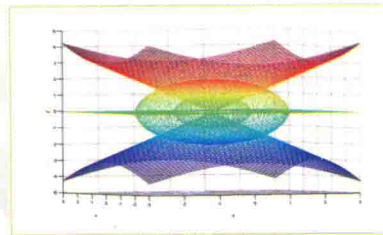
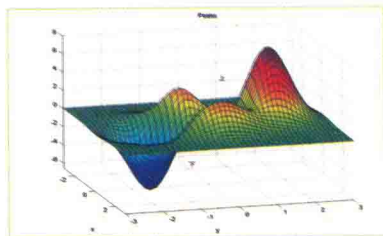
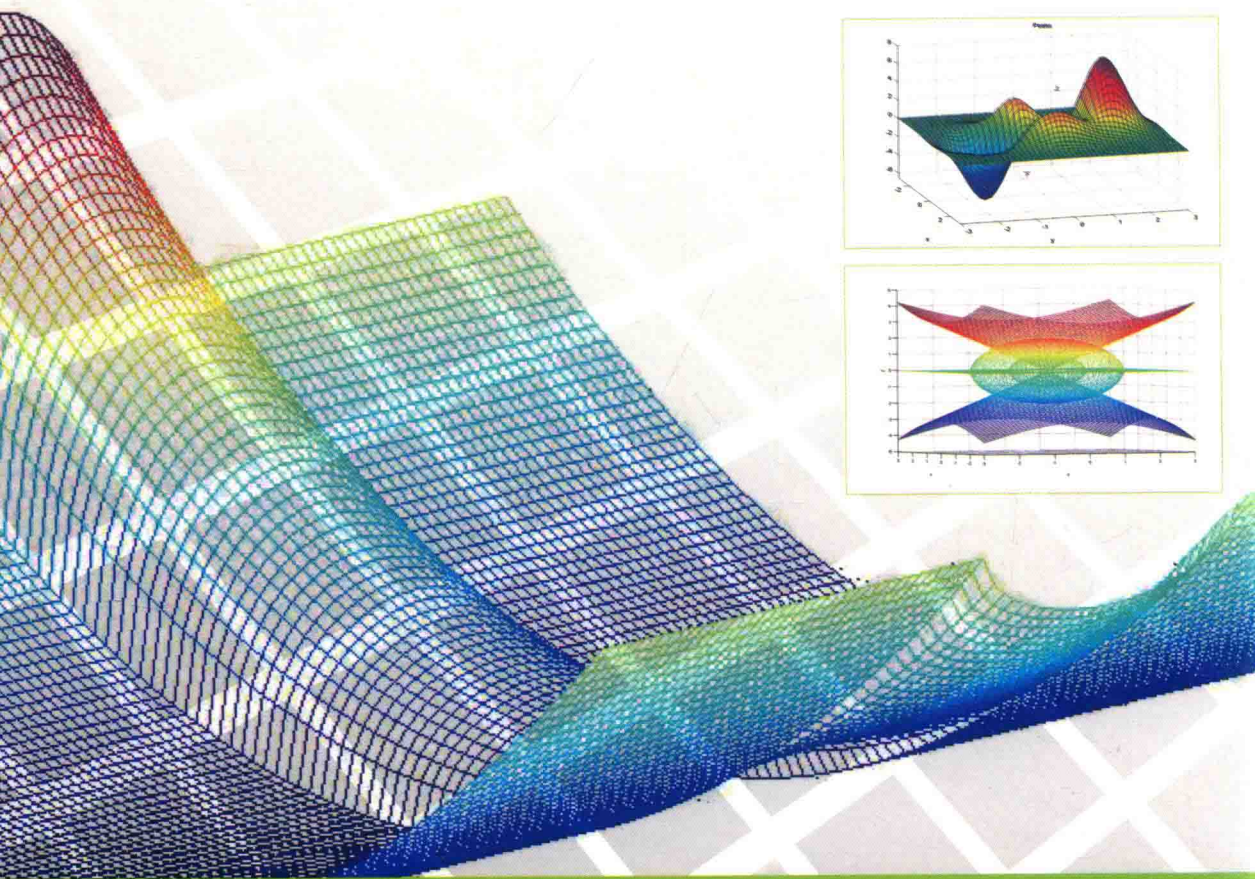




高等学校电子信息类教材



# MATLAB/Simulink 与控制系统仿真 (第4版)

王正林 王胜开 陈国顺 王祺 编著

 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

高等学校电子信息类教材

# MATLAB/Simulink 与控制系统仿真 (第4版)

王正林 王胜开 陈国顺 王祺 编著

---

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书从应用角度出发,全面系统地介绍了 MATLAB/Simulink 及其在自动控制中的应用,结合 MATLAB/Simulink 的操作使用,通过大量的典型实例,全面阐述了自动控制的基本原理,以及控制系统分析与设计的主要方法。全书共 13 章,包括自动控制系统与仿真概述、MATLAB 计算基础、Simulink 仿真、控制系统数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、控制系统校正与综合、线性系统状态空间分析、线性系统状态空间设计、非线性系统、离散控制系统、最优控制系统等。各章通过精心设计的应用实例、综合实例和习题帮助读者理解并掌握自动控制原理,以及 MATLAB/Simulink 相关功能、工具的使用。

