

高等学校规划教材

自动控制原理

孙德宝 主 编
王永骥 副主编
王金城



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校规划教材

自动控制原理

孙德宝 主 编
王永骥 副主编
王金城

化学工业出版社

教材出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/孙德宝主编. —北京:化学工业出版社, 2002. 7
高等学校规划教材
ISBN 7-5025-3633-7

I. 自… II. 孙… III. 自动控制理论-高等学校-教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 042016 号

高等学校规划教材

自动控制原理

孙德宝 主 编

王永骥 副主编

王金城

责任编辑:唐旭华

责任校对:蒋 宇

封面设计:潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 27¼ 字数 678 千字

2002 年 7 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 2 次印刷

ISBN 7-5025-3633-7/G·974

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

控制工程是一个涉及多学科的科目，它已经在大多数的工科课程中占据了核心地位。

回顾自动控制理论的发展，可以看到，它是在生产实际的需要中发展起来的。20 世纪 40 年代到 50 年代形成的经典控制理论，主要以频域方法和根轨迹方法为基础，较好地解决了简单控制系统的分析和设计，其中形成的 PID 控制方法，至今仍在广泛应用。20 世纪 60 年代，为了解决航空航天中的复杂控制问题，采用了数字计算机这一强大的工具，形成了现代控制理论。随着微电子技术的迅速发展，现代控制理论得到了越来越广泛的应用，但是，现代控制理论不能完全代替经典控制理论，需根据不同情况加以选用。

自动控制的应用范围已经扩展到工程领域以外的诸多领域，如社会，经济，金融，生命科学等等。中国人口计划生育政策的成功运用，1998 年长江流域特大洪水的控制，可以说是控制理论成功应用的典型范例。

从自动控制的发展历史看，自动控制理论所研究的问题已经从单输入单输出的较为简单的系统扩展到多输入多输出、并且存在干扰噪声的系统，处理问题的方法近年来包括基于大系统理论的控制方法以及吸收人的经验智慧的智能方法。尽管如此，掌握自动控制的基本理论仍是十分重要的。

本书内容包括自动控制理论的基本概念和若干应用，主要以经典控制理论为主。其中，第 1 章主要介绍了自动控制的基本概念、基本分类，对自动控制系统的基本要求和自动控制理论的发展历史。第 3 章以大量机械、电气系统等实际对象为例，介绍了建立控制系统数学模型的方法。第 3 章到第 6 章对线性定常控制系统，介绍了时域分析法、根轨迹法、频域分析法以及校正和设计方法。其中第 3 章讨论了二阶系统的时域响应和相应的性能指标，以及用于稳定性分析的劳斯判据；第 4 章介绍了根轨迹的原理，作图方法和基于根轨迹的系统分析；第 5 章介绍了控制系统分析的频域方法，讨论了基于极坐标的奈奎斯特图和基于对数坐标的频率特性图的绘制及其在系统性能分析和稳定性分析中的应用；第 6 章对单输入单输出线性定常系统，介绍了基于根轨迹和频域方法的控制系统校正和设计方法；第 7 章对线性离散系统的理论及其应用，在基本概念、数学模型、动态性能及数字校正方面，进行详细的讨论。第 8 章中，主要讨论了描述函数法、相平面方法等常用的非线性系统分析方法。第 9 章为现代控制理论部分，主要介绍了状态空间模型的建立、可控性和可观性，基于状态空间模型的控制系统设计方法——极点配置和观测器设计，和李雅普诺夫稳定性理论。

鉴于一个系统不可避免地存在扰动和不确定因素，这种情况下系统的稳定性等问题属于系统鲁棒性讨论的范畴，因此，本书的第 10 章介绍了鲁棒控制的一些基本概念和基本方法，包括区间参数稳定性，频域和时域的鲁棒稳定性等。鲁棒控制的内容可以根据各个学校的具体情况作为选修内容。

近年来，Matlab 在理工科的教学中得到越来越广泛的应用。特别值得指出的是，Matlab 环境及其提供的若干工具箱，给自动控制系统的设计带来了极大的便利。本书的一个重要特点是，结合自动控制理论的基本概念的讲解，应用了 Matlab 及控制系统工具箱

进行计算机辅助教学。为了帮助读者学习，本书的附录部分介绍了 Matlab 的一些基本知识，讨论了 Matlab 在控制系统分析中的应用等，并且以表格形式，介绍了 Matlab 控制系统工具箱的函数。

