



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

第二版

王永骥 王金城 王敏 主编



化学工业出版社

TP13/224

2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

第二版

王永骥 王金城 王 敏 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书包括以下几个内容：系统的基本概念；物理系统建模；一阶、二阶系统时域分析；控制系统稳定性分析，控制系统的瞬态响应与稳态误差；分析控制系统的根轨迹法、频率法、状态空间法；控制系统的综合校正；控制系统的鲁棒性分析；控制系统能控性、能观性；控制系统的状态空间反馈和极点配置；离散控制系统分析与综合；非线性控制系统的基本特点及典型分析方法。本书本着循序渐进、启发思维、培养创新精神的原则，设计了许多有关新技术领域，如计算机、航天、航海、航空方面的例题、习题、思考题。

本书还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，通过例题、习题介绍 Matlab 在控制系统分析、综合及仿真中的应用。

本书可用作自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化等工科相关专业本科生的教材，亦可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/王永骥, 王金城, 王敏主编. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2007. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5025-8831-1

I. 自… II. ①王…②王…③王… 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 (2007) 第 115363 号

责任编辑: 唐旭华

文字编辑: 郝英华

责任校对: 周梦华

装帧设计: 潘 峰

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 24 $\frac{3}{4}$ 字数 679 千字 2007 年 9 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

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现在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。我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 2 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进行了介绍，包括时域分析法、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，已经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 章内容为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 章内容为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，给自动控制系统的分析和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，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电子课件，并将免费提供给采用本书作为教材的高等院校使用。如有需要可联系：txh@cip.com.cn。

本书是在第一版的基础上进行修订的，由华中科技大学王永骥教授、大连理工大学王金城教授、华中科技大学王敏教授主编。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），秦肖臻（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
2007年6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	2
1.2.1 按信号的传递路径来分	2
1.2.2 按系统输入信号的变化规律 来分	4
1.2.3 按系统传输信号的性质来分	4
1.2.4 按描述系统的数学模型来分	4
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	7
1.4.1 经典控制理论阶段	7
1.4.2 现代控制理论阶段	8
1.4.3 大系统控制理论阶段	8
1.4.4 智能控制阶段	9
本章小结	9
习题 1	10
2 控制系统数学模型	12
2.1 导论	12
2.2 控制系统的微分方程	13
2.2.1 微分方程式的建立	13
2.2.2 非线性方程的线性化	19
2.3 控制系统的传递函数	23
2.3.1 传递函数的概念	23
2.3.2 传递函数的性质	24
2.3.3 典型环节及其传递函数	25
2.4 控制系统结构图与信号流图	28
2.4.1 控制系统的结构图	28
2.4.2 控制系统的信号流图	36
2.4.3 控制系统的传递函数	40
2.5 应用 Matlab 控制系统仿真	42
2.5.1 举例	43
2.5.2 传递函数	44
2.5.3 结构图模型	45
本章小结	48
习题 2	48
3 控制系统的时域分析法	53
3.1 二阶系统的瞬态响应及性能指标	53
3.1.1 典型输入信号	54
3.1.2 系统的性能指标	55
3.1.3 瞬态响应分析	56
3.1.4 线性定常系统的重要特性	62
3.2 增加零极点对二阶系统响应的影响	63
3.3 反馈控制系统的稳态误差	66
3.3.1 稳态误差的概念	66
3.3.2 稳态误差的计算	67
3.3.3 主扰动输入引起的稳态误差	70
3.3.4 关于降低稳态误差问题	70
3.4 劳斯-赫尔维茨稳定性判据	72
3.4.1 稳定性的概念	72
3.4.2 劳斯判据	74
3.4.3 赫尔维茨判据	81
3.5 控制系统灵敏度分析	82
3.6 应用 Matlab 分析控制系统的性能	85
本章小结	89
习题 3	89
4 根轨迹法	93
4.1 根轨迹的基本概念	93
4.2 绘制根轨迹的基本规则	95
4.3 控制系统根轨迹的绘制	100
4.4 广义根轨迹	105
4.4.1 以非 K^* 为变参数的根轨迹	105
4.4.2 正反馈系统的根轨迹	107
4.4.3 非最小相位系统的根轨迹	108
4.5 线性系统的根轨迹分析方法	110
4.5.1 主导极点的概念	111
4.5.2 增加开环零极点对根轨迹的 影响	113
4.6 利用 Matlab 绘制系统的根轨迹	115
本章小结	118
习题 4	118
5 线性系统的频域分析	121
5.1 频率特性的概念	121
5.2 开环系统频率特性的图形表示	124
5.2.1 幅相频率特性曲线	124
5.2.2 对数频率特性曲线	132
5.3 奈奎斯特稳定判据	140
5.3.1 奈奎斯特稳定判据的数学基础	140
5.3.2 奈奎斯特稳定判据	142
5.4 控制系统的相对稳定性	145
5.4.1 相对稳定性	145
5.4.2 稳定裕度的求取	147