本书各章节之间既相互联系又相对独立,读者可根据自己需要选择阅读。本书可作为自动化、控制工程、电气工程、信息、机电、测控、计算机等专业高等院校学生和研究生在教学参考用书,也可供相关领域的工程技术和研究人员参考。

本书配有教学课件,读者可以登录华信教育资源网([www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn))免费注册后下载。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

MATLAB/Simulink 与控制系统仿真 / 王正林等编著. —4 版. —北京: 电子工业出版社, 2017.5

高等学校电子信息类教材

ISBN 978-7-121-31315-8

I. ①M… II. ①王… III. ①自动控制系统—系统仿真—Matlab 软件—高等学校—教材 IV. ①TP273-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 072752 号

责任编辑: 田宏峰

印 刷: 北京京科印刷有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 25.75 字数: 660 千字

版 次: 2005 年 7 月第 1 版

2017 年 5 月第 4 版

印 次: 2017 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: [tianhf@phei.com.cn](mailto:tianhf@phei.com.cn)。

# 第 4 版前言

本书自 2005 年第 1 版出版以来,十余年一直受到读者的欢迎与好评,而且已经被国内多所院校作为电子信息类课程的教材和教辅参考书,根据读者的需求、控制系统的发展,以及 MATLAB/Simulink 软件版本的升级,我们再次进行了升级完善。

社会生产力的不断发展和人们生活质量的不断提高,必将对控制理论、技术、系统与应用提出越来越多、越来越高的要求,因此有必要进一步加强、加深对这方面的研究。作为控制理论与控制工程及其计算机仿真的强有力工具, MATLAB/Simulink 得到了业界的一致认可,在控制系统仿真、分析与设计方面得到了广泛应用,其自身也因此得到了迅速发展,功能不断扩充。实践已表明 MATLAB/Simulink 的确是一个功能强大、形象逼真、便于操作的仿真软件工具。

为了更好地推动 MATLAB/Simulink 在控制系统仿真、分析与设计中的应用,在借鉴以往类似书籍与教材经验并弥补其中不足的基础上,我们结合日常的科研和教学工作编撰了此书。全书从实用角度出发,通过大量典型的样例,对 MATLAB/Simulink 的功能、操作及其在自动控制中的应用进行详细论述。书中所述的大部分内容和例子,我们均已在本科生和研究生有关控制理论与控制工程的科研和教学实践中做过试验与验证,是我们多年来教学与科研的结晶。

全书共 13 章,内容包括 MATLAB/Simulink 介绍、控制系统数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、控制系统校正与综合、线性系统状态空间分析与设计、非线性系统、离散控制系统等。各章通过精心设计的应用实例来帮助读者理解并掌握自动控制原理,以及 MATLAB/Simulink 在控制系统仿真中的应用。全书内容深入浅出、图文并茂,各章节之间既相互联系又相对独立,读者可根据自己需要选择阅读。本书既可作为自动控制、电气工程、机械电子、信息、计算机仿真、计算机应用等大专院校学生和研究生教学参考用书,也可供相关领域工程技术和研究人员参考。

对已故恩师汪仁先教授表示衷心的感谢。

在本书编写过程中,孙一康教授、余达太教授、尹怡欣教授、安世奇教授、刘增良教授、彭开香教授给予了大力指导与支持,在此一并表示感谢。

由于时间仓促、作者水平和经验有限,书中错漏之处在所难免,敬请读者指正。

编 著 者

2017 年 3 月

# 目 录

第 1 章 自动控制系统与仿真概述	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制系统基本概念	1
1.2.1 开环控制系统与闭环控制系统	2
1.2.2 闭环控制系统组成结构	3
1.2.3 反馈控制系统品质要求	4
1.3 自动控制系统分类	4
1.3.1 线性系统和非线性系统	5
1.3.2 离散系统和连续系统	5
1.3.3 恒值系统和随动系统	6
1.4 控制系统仿真基本概念	6
1.4.1 计算机仿真基本概念	7
1.4.2 控制系统仿真	8
1.4.3 控制系统计算机仿真基本过程	9
1.4.4 计算机仿真技术发展趋势	9
1.5 MATLAB/Simulink 下的控制系统仿真	10
1.5.1 MATLAB 适合控制系统仿真的特点	10
1.5.2 Simulink 适合控制系统仿真的特点	10
1.6 MATLAB 中控制相关的工具箱	11
1.7 Python 中控制系统相关的包	13
1.7.1 Python 与 MATLAB 对比	14
1.7.2 Python 的控制系统包	14
第 2 章 MATLAB 计算基础	15
2.1 引言	15
2.2 MATLAB 概述	15
2.2.1 MATLAB 发展历程	15
2.2.2 MATLAB 系统构成	16
2.2.3 MATLAB 常用工具箱	17
2.3 MATLAB 桌面操作环境	17
2.3.1 MATLAB 启动和退出	17
2.3.2 MATLAB 命令行窗口	18
2.3.3 MATLAB 工作区	19
2.3.4 MATLAB 文件管理	20
2.3.5 MATLAB 帮助使用	20