本书的主要内容已经制作成用于多媒体教学的 powerpoint 课件，需要者可与出版社取得联系。

本书由华中科技大学孙德宝教授主编，华中科技大学王永骥教授和大连理工大学王金城副教授为副主编。各章编者为：王永骥（第 1、9 章，附录），王金城、孟华（第 2、3 章），王敏（第 4、5、6 章），孙德宝（第 7、8 章），以及方华京（第 10 章）。

对于本书中存在的错误和不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

编 者

2002 年 3 月

目 录

1 控制系统导论	1
1.1 自动控制的基本原理	1
1.1.1 一个实例	1
1.1.2 控制系统方框图	2
1.2 自动控制系统的分类	3
1.2.1 按信号的传递路径来分	3
1.2.2 按系统输入信号的变化规律不同来分	4
1.2.3 按系统传输信号的性质来分	5
1.2.4 按描述系统的数学模型不同来分	5
1.2.5 其他分类方法	6
1.3 对控制系统的基本要求	6
1.4 自动控制的发展简史	8
1.4.1 经典控制理论阶段	8
1.4.2 现代控制理论阶段	9
1.4.3 大系统控制理论阶段	9
1.4.4 智能控制阶段	10
本章小结	10
习题 1	11
2 控制系统数学模型	13
2.1 导论	13
2.2 控制系统的微分方程	14
2.2.1 微分方程式的建立	14
2.2.2 非线性方程的线性化	21
2.3 控制系统的传递函数	24
2.3.1 传递函数的概念	25
2.3.2 传递函数的性质	26
2.3.3 典型环节及其传递函数	27
2.4 控制系统结构图与信号流图	30
2.4.1 控制系统的结构图	30
2.4.2 控制系统的信号流图	39
2.4.3 控制系统的传递函数	43
2.5 应用 Matlab 控制系统仿真	45
2.5.1 举例	46
2.5.2 传递函数	48
2.5.3 结构图模型	48

本章小结	52
习题 2	53
3 控制系统的时域分析法	58
3.1 二阶系统的瞬态响应及性能指标	58
3.1.1 典型输入信号	59
3.1.2 系统的性能指标	60
3.1.3 瞬态响应分析	61
3.1.4 线性定常系统的重要特性	67
3.2 增加零极点对二阶系统响应的影响	68
3.3 反馈控制系统的稳态误差	72
3.3.1 稳态误差的概念	72
3.3.2 稳态误差的计算	73
3.3.3 主扰动输入引起的稳态误差	75
3.3.4 关于降低稳态误差问题	76
3.4 劳斯-赫尔维茨稳定性判据	77
3.4.1 稳定性的概念	78
3.4.2 劳斯判据	80
3.4.3 赫尔维茨判据	87
3.5 控制系统灵敏度分析	89
3.6 应用 Matlab 分析控制系统的性能	91
本章小结	96
习题 3	97
4 根轨迹法	102
4.1 根轨迹的基本概念	102
4.2 绘制根轨迹的基本规则	104
4.3 控制系统根轨迹的绘制	109
4.4 广义根轨迹	114
4.4.1 以非 K^* 为变参数的根轨迹	114
4.4.2 正反馈系统的根轨迹	116
4.4.3 非最小相位系统的根轨迹	117
4.5 线性系统的根轨迹分析方法	120
4.5.1 主导极点的概念	120
4.5.2 增加开环零点对根轨迹的影响	123
4.6 利用 Matlab 绘制系统的根轨迹	125
本章小结	128
习题 4	128
5 线性系统的频域分析	131
5.1 频率特性的概念	131
5.2 开环系统频率特性的图形表示	134
5.2.1 幅相频率特性曲线	134