5.5 闭环频率特性	150	7.7 数字控制器的设计	225
5.5.1 闭环频率特性的图形表示	150	7.7.1 无稳态误差最少拍系统的设计	226
5.5.2 闭环系统的频域性能指标	155	7.7.2 $G(z)$ 具有单位圆上和单位圆外 零极点的情况时数字控制器的 设计	229
5.6 Matlab 在系统频域分析中的应用	160	7.7.3 无纹波无稳态误差最少拍系统的 设计	230
本章小结	164	7.8 Matlab 在离散系统中的应用	232
习题 5	164	本章小结	235
6 线性系统的校正方法	168	习题 7	235
6.1 校正与综合的概念	168	8 非线性系统理论	240
6.1.1 校正的基本方式	168	8.1 引言	240
6.1.2 基本控制规律	169	8.1.1 非线性系统特点	240
6.2 常用校正装置及其特性	172	8.1.2 研究非线性系统的意义与方法	242
6.2.1 无源校正装置	172	8.2 典型非线性特性的数学描述及其对 系统性能的影响	242
6.2.2 有源校正装置	177	8.2.1 饱和特性	243
6.3 串联校正	178	8.2.2 死区特性	243
6.3.1 串联超前校正	178	8.2.3 间隙特性	243
6.3.2 串联滞后校正	180	8.2.4 继电特性	244
6.3.3 串联滞后-超前校正	182	8.3 描述函数法	245
6.3.4 期望频率特性法校正	183	8.3.1 描述函数的概念	245
6.4 反馈校正	187	8.3.2 典型非线性的描述函数	246
6.5 Matlab 在系统校正中的应用	189	8.3.3 多重非线性的描述函数	251
本章小结	191	8.3.4 用描述函数法分析非线性系统	252
习题 6	192	8.4 相平面法	256
7 线性离散控制系统	195	8.4.1 相轨迹及其绘制方法	256
7.1 引言	195	8.4.2 奇点与极限环	257
7.1.1 直接数字控制系统	195	8.4.3 用相平面法分析非线性系统	261
7.1.2 计算机监督控制系统	195	本章小结	264
7.1.3 集散控制系统	196	习题 8	264
7.2 采样过程的数学描述	197	9 状态空间分析与综合	268
7.2.1 采样过程及其数学描述	197	9.1 引言	268
7.2.2 采样定理	199	9.2 状态空间和状态方程	268
7.2.3 采样周期的选择	200	9.2.1 状态空间方法的几个基本概念	268
7.3 信号保持	201	9.2.2 几个示例	269
7.3.1 零阶保持器	201	9.3 线性系统状态空间表达式的建立	271
7.3.2 一阶保持器	202	9.3.1 高阶微分方程到状态空间描述	271
7.4 Z 变换理论	204	9.3.2 将传递函数转换成状态空间 描述	273
7.4.1 Z 变换	204	9.3.3 由状态变量图求系统的状态 空间描述	275
7.4.2 Z 变换的性质	205	9.3.4 状态空间描述与传递函数的 关系	278
7.4.3 Z 反变换	207	9.3.5 状态变量组的非唯一性	281
7.5 采样系统的数学模型	209	9.3.6 系统矩阵 A 的特征方程和 特征值	282
7.5.1 描述离散控制系统的线性差分 方程	209		
7.5.2 脉冲传递函数	210		
7.6 离散控制系统分析	216		
7.6.1 线性离散控制系统的稳定性 分析	216		
7.6.2 离散控制系统的瞬态响应	221		
7.6.3 离散控制系统的稳态误差	223		