2.4	MATLAB 数值计算	21
2.4.1	MATLAB 数值类型	21
2.4.2	矩阵运算	23
2.5	关系运算和逻辑运算	26
2.6	符号运算	27
2.6.1	符号运算基础	27
2.6.2	控制系统中常用的符号运算	28
2.7	复数和复变函数运算	29
2.7.1	复数运算基础	29
2.7.2	拉普拉斯变换及反变换	32
2.7.3	Z 变换及其反变换	33
2.8	MATLAB 常用绘图命令	35
2.9	MATLAB 程序设计	38
2.9.1	MATLAB 程序类型	38
2.9.2	MATLAB 程序流程控制	39
2.9.3	MATLAB 程序基本设计原则	41
<b>第 3 章</b>	<b>Simulink 仿真</b>	<b>43</b>
3.1	引言	43
3.2	Simulink 仿真概述	43
3.2.1	Simulink 的启动与退出	44
3.2.2	Simulink 建模仿真	45
3.3	Simulink 的模块库简介	47
3.3.1	Simulink 模块库分类	47
3.3.2	控制系统仿真中常用的模块	48
3.3.3	控制系统仿真中常用的 Blockset	49
3.4	Simulink 功能模块的处理	50
3.4.1	Simulink 模块参数设置	50
3.4.2	Simulink 模块的基本操作	51
3.4.3	Simulink 模块间的连线处理	52
3.5	Simulink 仿真设置	53
3.5.1	仿真器参数设置	53
3.5.2	工作空间数据导入/导出设置	56
3.6	Simulink 仿真举例	57
3.7	Simulink 自定义功能模块	65
3.7.1	自定义功能模块的创建	65
3.7.2	自定义功能模块的封装	65
3.8	S 函数设计与应用	67
3.8.1	S 函数设计模板	67
3.8.2	S 函数设计举例	70

第 4 章 控制系统数学模型 .....	73
4.1 引言 .....	73
4.2 动态过程微分方程描述 .....	73
4.3 拉氏变换与控制系统模型 .....	76
4.4 数学模型描述 .....	78
4.4.1 传递函数模型 .....	78
4.4.2 零极点形式的数学模型 .....	79
4.4.3 状态空间模型 .....	80
4.5 MATLAB/Simulink 在模型中的应用 .....	80
4.5.1 多项式处理相关的函数 .....	80
4.5.2 建立传递函数相关的函数 .....	81
4.5.3 建立零极点形式的数学模型相关函数 .....	82
4.5.4 建立状态空间模型相关的函数 .....	82
4.5.5 Simulink 中的控制系统模型表示 .....	83
4.5.6 Simulink 中模型与状态空间模型的转化 .....	84
4.5.7 应用实例 .....	84
4.6 系统模型转换及连接 .....	88
4.6.1 模型转换 .....	88
4.6.2 模型连接 .....	90
4.6.3 模型连接的 MATLAB 实现 .....	91
4.7 非线性数学模型的线性化 .....	93
4.8 综合实例及 MATLAB/Simulink 应用 .....	94
习题 .....	98
第 5 章 时域分析法 .....	100
5.1 引言 .....	100
5.2 时域响应分析 .....	100
5.2.1 典型输入 .....	100
5.2.2 线性系统时域响应一般求法 .....	102
5.2.3 时域响应性能指标 .....	103
5.2.4 一阶和二阶系统的时域响应 .....	104
5.2.5 高阶系统的时域分析 .....	108
5.3 MATLAB/Simulink 在时域分析中的应用 .....	110
5.3.1 时域分析中 MATLAB 函数的应用 .....	110
5.3.2 时域响应性能指标求取 .....	114
5.3.3 二阶系统参数对时域响应性能的影响 .....	117
5.3.4 改善系统时域响应性能的一些措施 .....	120
5.3.5 LTI Viewer 应用 .....	124
5.4 稳定性分析 .....	128
5.4.1 稳定性基本概念 .....	128