5.2.2 对数频率特性曲线	143
5.3 奈奎斯特稳定判据	152
5.3.1 奈奎斯特稳定判据的数学基础	152
5.3.2 奈奎斯特稳定判据	154
5.4 控制系统的相对稳定性	157
5.4.1 相对稳定性	158
5.4.2 稳定裕度的求取	159
5.5 闭环频率特性	162
5.5.1 闭环频率特性的图形表示	162
5.5.2 闭环系统的频域性能指标	168
5.6 Matlab 在频率分析中的应用	172
本章小结	176
习题 5	177
6 线性系统的校正方法	181
6.1 校正与综合的概念	181
6.1.1 校正的基本方式	182
6.1.2 基本控制规律	183
6.2 常用校正装置及其特性	185
6.2.1 无源校正装置	186
6.2.2 有源校正装置	191
6.3 串联校正	192
6.3.1 串联超前校正	192
6.3.2 串联滞后校正	194
6.3.3 串联滞后-超前校正	196
6.3.4 期望频率特性法校正	198
6.4 反馈校正	202
6.5 Matlab 在系统校正中的应用	204
本章小结	207
习题 6	208
7 线性离散控制系统	212
7.1 引言	212
7.1.1 直接数字控制系统(DDC —— Direct Digital Control)	212
7.1.2 计算机监督控制系统(SCC —— Surveillance Computer Control System)	212
7.1.3 集散控制系统(TDC —— Total and Distributed Control)	213
7.2 采样过程的数学描述	214
7.2.1 采样过程及其数学描述	214
7.2.2 采样定理	216
7.2.3 采样周期的选择	217
7.3 信号恢复	218
7.3.1 零阶保持器	218

7.3.2 一阶保持器	219
7.4 Z变换理论	221
7.4.1 Z变换	221
7.4.2 Z变换的性质	223
7.4.3 Z反变换	224
7.5 采样系统的数学模型	226
7.5.1 描述离散控制系统的线性差分方程	226
7.5.2 脉冲传递函数	228
7.6 离散控制系统分析	235
7.6.1 线性离散控制系统的稳定性分析	235
7.6.2 离散控制系统的瞬态响应	241
7.6.3 离散控制系统的稳态误差	243
7.7 数字控制器的设计	245
7.7.1 无稳态误差最少拍系统的设计	246
7.7.2 $G(z)$ 具有单位圆上和单位圆外零极点的情况, 数字控制器的设计	250
7.7.3 无纹波无稳态误差最少拍系统的设计	251
7.8 Matlab 在离散系统中应用	253
本章小结	257
习题 7	257
8 非线性系统理论	262
8.1 引言	262
8.1.1 非线性系统特点	262
8.1.2 研究非线性系统的意义与方法	264
8.2 典型非线性特性的数学描述及其对系统性能的影响	265
8.2.1 饱和特性	265
8.2.2 死区特性	265
8.2.3 间隙特性	265
8.2.4 继电特性	266
8.3 描述函数法	267
8.3.1 描述函数的概念	267
8.3.2 典型非线性的描述函数	268
8.3.3 多重非线性的描述函数	273
8.3.4 用描述函数法分析非线性系统	275
8.4 相平面法	279
8.4.1 相轨迹及其绘制方法	279
8.4.2 奇点与极限环	280
8.4.3 用相平面法分析非线性系统	285
本章小结	288
习题 8	288
9 状态空间分析与综合	293

9.1 引言	293
9.2 状态空间和状态方程	293
9.2.1 状态空间方法的几个基本概念	293
9.2.2 几个示例	294
9.3 线性系统状态空间表达式的建立	296
9.3.1 高阶微分方程到状态空间描述	296
9.3.2 将传递函数转换成状态空间描述	299
9.3.3 由状态变量图求系统的状态空间描述	301
9.3.4 状态空间描述与传递函数描述的关系	304
9.3.5 状态变量的非惟一性	308
9.3.6 系统矩阵 A 的特征方程和特征值	309
9.3.7 利用 Matlab 进行系统模型之间的相互转换	309
9.4 线性定常系统连续状态方程的解	312
9.4.1 线性系统状态方程的解	313
9.4.2 状态转移矩阵	313
9.4.3 向量矩阵分析中的若干结果	314
9.4.4 矩阵指数函数 e^{At} 的计算	315
9.4.5 线性离散系统状态空间表达式的建立及其解	319
9.5 线性定常系统的可控性与可观测性分析	322
9.5.1 线性连续系统的可控性	323
9.5.2 线性定常连续系统的可观测性	325
9.5.3 对偶原理	327
9.5.4 单输入/单输出系统状态空间描述的标准形	328
9.5.5 基于系统标准形的可控可观判据	330
9.5.6 离散系统的可控性和可观测性判据	334
9.5.7 用 Matlab 判断系统的可控性和可观测性	334
9.6 线性定常系统的状态反馈和状态观测器	335
9.6.1 状态反馈与极点配置	336
9.6.2 输出反馈与极点配置	343
9.6.3 状态观测器	344
9.7 李雅普诺夫稳定性分析	366
9.7.1 李雅普诺夫意义下的稳定性问题	366
9.7.2 李雅普诺夫稳定性理论	369
本章小结	380
习题 9	381
10 鲁棒控制系统	391
10.1 鲁棒性的基本概念	391
10.2 参数不确定系统的稳定鲁棒性	391
10.2.1 使用劳斯判据分析参数不确定系统的稳定区域	391
10.2.2 Kharitonov 定理	393