9.3.7 利用 Matlab 进行系统模型之间的相互转换	282	问题	334
9.4 线性定常系统连续状态方程的解	285	9.7.2 李雅普诺夫稳定性理论	337
9.4.1 线性系统状态方程的解	286	本章小结	347
9.4.2 状态转移矩阵性质	286	习题 9	348
9.4.3 向量矩阵分析中的若干结果	287	10 鲁棒控制系统	356
9.4.4 矩阵指数函数 e^A 的计算	288	10.1 鲁棒性的基本概念	356
9.4.5 线性离散系统状态空间表达式的建立及其解	291	10.2 参数不确定系统的稳定鲁棒性	356
9.5 线性定常系统的可控性与可观测性分析	294	10.2.1 使用劳斯判据分析参数不确定系统的稳定区域	356
9.5.1 线性连续系统的可控性	294	10.2.2 Kharitonov 定理	358
9.5.2 线性定常连续系统的可观测性	297	10.3 传递函数具有不确定性时的稳定鲁棒性	358
9.5.3 对偶原理	299	10.4 状态方程具有不确定性时的稳定鲁棒性	360
9.5.4 单输入/单输出系统状态空间描述的标准形	300	本章小结	363
9.5.5 基于系统标准形的可控可观判据	302	习题 10	363
9.5.6 离散系统的可控性和可观测性判据	305	附录 Matlab 简介	365
9.5.7 用 Matlab 判断系统的可控性和可观测性	305	M.1 Matlab 的特点	365
9.6 线性定常系统的状态反馈和状态观测器	306	M.2 Matlab 的基本功能	366
9.6.1 状态反馈与极点配置	307	M.2.1 Matlab 的编程环境	366
9.6.2 输出反馈与极点配置	314	M.2.2 Matlab 的程序设计基础	366
9.6.3 状态观测器	314	M.3 Matlab 控制系统工具箱简介	375
9.7 李雅普诺夫稳定性分析	334	M.3.1 线性系统的数学模型	375
9.7.1 李雅普诺夫意义下的稳定性		M.3.2 Matlab 控制系统工具箱函数介绍	378
		M.3.3 使用 Matlab 符号运算工具箱进行拉氏变换	382
		参考文献	385

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，自动控制的历史等内容。

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，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，降低劳动强度和提高生产效率，而且在人类征服自然、探知未来、建设高度文明等方面有着重要的意义。人类社会进入 21 世纪以来，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。

所谓自动控制是指脱离人的直接干预，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，它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。我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，神州六号载人航天飞行成功，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，故电位器动点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

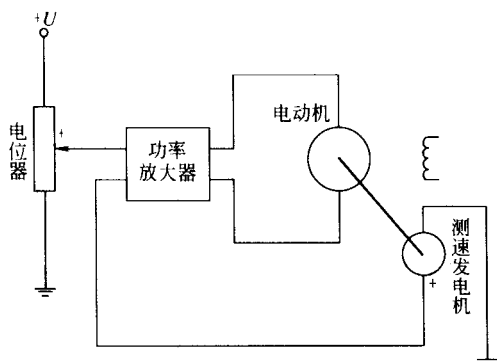


图 1-1 直流电动机速度自动控制的原理结构图

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。

由电源变化、负载变化等引起的转速变化，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，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。这时，电动机的转速控制就成为人工控制系统。

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 y ）就要发生变化，被控量 y 的变化值经过测量、变送元件测量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。