5.4.2	稳定性判据	129
5.4.3	稳态误差分析	132
5.4.4	MATLAB 在稳定性分析中的应用	136
5.5	综合实例及 MATLAB/Simulink 应用	137
	习题	145
<b>第 6 章</b>	<b>根轨迹分析法</b>	<b>147</b>
6.1	引言	147
6.2	根轨迹定义	147
6.3	根轨迹法基础	148
6.3.1	幅值条件和相角条件	148
6.3.2	绘制根轨迹的一般法则	150
6.3.3	与根轨迹分析相关的 MATLAB 函数	152
6.3.4	根轨迹分析与设计工具 rltool	154
6.3.5	利用 MATLAB 绘制根轨迹图举例	156
6.4	其他形式的根轨迹	160
6.4.1	正反馈系统的根轨迹	160
6.4.2	参数根轨迹	160
6.4.3	时滞系统的根轨迹	161
6.4.4	利用 MATLAB 绘制其他形式的根轨迹举例	162
6.5	用根轨迹法分析系统的暂态特性	164
6.6	综合实例及 MATLAB/Simulink 应用	167
	习题	170
<b>第 7 章</b>	<b>频域分析法</b>	<b>173</b>
7.1	引言	173
7.2	频率特性基本概念	173
7.2.1	频率特性定义	174
7.2.2	频域分析法的特点	174
7.2.3	频域性能指标	175
7.3	频率特性的表示方法	176
7.3.1	极坐标图 (Nyquist 图)	176
7.3.2	对数坐标图 (Bode 图)	176
7.3.3	对数幅相图 (Nichols 图)	177
7.3.4	典型环节的频率特性	177
7.4	系统开环频率特性作图	180
7.4.1	开环对数频率特性作图	180
7.4.2	开环极坐标作图	181
7.5	频率响应分析	181
7.5.1	开环频率特性的性能分析	181
7.5.2	闭环频率特性的性能分析	183



7.6	MATLAB 在频率法中的应用	187
7.6.1	求取和绘制频率响应曲线相关的函数	187
7.6.2	应用实例	188
7.7	频率法的稳定性分析	192
7.7.1	Nyquist 稳定判据	192
7.7.2	稳定裕度	194
7.7.3	MATLAB 在稳定性分析中的应用	196
7.8	综合实例及 MATLAB/Simulink 应用	199
	习题	201
<b>第 8 章</b>	<b>控制系统校正与综合</b>	<b>203</b>
8.1	引言	203
8.2	控制系统校正与综合基础	203
8.2.1	控制系统性能指标	203
8.2.2	控制系统校正概述	205
8.3	PID 控制器设计及 MATLAB/Simulink 应用	206
8.3.1	PID 控制器概述	206
8.3.2	比例 (P) 控制	207
8.3.3	比例微分 (PD) 控制	209
8.3.4	积分 (I) 控制	210
8.3.5	比例积分 (PI) 控制	211
8.3.6	比例积分微分 (PID) 控制	212
8.3.7	PID 控制器参数整定	212
8.4	控制系统校正的根轨迹法	223
8.4.1	基于根轨迹法的超前校正	223
8.4.2	基于根轨迹法的滞后校正	224
8.4.3	基于根轨迹法的超前滞后校正	224
8.4.4	MATLAB/Simulink 在根轨迹法校正中的应用	225
8.5	控制系统校正的频率响应法	232
8.5.1	基于频率法的超前校正	232
8.5.2	基于频率法的滞后校正	233
8.5.3	MATLAB/Simulink 在频率响应法校正中的应用	233
8.6	综合实例及 MATLAB/Simulink 应用	238
	习题	243
<b>第 9 章</b>	<b>线性系统状态空间分析</b>	<b>245</b>
9.1	引言	245
9.2	线性系统状态空间基础	245
9.2.1	状态空间基本概念	245
9.2.2	状态空间实现	247
9.2.3	状态空间的标准型	255

9.2.4	状态方程求解	258
9.2.5	MATLAB/Simulink 在线性系统状态空间描述中的应用	264
9.3	线性系统的状态可控性与状态可观性	269
9.3.1	状态可控性	270
9.3.2	状态可观性	271
9.3.3	对偶系统和对偶原理	272
9.3.4	可控标准型和可观标准型	273
9.3.5	MATLAB/Simulink 在可控和可观标准型中的应用	276
9.4	线性系统稳定性分析	280
9.4.1	稳定性分析基础	280
9.4.2	李雅普诺夫稳定性分析	281
9.4.3	MATLAB/Simulink 在李雅普诺夫稳定性分析中的应用	284
9.5	综合实例及 MATLAB/Simulink 应用	285
	习题	288
<b>第 10 章</b>	<b>线性系统状态空间设计</b>	<b>291</b>
10.1	引言	291
10.2	状态反馈与极点配置	291
10.2.1	状态反馈	292
10.2.2	输出反馈	293
10.2.3	极点配置	294
10.2.4	MATLAB/Simulink 在极点配置中的应用	296
10.3	状态观测器	300
10.3.1	状态观测器的基本概念	301
10.3.2	全维状态观测器	302
10.3.3	降维状态观测器	307
10.3.4	MATLAB/Simulink 在状态观测器设计中的应用	310
10.4	综合实例及 MATLAB/Simulink 应用	311
	习题	316
<b>第 11 章</b>	<b>非线性系统</b>	<b>319</b>
11.1	引言	319
11.2	非线性系统概述	319
11.2.1	非线性控制理论发展概况	319
11.2.2	典型非线性特性	320
11.2.3	Simulink 中的非线性模块	322
11.3	相平面法	324
11.3.1	相平面法基础知识	325
11.3.2	MATLAB/Simulink 在相轨迹图绘制中的应用	326
11.4	描述函数法	333
11.4.1	描述函数基本概念	333