10.3 传递函数具有不确定性时的稳定鲁棒性..... 394

10.4 状态方程具有不确定性时的稳定鲁棒性..... 396

本章小结..... 399

习题 10 400

附录 Matlab 简介 401

 M.1 Matlab 的特点 401

 M.2 Matlab 的基本功能 402

 M.2.1 Matlab 的编程环境 402

 M.2.2 Matlab 的程序设计基础 403

 M.3 Matlab 控制系统工具箱简介 412

 M.3.1 线性系统的数学模型..... 412

 M.3.2 Matlab 控制系统工具箱函数介绍 415

 M.3.3 使用 Matlab 符号运算工具箱进行拉氏变换 420

参考文献..... 424

1 控制系统导论

本章将讨论自动控制的基本概念、自动控制系统的分类、对控制系统的基本要求、自动控制的历史等问题。

1.1 自动控制的基本原理

当前,自动控制作为一种技术手段已经广泛地应用于工业、农业、国防乃至日常生活和社会科学许多领域。例如,数控车床按照预先编制好的程序加工部件,雷达自动跟踪空中的飞行体,洗衣机、微波炉等家用电器等等,所有这些都离不开自动控制技术。

自动控制技术的广泛应用,不仅可以改善工作条件,减少劳动强度和提高生产效率,而且在人类征服自然、探知未来、建设高度文明的新社会等方面有着重要的意义。随着 21 世纪的到来,经济以及科技、国防事业的发展和人们生活水平的提高,自动控制技术所起的作用越来越重要,自动控制技术本身也将会得到进一步发展。作为一个工程技术人员,了解掌握自动控制方面的知识是十分必要的。

所谓自动控制就是指在脱离人的直接干预,利用控制装置(简称控制器)使被控对象(如设备生产过程等)的工作状态或简称被控量(如温度、压力、流量、速度、pH 值等)按照预定的规律运行。实现上述控制目的,由相互制约的各部分按一定规律组成的具有特定功能的整体称为自动控制系统。

从物理角度上来看,自动控制理论研究的是特定激励作用下的系统响应变化情况;从数学角度上来看,研究的是输入与输出之间的映射关系;从信息处理的角度来看,研究的是信息的获取、处理、变换、输出等问题。

一个具体的工程控制系统常常要用到多方面的部件,如机械的、电气的、电子的、液压的、气动的以及它们的组合部件。它从不同的领域汲取知识,把原来看起来似乎相互独立的学科汇集起来,去解决共同的问题,因此,从事控制领域工作的人,要努力掌握多方面的知识,如各种装置的原理和特性,以及由这些装置组合而成的一个控制系统的设计、分析、改造等。

随着科学技术的进步,自动控制的概念也在扩大,人们已赋予它更广泛、更深远的意义。政治、经济、社会等各个领域也越来越多地被认为与自动控制有关。现在已发展成为一门独立的学科——控制论。其中包括:工程控制论、生物控制论和经济控制论。中国人口计划生育政策的成功运用,1998 年长江流域特大洪水的控制,可以说是控制理论成功应用的典型范例。从这个意义上来说,自动控制理论的应用几乎是无限的。

为了说明自动控制系统的基本概念,下面以一个电气工程中常见的电动机速度控制系统为例。

1.1.1 一个实例

直流电动机速度自动控制的原理结构图如图 1-1 所示。图中,电位器电压为输入信号。电位器动点的位置一定,电动机速度就有一定值,故电位器电压的变化称为参考输入或给定值输入。测速发电机是电动机转速的测量元件,又称为变送元件(变送器)。图 1-1 中,代