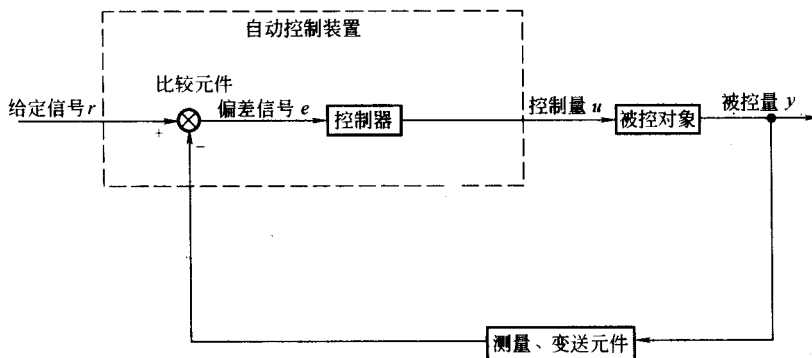


图 1-2 自动控制系统的组成框图

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。

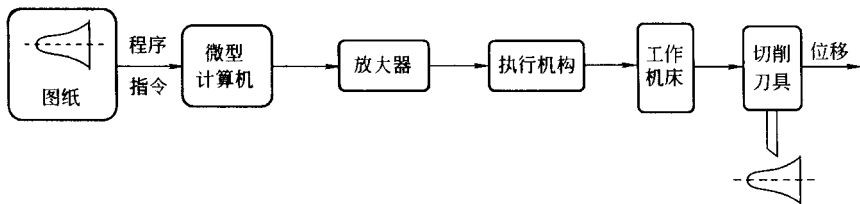


图 1-3 微型计算机控制机床（开环系统）

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引起的被控制量期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, 切削刀具偏离了期望值, 控制指令并不会相应地改变。

开环控制系统结构简单、成本低廉、工作稳定。当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制量的误差、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, 其结果必然导致投资大、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。

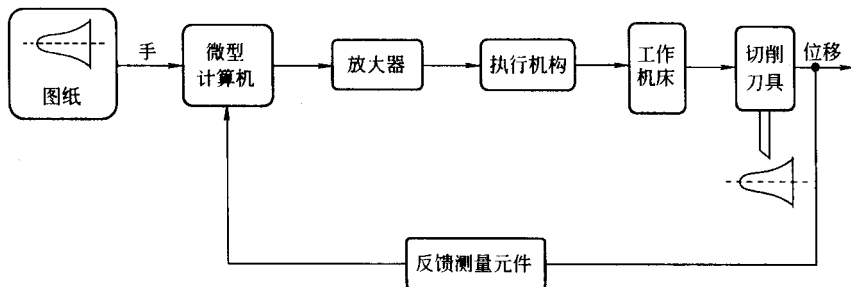


图 1-4 微型计算机控制机床（闭环系统）

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务。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。自动控制系统的研究中, 一个很重要的工作是如何解决好“振荡”或“发散”问题。

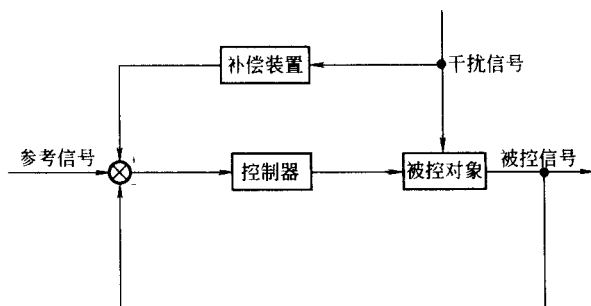


图 1-5 复合控制系统框图

(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。

补偿装置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

反映到被控信号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）

这类系统的特点是给定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，把输入、输出量尽量保持在希望数值上。

(2) 程序控制系统

这类系统的特点是给定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，如化工中反应的压力、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）

这类系统的特点是给定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。这类系统要求火炮跟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 调节器控制的系统及图 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。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。