11.4.2	描述函数定义	333
11.4.3	描述函数的计算	335
11.4.4	非线性系统的稳定性分析	336
11.5	MATLAB/Simulink 在非线性系统分析中的应用	337
11.6	综合实例及 MATLAB/Simulink 应用	340
	习题	345
<b>第 12 章</b>	<b>离散控制系统</b>	<b>346</b>
12.1	引言	346
12.2	离散控制系统基本概念	346
12.2.1	离散控制系统概述	346
12.2.2	离散信号的数学描述	348
12.3	离散控制系统的研究方法	351
12.3.1	线性连续与离散控制系统研究方法类比	352
12.3.2	MATLAB 中的离散控制系统相关的函数	352
12.4	Z 变换	353
12.4.1	离散信号的 Z 变换	353
12.4.2	Z 变换与 Z 反变换常用方法	355
12.5	离散控制系统数学模型	358
12.5.1	离散系统时域数学模型	358
12.5.2	离散系统频域数学模型	360
12.6	离散控制系统性能分析	366
12.6.1	稳定性分析	366
12.6.2	静态误差分析	367
12.6.3	动态特性分析	369
12.6.4	MATLAB/Simulink 在离散系统性能分析中的应用	371
12.7	综合实例及 MATLAB/Simulink 应用	383
	习题	388
<b>第 13 章</b>	<b>最优控制系统</b>	<b>390</b>
13.1	引言	390
13.2	最优控制问题的描述	390
13.3	线性二次型最优控制问题	391
13.4	MATLAB/Simulink 在线性二次型最优控制中的应用	392
13.5	综合实例及 MATLAB/Simulink 应用	393
	习题	397
	参考文献	399

# 自动控制系统与仿真概述

## 1.1 引言

本章描述自动控制系统的基本概念及自动控制系统仿真的基本知识,介绍自动控制系统与仿真的概念、组成、分类,以及 MATLAB 控制系统仿真等基础知识。通过本章,读者对自动控制系统与仿真以及本书的主要内容能有整体的认识。

本章的知识点及要求概括如下。

序号	知 识 点	了解	熟悉	掌握	精通
1	开环和闭环系统的结构		√		
2	反馈系统的品质要求			√	
3	控制系统的分类		√		
4	控制系统仿真的基本过程及发展趋势		√		
5	MATLAB/Simulink 适合仿真的特点	√			
6	MATLAB 中常用的控制类工具箱	√			
7	python 中控制系统相关的包	√			

## 1.2 自动控制系统基本概念

在现代工业生产过程中,为了提高产品质量和生产效率,需要对生产设备和工艺过程进行控制,使被控的物理量按照期望的规律变化。这些被控制的设备或过程称为控制对象或对象,被控制的物理量称为被控制量或输出量。

在实际的条件下,生产设备或工艺过程有许多外部作用,一般只考虑对输出量影响最大的量,这些量称为输入量。

从对被控对象和输出量的影响来看,输入量可分为两种类型:一种输入的作用是为了保证对象的行为达到所要求的目标,这一类输入量称为控制量或给定量;另一种输入的作用则相反,它妨碍对象的行为达到目标,这类作用称为扰动作用,这种输入量称为扰动量。

控制的任务实际上就是形成控制作用的变化规律,使得不管是否存在扰动对象都能得到所期望的行为。

所谓自动控制系统,就是指在无人直接操作或干预的条件下,通过控制器使控制对象自动地按照给定的规律运行,使被控量能够按照给定的规律变化。系统是指为完成一定要求和任务的部件或功能的组合,它们相互影响,协调地完成给定的要求和任务。能够实现自动控制的系统称为自动控制系统。