表电动机转速变化的测速发电机电压送到输入端与电位器电压进行比较，两者的差值（又称偏差信号）控制功率放大器（控制器），控制器的输出控制电动机的转速，这就形成了电动机转速自动控制系统。

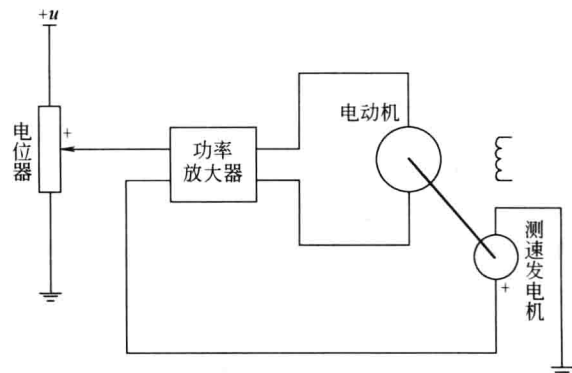


图 1-1 直流电动机速度自动控制的原理结构图

当电源变化、负载变化等引起转速变化，称为扰动。电动机称为被控对象，转速称为被控量，当电动机受到扰动后，转速（被控量）发生变化，经测量元件（测速发电机）将转速信号（又称为反馈信号）反馈到控制器（功率放大器），使控制器的输出（称为控制量）发生相应的变化，从而可以自动地保持转速不变或使偏差保持在允许的范围内，也即使被控量自动地保持为给定值或在给定值附近的一个很小的允许范围内变动。

如果在图 1-1 中，取消测速发电机及其反馈回路，电动机的转速由人工监测，当转速偏离给定时，由人工去改变电位器的动点，改变放大器的输出，从而改变电动机的电枢电压，改变电动机的转速，使之恢复到转速的给定值。这样，电动机的转速控制就成人工控制系统。

1.1.2 控制系统方框图

从上例可以看出，自动控制系统至少包括测量、变送元件、控制器等组成的自动控制装置和被控对象，它的组成方框图如图 1-2 所示。在图 1-2 中，当被控对象受到扰动时，被控对象的输出量（被控量）就要发生变化，被控量 y 的变化值经过测量、变送元件测量与变换成电量后送入比较元件与给定值 r 进行比较，产生了偏差值 $e = r - y$ 。偏差信号 e 送入控制器，在控制器中进行控制规律的运算后，输出控制信号 u ，控制量 u 再作用到被控对象，使被控对象的被控量 y 恢复到给定值。