1.2.4 按描述系统的数学模型来分

(1) 线性系统

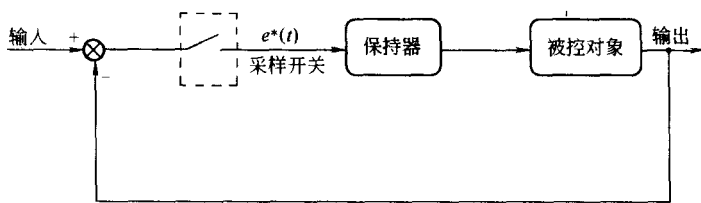


图 1-6 脉冲控制系统结构图

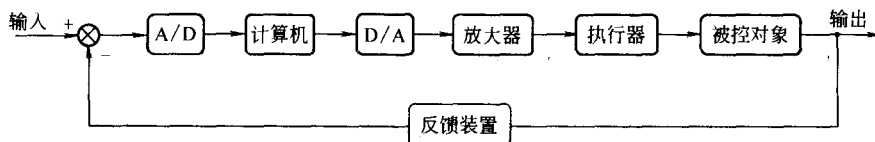


图 1-7 采样数字控制系统结构图

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 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 时，对应的输出分别为 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$ ，则当输入为 $r(t) = a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)$ 时，输出量为 $c(t) = a_1 c_1(t) + a_2 c_2(t)$ ，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。

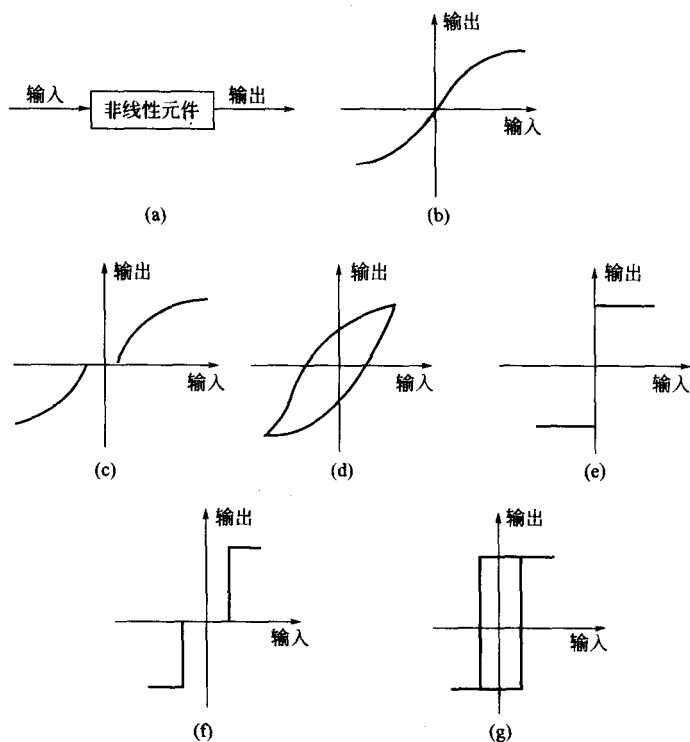


图 1-8 非线性元件静特性举例

非线性系统的理论研究远不如线性系统那么完整,一般只能近似地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、生物系统等;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。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。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,被控量就会发生变化,偏离给定值。通过系统的自动控制作用,经过一定的过渡过程,被控量又恢复到原来的稳定值或者稳定到一个新的给定值。这时系统从原来的平衡状态过渡到一个新的平衡状态,把被控量在变化过程中的过渡过程称为动态过程(即随时间而变的过程),而把被控量处于平衡状态称为静态或稳态。

自动控制系统最基本的要求是系统必须使控制系统被控量的稳态误差(偏差)为零或在允许的范围(具体误差可以多大,要根据具体的生产过程的要求来确定)。对于一个好的自动控制系统来说,要求稳态误差越小越好,最好稳态误差为零。一般要求稳态误差在被控量额定值的2%~5%之内。

自动控制系统除了要求满足稳态性能之外,还应满足动态过程的性能要求,在具体介绍自动控制系统动态要求之前,先介绍控制系统的动态过程(动态特性)有哪几种类型。一般的自动控制系统被控量变化的动态特性有以下几种,如图1-9所示。

