍在阶跃信号输入的激励下, 系统的输出信号响应分析, 这种方法是控制系统分析中最直接的方法之一。我们将介绍线性系统在一类典型输入信号下的解析解法, 并将介绍其数值解法。除了阶跃响应, 我们还将分析系统的脉冲响应和任意输入下系统的响应分析。还将对带有时间延迟的系统作精确和近似的分析方法。这部分内容将在第4章中给出。
- **系统的复域与频域分析:** 系统的复域分析着重介绍根轨迹分析技术, 并介绍根轨迹绘制的方法及基于根轨迹的系统稳定性分析方法。系统的频域分析技术是应用最广泛的系统分析技术, 在频域分析中还可以得出各种各样的系统图形表示, 使得这些技术在过程控制中有着十分重要的地位。系统的动态性能就可以通过这些图示的方法表示出来。相关的技术包括系统的 Nyquist 图分析方法、Bode 图及其渐近线逼近、Nichols 图分析等, 并将介绍稳定裕量的分析、非最小相位系统的分析等内容。这部分内容将在第5章中介绍。

本书除了介绍系统分析技术之外, 要介绍的另一个主题是控制系统的设计问题, 这里我们将讨论大量的控制结构和控制器设计算法, 包括:

- **经典设计方法:** 这类设计方法包括系统的超前 / 滞后串联补偿器设计、线性二次型最优控制器设计、极点配置控制器设计与模型跟踪控制器设计等, 并将介绍观测器设计和基于观测器的控制器设计问题。这部分的内容将在第6章中给出。
- **PID 控制器设计及应用:** PID 控制器是过程控制中应用最广的一类控制器, 本书中将系统地介绍 PID 控制器的结构、设计和应用问题, 引入自整定 PID 控制策略。这部分将着重介绍 PID 控制器整定的各种各样的算法、求解及 MATLAB 实现。有关 PID 控制器的内容将在第7章中给出。
- **鲁棒控制器设计:** 这部分内容将在第8章中给出, 内容包括线性二次型 Gauss (LQG) 最优控制、带有回路传输恢复的 LQG/LTR 控制器 (即 LQG/LTR)、基于 Hardy 空间范数 (如 \mathcal{H}_2 及 \mathcal{H}_∞) 的控制器设计等。

本书还将给出若干个附录, 其内容也是很实用的, 例如附录 A 中介绍 Laplace 变换的进一步内容, 还给出了利用计算机工具, 如 Mathematica 和 MATLAB 的符号运算工具箱[®], 推导 Laplace 变换及逆 Laplace 变换的方法。附录 B 中介绍作者自行开发的反馈控制系统分析与设计图形界面 CtrlLAB。在附录 C 中还给出了书中作者设计的一些 MATLAB 用户程序的清单, 相信这将对本书的读者有所帮助。

1.4 计算机辅助工具 MATLAB 语言简介

1.4.1 MATLAB 语言引论

MATLAB 环境 (又称为 MATLAB 语言) 是由美国 New Mexico 大学的 Cleve Moler 于 1980 年开始开发的, 1984 年由 Cleve Moler 等人创立的 MathWorks 公司推出了第一个商业版本。MATLAB 语言的两个最显著特点, 即其强大的矩阵运算能力和完美的图形可视化功能, 使得它成为国际控制界应用最广的首选计算机工具。现在, MATLAB 语言不但广泛应用于控制领域, 也应用于其它的工程和非工程领域。在控制界, 很多知名学者都为其擅长的领域写出工具箱, 而其中很多工具箱已经成为该领域的标准, 如 John Little 和 Alan Laub 开发的控制系统工具箱 (Control Systems Toolbox) 与 Ljung 的辨识工具箱 (Identification Toolbox[®]) 等, 这无疑又进一步增加了 MATLAB 本身的声誉。

下面叙述 MATLAB 发展中的几个重要阶段: 早期的 MATLAB 1.0 和 2.0 版本开始引起控制界学者的注意, 出现了控制系统工具箱等软件, 也出现了类似于 MATLAB 的 Control C 软件等, MATLAB 3.5 版本及当时推出的 Simulink 是 MATLAB 开始得到控制界更广泛应用的成功范例, 因为在那以前控制界很多学者使用 ACSL 作为系统仿真的语言, 而方便的、图形化的 Simulink 一出现就很容易地取代了 ACSL 语言, 成为研究者首选的仿真工具。MATLAB 4.0 版本提供了完全的 Windows 界面, 并允许用户进行图形界面设计, 当前的 MATLAB 5.0 及以上版本更提供了强大的数据结构, 它的几个改进的工具箱也使得系统分析与设计更加方便。