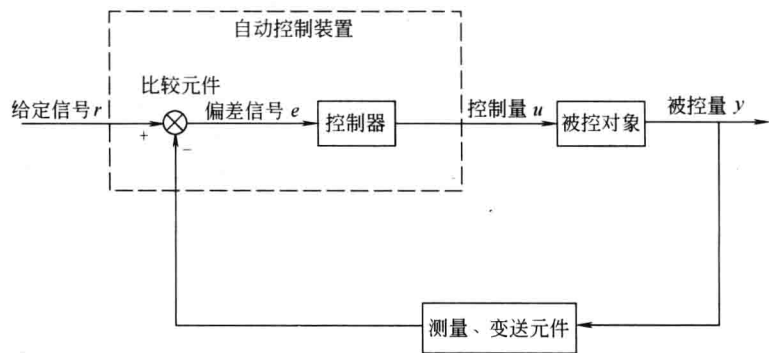


图 1-2 自动控制系统的组成框图

1.2 自动控制系统的分类

自动控制系统应用范围很广，种类繁多，名称上也很不一致，下面介绍几种常用的分类方法。

1.2.1 按信号的传递路径来分

(1) 开环控制系统

指系统的输出端与输入端不存在反馈回路，输出量对系统的控制作用不发生影响的系统。如工业上使用的数字程序控制机床，参见图 1-3。

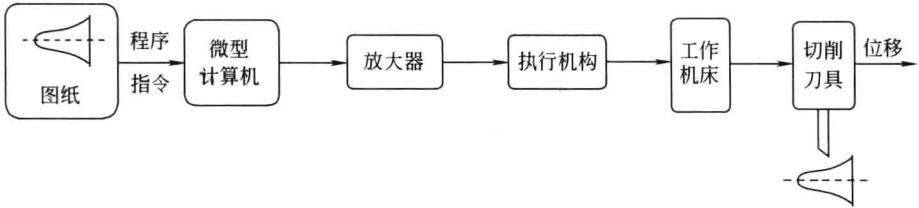


图 1-3 微型计算机控制机床（开环系统）

其工作过程是根据加工图纸的要求，确定加工过程，编制程序指令，输入到微型计算机，微机完成对控制脉冲的寄存、交换和计算，并输出控制脉冲给执行机构，驱动机床运动，完成程序指令的要求。这里用的执行机构一般是步进电机。这样的系统每一个输入信号，必有一个固定的工作状态和一个系统的输出量与之相对应，但是不具有修正由于扰动而出现的被控量希望值与实际值之间误差的能力。例如，执行机构步进电机出现失步，机床某部分未能准确地执行程序指令的要求，切削刀具偏离了希望值，控制指令并不会相应地改变。

开环系统结构简单，成本低廉，工作稳定。在输入和扰动已知情况下，开环控制仍可取得比较满意的结果。但是，由于开环控制不能自动修正被控量的误差、系统元件参数的变化以及外来未知干扰对系统精度的影响，所以为了获得高质量的输出，就必须选用高质量的元件，其结果必须导致投资大、成本高。

开环控制的实例还有很多，如交通系统的传统红绿灯切换控制，洗衣机控制等。

(2) 闭环控制系统

凡是系统输出信号与输入端之间存在反馈回路的系统，叫闭环控制系统。闭环控制系统也叫反馈控制系统。“闭环”这个术语的含义，就是应用反馈作用来减小系统误差。现在将图 1-3 稍加改进就构成了一个闭环控制系统，如图 1-4 所示。

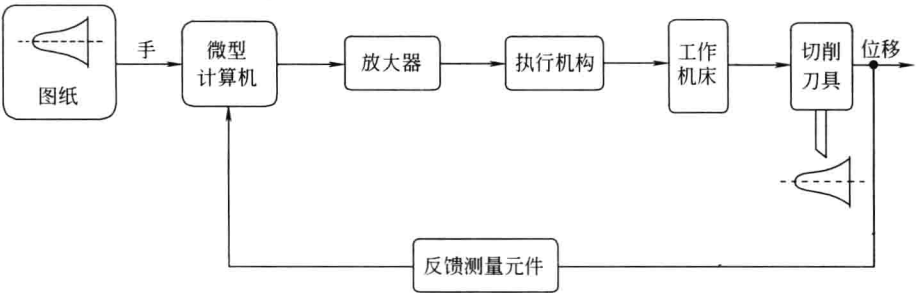


图 1-4 微型计算机控制机床（闭环系统）

在图 1-4 中，引入了反馈测量元件，它把切削刀具的实际位置不停地送给计算机，与根据图纸编制的程序指令相比较。经计算机处理后发出控制信号，再经放大后驱动执行机构，带动机床上的刀具按计算机给出的信号运行，从而实现自动控制的目的。

闭环控制系统由于有“反馈”作用的存在，具有自动修正被控量出现偏差的能力，可以修正元件参数变化及外界扰动引起的误差，所以其控制效果好，精度高。其实，只有按负反馈原理组成的闭环控制系统才能真正实现自动控制的任務。闭环控制系统也有不足之处，除了结构复杂，成本较高外，一个主要的问题是由于反馈的存在，控制系统可能出现“振荡”。严重时，会使系统失去稳定而无法工作。在自动控制系统的研究中，一个很重要的问题是如何解决好“振荡”或“发散”问题。