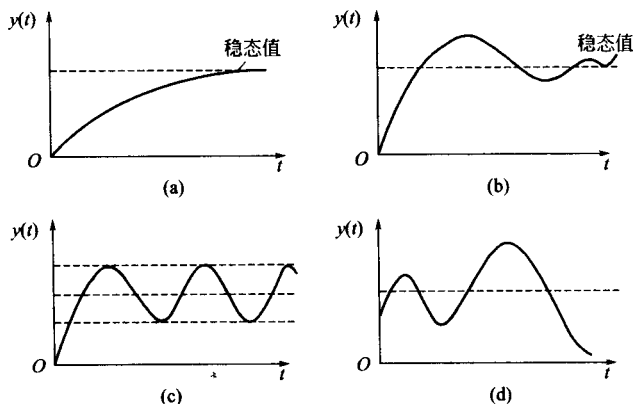


图 1-9 自动控制系统被控量变化的动态特性

① 单调过程 被控量 $y(t)$ 单调变化(即没有“正”、“负”的变化),缓慢地到达新的平衡状态(新的稳态值)。如图1-9(a)所示,一般这种动态过程具有较长的动态过程时间(到达新的平衡状态所需的时间)。

② 衰减振荡过程 被控量 $y(t)$ 的动态过程是一个振荡过程, 但是振荡的幅度不断地衰减, 到过渡过程结束时, 被控量会达到新的稳态值。这种过程的最大幅度称为超调量, 如图 1-9(b) 所示。

③ 等幅振荡过程 被控量 $y(t)$ 的动态过程是一个持续等幅振荡过程, 始终不能到达新的稳态值, 如图 1-9(c) 所示。这种过程如果振荡的幅度较大, 生产过程不允许, 则认为是一种不稳定的系统, 如果振荡的幅度较小, 生产过程可以允许, 则认为是一种稳定的系统。

④ 渐扩振荡过程 被控量 $y(t)$ 的动态过程不但是一个振荡过程, 而且振荡的幅值越来越大, 以致会大大超过被控量允许的误差范围, 如图 1-9(d) 所示, 这是一种典型的不稳定过程, 设计自动控制系统要绝对避免产生这种情况。

一般来说, 自动控制系统如果设计合理, 其动态过程多属于图 1-9(b) 的情况。为了满足要求, 希望控制系统的动态过程不仅是稳定的, 并且过渡过程时间 (又称调整时间) 越短越好, 振荡幅度越小越好, 衰减得越快越好。

关于稳态性能和动态性能的性能指标, 将在第 3 章详细讨论。

综上所述, 对于一个自动控制的性能要求可以概括为三方面: 稳定性、快速性和准确性。

① 稳定性 一个自动控制系统的最基本的要求是系统必须是稳定的, 不稳定的控制系统是不能工作的。

② 快速性 在系统稳定的前提下, 希望控制过程 (过渡过程) 进行得越快越好。但是有矛盾, 如果要求过渡过程时间很短, 可能使动态误差 (偏差) 过大。合理的设计应该兼顾这两方面的要求。

③ 准确性 即要求动态误差 (偏差) 和稳态误差 (偏差) 都越小越好。当与快速性有矛盾时, 应兼顾这两方面的要求。

1.4 自动控制的发展简史

控制理论是关于控制系统建模、分析和综合的一般理论, 也可以看作是控制系统的应用数学分支。但它不同于数学, 是一门技术科学。控制理论的发展是与控制技术的发展密切相关的。

根据自动控制理论的发展历史, 大致可分为如下四个阶段。

1.4.1 经典控制理论阶段

正如先有房子, 后有建筑学一样, 一个闭环的自动控制装置的应用, 可以追溯到 1788 年瓦特 (J. Watt) 发明的飞锤调速器。然而最终形成完整的自动控制理论体系, 是在 20 世纪 40 年代末。现在该理论已经成熟, 并在工程实践中得到了广泛的应用。

反馈在控制系统中的使用有着吸引人的历史。最先使用反馈控制装置的是希腊人在公元前 300 年使用的浮子调节器。凯特斯比斯 (Kitesibbios) 在油灯中使用了浮子控制器以保持油面高度稳定。亚历山大时代的赫容 (Heron), 在公元一世纪时出版了一本叫《浮力学》的书, 书中介绍了好几种用浮阀控制液位的方法。