### 1.2.1 开环控制系统与闭环控制系统

如果控制系统的输出量对系统没有控制作用,则这种系统称为开环控制系统。图 1.1 表示了开环控制系统输入量与输出量之间的关系。

这里,给定量直接经过控制器作用于控制对象,不需要将输出量反馈到输入端与给定量进行比较,所以只有给定量影响输出量。当出现外部扰动或内部扰动时,若没有人的干预,输出量将不能按照给定量所希望的状态去工作。

闭环控制系统是把输出量检测出来,经过物理量的转换,再反馈到输入端与给定量进行比较(相减),并利用比较后的偏差信号,经过控制器或调节器对控制对象进行控制,抑制内部或外部扰动对输出量的影响,从而减小输出量的误差。图 1.2 表示了闭环控制系统输入量、输出量和反馈量之间的关系。

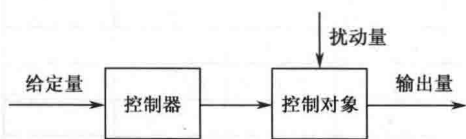


图 1.1 开环控制示意图

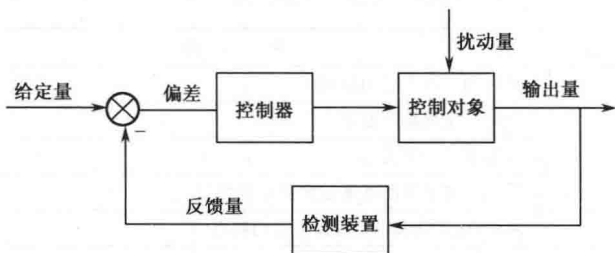


图 1.2 闭环控制示意图

这种系统把输出量直接或间接地反馈到输入端形成闭环,参与系统的控制,所以称为闭环控制系统。由于系统是根据负反馈原理按偏差进行控制的,因此也称为反馈系统或偏差控制系统。

在现代工业生产中,按照偏差控制的闭环系统种类繁多,尽管它们的控制任务不同,具体结构不完全相同,但是,检测偏差、利用偏差信号对控制对象进行控制,以减小或纠正输出量的偏差这一控制过程都是相同的。

这种系统的特点可归纳如下。

(1) 在开环系统中,只有输入量对输出量产生控制作用;从控制结构上看,只有从输入端到输出端、从左向右的信号传递通道(该通道称为正向通道)。在闭环控制系统中,除正向通道外,还必须有从右向左、从输出端到输入端的信号传递通道,使输出信号也参与控制作用,该通道称为反馈通道。闭环控制系统就是由正向通道和负反馈通道组成的。

(2) 为了检测偏差,必须直接或间接地检测输出量,并将其变换为与输入量相同的物理量,以便与给定量相比较,得出偏差信号,所以闭环系统必须有检测环节、给定环节和比较环节。

(3) 闭环控制系统是利用偏差量作为控制信号来纠正偏差的, 因此系统中必须具有执行纠正偏差这一任务的执行机构。闭环系统正是靠放大的偏差信号来推动执行机构, 进一步对控制对象进行控制的。只要输出量与给定量之间存在偏差, 就自动纠正输出量与期望值之间的误差, 因此可以构成精确的控制系统。

反馈控制系统广泛地应用于各个工业部门, 如加热炉的温度控制、机器手的控制等。

在有些系统中, 将开环控制和闭环控制结合在一起, 构成一个开环-闭环控制系统, 这种系统称为复合控制系统。

本书中提到的自动控制系统主要是指闭环控制系统。

## 1.2.2 闭环控制系统组成结构

闭环控制系统有各种不同的形式, 但是概括起来, 一般均由以下基本环节组成, 如图 1.3 所示。

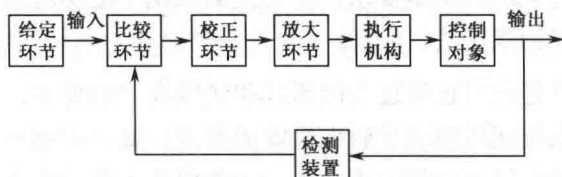


图 1.3 闭环控制系统结构图

(1) 给定环节: 它是设定被控制量的给定值的装置, 如电位器等, 给定环节的精度对被控制量的控制精度有较大的影响, 现代的系统一般采用控制精度高的数字给定装置。

(2) 比较环节: 比较环节将所检测的被控制量和给定量进行比较, 确定两者之间的偏差量。该偏差量由于功率较小或者物理性质不同, 还不能直接作用于执行机构, 所以在执行机构与比较环节之间还有中间环节。

(3) 中间环节: 中间环节一般是放大元件, 将偏差信号变换成适于控制执行机构工作的信号。根据控制的要求, 中间环节可以是一个简单的功率放大环节, 或者是将偏差信号变换为适于执行结构工作的物理量, 如液压伺服放大器。常常除了要求中间环节将偏差信号放大以外, 还希望它能按某种规律对偏差信号进行运算, 用运算的结构控制执行机构, 以改善被控制量的稳态和暂态性能, 这种中间环节常称为校正环节。