(3) 复合控制系统

复合控制是闭环控制和开环控制相结合的一种方式。它是在闭环控制的基础上增加一个干扰信号的补偿控制，以提高控制系统的抗干扰能力。复合控制的系统框图见图 1-5。

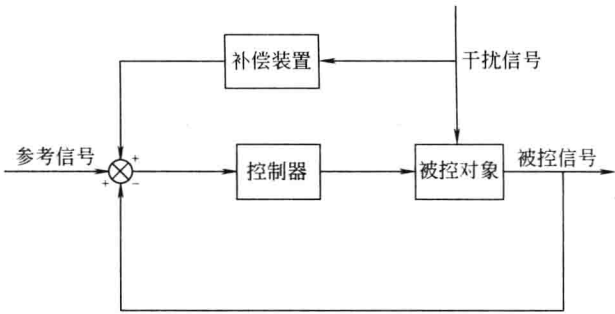


图 1-5 复合控制系统框图

增加干扰信号的补偿控制作用，可以在干扰对被控量产生不利影响的同时及时提供控制作用以抵消此不利影响。纯闭环控制则要等待该不利影响反映到被控量之后才引起控制作用，对干扰的反应较慢；但如果没有反馈信号回路，只按干扰进行补偿控制时，则只有顺馈控制作用，控制方式相当于开环控制，被控量又不能得到精确控制。两者的结合既能得到高精度控制，又能提高抗干扰能力，因此获得广泛的应用。当然，采用这种复合控制的前提是干扰信号可以测量到。

1.2.2 按系统输入信号的变化规律不同来分

(1) 恒值控制系统（或称自动调节系统）

这类系统的特点是输入信号是一个恒定的数值。工业生产中的恒温、恒速等自动控制系统都属于这一类型。图 1-1 所示的系统就是一个恒速控制系统。

恒值控制系统主要研究各种干扰对系统输出的影响以及如何克服这些干扰，把输出量尽量保持在希望数值上。

(2) 程序控制系统

这类系统的特点是输入信号是一个已知的时间函数，系统的控制过程按预定的程序进行，要求被控量能迅速准确地复现给定量，如化工反应中的压力、温度、流量控制。图 1-3 中数字程序控制机床也属此类系统。

恒值控制系统可认为是程序控制系统的特例。

(3) 随动控制系统（或称伺服系统）

这类系统的特点是输入信号是一个未知函数，要求输出量跟随给定量变化。如火炮自动跟踪系统，人们事先不知道飞机的运动规律，当然也就无法驱动火炮瞄向一个确定的位置。这类系统要求火炮随飞机的运行变化轨迹，不断地自行修正位置。考虑到飞机的机动性，要求该系统有较好的跟踪能力。

工业自动化仪表中的显示记录仪，跟踪卫星的雷达天线控制系统等均属于随动控制系统。

1.2.3 按系统传输信号的性质来分

(1) 连续系统

系统各部分的信号都是模拟的连续函数。目前工业中普遍采用的常规控制仪表 PID 控制器控制的系统及图 1-1 所示的电动机速度自动控制系统就属于这一类型。

(2) 离散系统

系统的某一处或几处，信号以脉冲序列或数码的形式传递的控制系统。其主要特点是系统中用脉冲开关或采样开关，将连续信号转变为离散信号。若离散信号取脉冲的系统又叫脉冲控制系统。若离散信号以数码形式传递的系统，又叫采样数字控制系统或数字控制系统。如数字计算机控制系统就属于这一类型。

图 1-6 和图 1-7 分别给出了脉冲控制系统和数字控制系统的结构图。

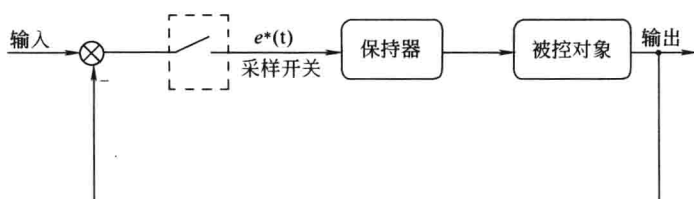


图 1-6 脉冲控制系统结构图

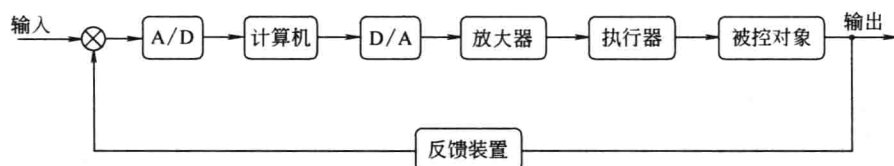


图 1-7 采样数字控制系统结构图

1.2.4 按描述系统的数学模型不同来分

(1) 线性系统

由线性元件构成的系统叫线性系统。其运动方程为线性微分方程。若各项系数为常数，则称为线性定常系统。其运动方程一般形式为

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 u^{(n)} + b_1 u^{(n-1)} + \cdots + b_{n-1} \dot{u} + b_n u$$