在本书中我们将广泛地使用 MATLAB 语言作为实验的工具, 同时将逐步引入控制系统工具箱、适当地介绍鲁棒控制工具箱中的一些内容。除此之外, 我们还将广泛应用 CtrlLAB 这一反馈系统分析设计的图形界面。

本书中所采用的版本是 MATLAB 5.0 以上版本、控制系统工具箱 4.0 以上版本、鲁棒控制工具箱 2.0 以上版本及 Simulink 2.0 以上版本。为了照顾 MATLAB 早期版本的用户, 本书将适当地给出了早期版本相应内容的注释, 以供参考。

1.4.2 标准 MATLAB 语句与函数

和别的程序设计语言不同, MATLAB 语言的基本变量单元是复数矩阵, 其矩阵处理功能和图形处理功能是其最显著的特色。在 MATLAB 下输入一个矩阵是十分容易的事, 例如若我们想输入矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 0 \end{bmatrix}$$

则我们可以在 MATLAB 下给出下面的命令

```
>> A=[1,2,3; 4 5,6; 7,8 0];
```

其中 >> 为 MATLAB 提示符 (在中文视窗环境中将无法显示该提示符), 矩阵的内容由方括号括起来的部分表示, 而在方括号中的分号表示矩阵的换行, 逗号或空格表示同一行矩阵元素间的分隔。作为矩阵的特殊形式, 在 MATLAB 下也可以容易地输入向量和标

量。

在当前的 MATLAB 5.0 及以上版本中,除了这样的简单变量形式外,还支持更复杂的数据结构,如多维矩阵、结构体数据、单元变量、类结构等。这就使得 MATLAB 在编程上更加灵活和方便了。

MATLAB 函数的调用格式和其它编程语言也是不同的,其典型的调用格式为

```
[返回变量列表]=func_name(输入变量列表)
```

其中等号左边的变量为返回变量,等号右边的变量为输入变量。MATLAB 允许在函数调用时同时返回多个变量。而一个函数又可以由多种格式进行调用,例如 bode() 函数可以由下面的格式调用

```
[mag,phase]=bode(num,den,w)
```

其中 bode() 函数用来求取或绘制系统的 Bode 图,而系统在这里由传递函数分子 num 和分母 den 表示,我们还可以用下面的格式调用此函数

```
[mag,phase]=bode(A,B,C,D,w)
```

其中 (A,B,C,D) 为系统的状态方程模型。尽管两种调用格式是完全不同的, MATLAB 函数还是会自动识别你到底是用哪种格式调用该函数的,从而得出正确的结论。

在当前版本的控制系统工具箱中还允许用线性模型对象变量 G 来描述系统,例如

```
[mag,phase]=bode(G,w)
```

MATLAB 函数在返回变量的格式上也可以是不同的,例如若上面的语句中若没有返回变量,则将自动地绘制系统的 Bode 图,否则将返回计算结果数据。

1.4.3 MATLAB 语言的图形功能

如果提供了合适的的数据,我们可以用 MATLAB 提供的 plot() 直接绘制出该数据的二维曲线图来

```
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,...)
```

其中 (x1, y1) 为向量 (或矩阵) 对,该变量应该分别包含要绘制曲线的 x- 轴和 y- 轴数据, (x2, y2) 为另一组,诸如此类。我们还可以调用其它的函数和命令对得出的图形进行进一步修饰,如:

- 1). grid 命令在图上添加或删除坐标轴网格;
- 2). xlabel() 和 ylabel() 命令给图形加 x- 轴和 y- 轴标注;
- 3). title() 函数给图形加标题;
- 4). text() 与 gtext() 给图形上加文字说明。

我们还可以用 MATLAB 下提供的图形处理程序用可视的方式对得出的图形加以修饰、添加线段和箭头指示,具体方法请参照附录 C 中给出的说明。

在 MATLAB 下还提供了绘制三维曲面的函数,如 mesh() 与 surf() 等。这些函数