(4) 执行机构: 一般由传动装置和调节机构组成, 执行机构直接作用于控制对象, 使被控制量达到所要求的数值。

(5) 控制对象或调节对象: 它是指要进行控制的设备或过程, 相应地, 控制系统所控制的某个物理量就是系统的输出量或被控量, 闭环控制系统的任务就是控制这些系统输出量的变化规律, 以满足生产工艺的要求。

(6) 检测装置或传感器: 用于检测被控制量, 并将其转换为与给定量统一的物理量。检测装置的精度和特性直接影响控制系统的控制品质, 它是构成自动控制系统的关键元件, 所以一般应要求检测装置的测量精度高、反应灵敏、性能稳定等。

在控制系统中,通常把比较环节、校正环节和放大环节合在一起称为控制装置。

### 1.2.3 反馈控制系统品质要求

在反馈控制系统中,当扰动量或给定量(或给定量的变化规律)发生变化时,被控量偏离了给定量(或给定量的变化规律)而产生偏差,通过反馈控制的作用,经过短暂的过渡过程,被控量又趋于或恢复到原来的稳态值,或按照新的给定量(或给定量的变化规律)稳定下来,这时系统从原来的平衡状态过渡到新的平衡状态。我们把被控量处于变化状态的过程称为动态或暂态,而把被控量处于相对稳定的状态称为静态或稳态。

反馈控制系统品质要求可以归结为稳定性(长期稳定性)、快速性(相对稳定性)和准确性(精度)。

(1) 稳定性。稳定性对于不同的系统有不同的要求。对于恒值系统,要求当系统受到扰动后,经过一定时间的调整能够回到原来的期望值;对于随动系统,要求被控制量始终跟踪参量的变化。稳定性是对系统的基本要求,不稳定的系统不能实现预定任务。稳定性通常由系统的结构决定,与外界因素无关。

(2) 快速性。快速性是指对过渡过程的形式和快慢提出的要求,一般称为动态性能或暂态性能。一个自动控制系统还应能满足暂态性能的要求。如果控制对象的惯性很大,系统的反馈又不及时,则被控量在暂态过程中将产生过大的偏差,到达稳态的时间加长,并呈现各种不同的暂态过程。

一般来说,在合理的结构和适当的系统参数下,一个系统的暂态过程多属于衰减振荡过程,即被控量变化很快并产生超调,经过几个振荡后,达到新的稳定工作状态。为了满足生产工艺的要求,往往要求系统的暂态过程不仅是稳定的,并且进行得越快越好,振荡程度越小越好。前者是暂态过程的稳定性问题,后者是暂态过程的性能问题。这些都是设计闭环控制系统时必须研究的问题。

(3) 准确性。准确性通常用稳态误差来表示,所谓稳态误差是指系统达到稳态时,输出量的实际值和期望值之间的误差。这一性能表示稳态时的控制精度,一个设计合理的自动控制系统其稳态特性应能满足工艺的要求。

在参考输入信号作用下,当系统达到稳态后,其稳态输出与参考输入所要求的期望输出之差称为给定稳态误差。显然,这种误差越小,表示系统的输出跟随参考输入的精度越高。

一个闭环控制系统往往在满足稳态精度和暂态品质之间存在着矛盾,例如,要求稳态精度高,往往不能得到很好的暂态性能,因此必须兼顾这两方面的要求,根据具体情况合理解决。

## 1.3 自动控制系统分类

自动控制系统广泛应用于各类工业部门。随着生产规模的不断扩大和生产能力的不断提高,以及自动化技术和控制理论的发展,自动控制系统也日益复杂和日趋完善。例如,由单输入单输出的控制系统发展为多输入多输出的系统;由具有常规控制仪表和控制器的连续控

制系统,发展到由计算机作为控制器的直接数字控制系统,从而实现最优控制。由于各式各样自动控制系统的不断发展,很难确切地对自动控制系统进行分类。现将常见的几种自动控制系统概括介绍如下。

### 1.3.1 线性系统和非线性系统

按不同系统的特征方程式,可将自动控制系统分为线性系统和非线性系统。

线性系统是由线性元件组成的系统,该系统的特征方程式可以用线性微分方程描述。叠加性和齐次性是鉴别系统是否为线性系统的根据。线性微分方程的各项系数为常数时,称为线性定常系统。线性定常系统可以用拉普拉斯变换解微分方程,并由此定义出系统传递函数这一系统动态数学模型。根轨迹法和频率法就是在这—基础上发展起来的分析和设计线性系统的有效方法。多输入多输出系统所采用的状态空间、传递矩阵等分析方法,将在有关章节中论述。