式中 $u(t)$ 为系统的输入量； $y(t)$ 为系统的输出量。

线性系统的主要特点是具有叠加性和齐次性，即当系统的输入分别为 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 时，对应的输出分别为 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ ，则当输入为 $u(t) = a_1 u_1(t) + a_2 u_2(t)$ 时，输出量为 $y(t) = a_1 y_1(t) + a_2 y_2(t)$ ，其中 a_1, a_2 为常数。

(2) 非线性系统

在构成系统的环节中有一个或一个以上的非线性环节时，则称此系统为非线性系统。典

型的非线性特性有饱和特性、死区特性、间隙特性、继电特性、磁滞特性等，如图 1-8 所示。

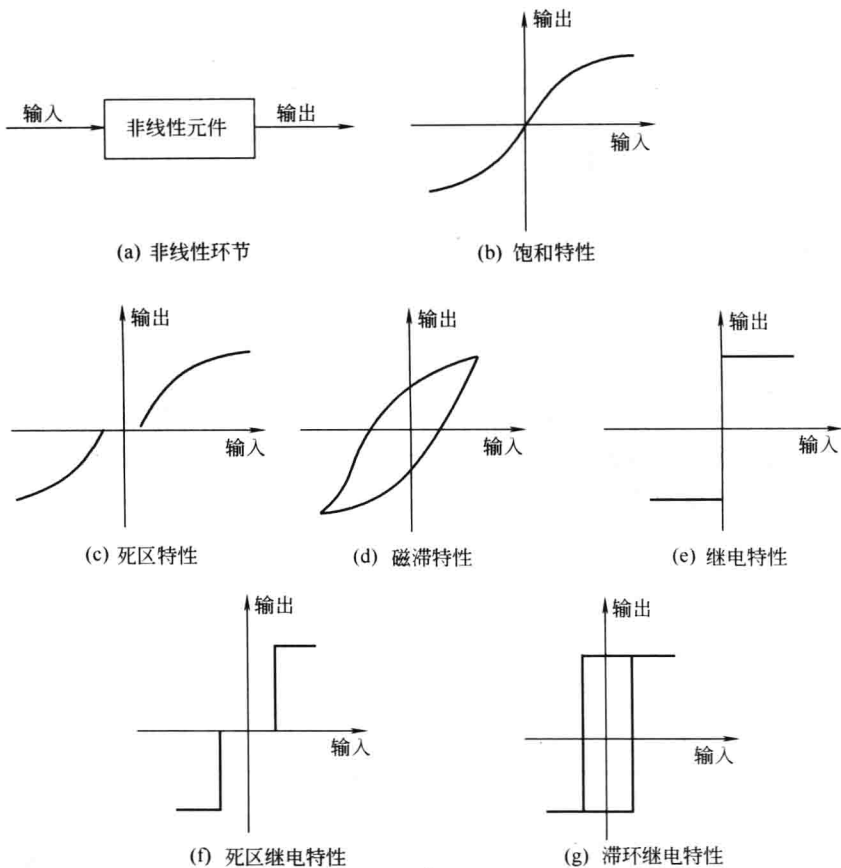


图 1-8 非线性元件静特性举例

非线性的理论研究远不如线性系统那么完整，一般只能近似的定性描述和数值计算。

在自然界中，严格来说，任何物理系统的特性都是非线性的。但是，为了研究问题的方便，许多系统在一定的条件下，一定的范围内，可以近似地看成为线性系统来加以分析研究，其误差往往在工业生产允许的范围之内。

1.2.5 其他分类方法

自动控制系统还有其他的分类方法，如按系统的输入/输出信号的数量来分，有单输入/单输出系统和多输入/多输出系统。按控制系统的功能来分，有温度控制系统、速度控制系统、位置控制系统等。按系统元件组成来分，有机电系统、液压系统、生物系统。按不同的控制理论分支设计的新型控制系统来分，有最优控制系统、自适应控制系统、预测控制系统、模糊控制系统、神经网络控制系统等等。然而，不管什么形式，不管什么控制方式的系统，都希望它能做到可靠，迅速，准确，这就是后续章节要详细分析的系统的稳定性、动态响应和稳态特性等。一个系统的性能将用特定的品质指标来衡量其优劣。

1.3 对控制系统的基本要求

当自动控制系统受到各种干扰（扰动）或者人为要求给定值（参考输入）发生改变时，