如果系统微分方程的系数与自变量有关,则为非线性微分方程,由非线性微分方程描述的系统称为非线性系统。在自动控制系统中,即使只含一个非线性环节,这一系统也是非线性的。

对于非线性系统的理论与研究远不如线性系统那样完整,一般只能满足于近似的定性描述和数值计算。任何物理系统的特性,精确地说都是非线性的,但在误差允许范围内,可以将非线性特性线性化,近似地用线性微分方程来描述,这样就可以按照线性系统来处理。

非线性系统的暂态特性与其初始条件有关,从这一点来看,它与线性系统有很大的区别。例如,当偏差的初始值很小时,系统的暂态过程是稳定的,而当偏差量的初值较大时,则可能不稳定。线性系统的暂态过程与初始条件无关。

### 1.3.2 离散系统和连续系统

从数学模型角度而言,连续系统各部分信号均以模拟的连续函数形式表示,以前的大部分闭环系统都属于连续系统。

从数学模型角度而言,离散系统的某—处或几处信号是以脉冲序列或数字形式表示的,目前的计算机控制系统都属于离散系统。

离散系统的主要特点是:在系统中使用脉冲开关或采样开关,将连续信号转变为离散信号。通常对以离散信号取脉冲形式的系统,称为脉冲控制系统;而对于采样数字计算机或数字控制器,其离散信号以数字形式传递的系统称为采样数字控制系统。图 1.4 是典型的采样数字控制系统结构示意图。

由于被控对象的输入量和输出量是模拟信号,而计算机的输入量和输出量是数字信号,所以要有将模拟量转换为数字量的模/数转换(A/D)装置和把数字量转换为模拟量的数/模转换(D/A)装置。

研究离散系统的方法和研究连续系统的方法类似。



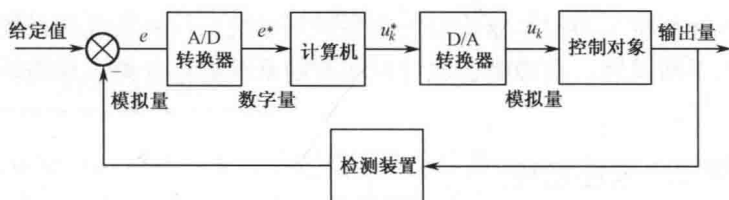


图 1.4 典型的采样数字控制系统结构

### 1.3.3 恒值系统和随动系统

在现代生产应用中使用最多的闭环自动控制系统，按给定量的不同特征，可将系统分为恒值系统和随动系统。

恒值系统往往要求被控制量保持在恒定值，其给定量是不变的，如恒温、恒速、恒压等自动控制系统。

在随动系统中，给定量是按照事先不知道的时间函数变化，要求输出量跟随给定量的变化而变化，因此也称为同步随动系统，如自动火炮的控制系统。

## 1.4 控制系统仿真基本概念

系统仿真作为一种特殊的试验技术，在 20 世纪 30~90 年代的半个多世纪中经历了飞速发展，到今天已经发展成为一种真正的、系统的实验科学。伴随着计算机的诞生和以相似理论为基础的模拟技术的应用，仿真作为一种研究、发展新产品、新技术的科学手段，在航空、航天、造船、兵器等与国防科研相关的行业中首先发展起来，并产生了巨大的社会效益和经济效益。当今，随着科学技术的迅猛发展，仿真已成为各种复杂系统研制工作的一种必不可少的手段，在控制、航空、航天、通信、物流、交通等领域有着广泛的应用。

以武器的作战使用训练为例，1930 年前后，美国陆、海军航空队就使用了林肯式仪表飞行模拟训练器。当时其经济效益相当于每年节约 1.3 亿美元，而且少牺牲 524 名飞行员，此后，固定基座及三自由度飞行模拟座舱陆续大量投入使用。1950~1953 年，美国首先利用计算机来模拟战争，防空兵力或地空作战被认为是具有最大训练潜力的应用范畴。20 世纪 60 年代，目标探测、捕获、跟踪和电子对抗已经进入了仿真系统。70 年代利用放电影方式，在大球幕内实现了多目标、飞机-导弹作战演习。随着 80 年代数字计算机的高速发展，训练仿真开始蓬勃发展，甚至呈现了两个新概念，即武器系统研制与训练装置的开发同步进行，以及训练装置作为武器系统可嵌入的组成部分而进入整个计算机软件系统。至于武器的控制与制导 (C&G) 系统研制、试验与定型中仿真技术的应用则更为普遍。在 80 年代对于导弹的研制中，由于采用仿真使飞行试验数量减小了 30%~40%，节约研制经费 10%~40%，缩短周期 30%~60%，这足以说明系统仿真在工程应用中的重大意义。

仿真的基本思想是利用物理的或数学的模型来类比模仿现实过程，以寻求对真实过程的认识，它所遵循的基本原则是相似性原理。