现代欧洲最先发明反馈控制的是荷兰的德勒贝尔 (C. Drebbel), 使用了温度反馈控制。

邓尼斯·帕平 (Dennis Papin) 最先发明了蒸汽阀的压力控制器。帕平的这项发明是一种安全阀, 相当于现在的压力安全阀。

最早的在工业中使用的压力反馈控制器是瓦特 (J. Watt) 用于限制蒸汽机引擎速度的。这种全机械化装置测出转速, 利用飞轮来控制进入引擎的蒸汽量。

最早的有历史意义的反馈系统是俄国人制作的控制液位的浮动控制器, 据说是波朱诺夫 (I. Polzunov) 在 1765 年发明的。

19 世纪 60 年代是控制系统高速发展的时期,无论在理论还是实践上都有很大发展。1868 年麦克斯韦 (J. C. Maxwell) 基于微分方程描述从理论上给出了它的稳定性条件。1877 年劳斯 (E. J. Routh)、1895 年赫尔维茨 (A. Hurwitz) 分别独立给出了高阶线性系统的稳定性判据;另一方面,1892 年,李雅普诺夫 (A. M. Lyapunov) 给出了非线性系统的稳定性判据。在同一时期,维什哥热斯基 (I. A. Vyshnegreskii) 也用一种正规的数学理论描述了这种理论。

1922 年米罗斯基 (N. Minorsky) 给出了位置控制系统的分析,并对 PID 三作用控制给出了控制规律公式。1931 年,美国开始出售带有线性放大器和积分 (I) 作用的气动控制器,1934 年,哈仁 (H. L. Hazen) 给出了伺服机构的理论研究成果。1942 年,齐格勒 (J. G. Zigler) 和尼科尔斯 (N. B. Nichols) 给出了 PID 控制器的最优参数整定法。上述方法基本上是时域方法。另一方面,针对美国长距离电话线路负反馈放大器应用中出现的失真等问题,1932 年奈奎斯特 (Nyquist) 提出了负反馈系统的频率域稳定性判据。这种方法只需利用频率响应的实验数据,不用导出和求解微分方程。1940 年,波德 (H. Bode) 进一步研究通信系统频域方法,提出了频域响应的对数坐标图描述方法。1943 年,哈尔 (A. C. Hall) 利用传递函数 (复数域模型) 和方框图,把通信工程的频域响应方法和机械工程的时域方法统一起来,人们称此方法为复域方法。频域分析法主要用于描述反馈放大器的带宽和其他频域指标。

在二战时期使用和发展自动控制系统的主要动力是设计和发展自动导航系统、自动瞄准系统、自动雷达探测系统和其他在自动控制系统基础上发展的军事系统。这些控制系统的高性能要求和复杂性,促进了控制装备和控制系统研究的新方法与手段的飞速发展。对高性能武器的要求还促进了对非线性系统、采样数据系统以及随机控制系统的研究。

第二次世界大战结束时,经典控制技术和理论基本建立。1948 年伊文斯 (W. Evans) 又进一步提出了属于经典方法的根轨迹设计法,它给出了系统参数变化与时域性能变化之间的关系。至此,复数域与频率域的方法进一步完善。

复数域方法以传递函数作为系统数学模型,常利用图表进行分析设计,比求解微分方程简便。它可通过试验方法建立数学模型,物理概念清晰,因而至今仍得到广泛的工程应用。但它只适应单变量线性定常系统,对系统内部状态缺少了解,且复数域方法研究时域特性,得不到精确的结果,这是其缺点。

1.4.2 现代控制理论阶段

由于航天事业和电子计算机的迅速发展,20 世纪 60 年代初,在原有“经典控制理论”的基础上,又形成了所谓的“现代控制理论”,这是人类在自动控制技术认识上的一次飞跃。

为现代控制理论的状态空间法的建立做出开拓性贡献的有:1954 年贝尔曼 (R. Bellman) 的动态规划理论,1956 年庞特里雅金 (L. S. Pontryagin) 的极大值原理和 1960 年卡尔曼 (R. E. Kalman) 的多变量最优控制和最优滤波理论。

频域分析法在二战后持续占据着主导地位,特别是拉普拉斯变换和傅里叶变换的发展。在 20 世纪 50 年代,控制工程的发展的重点是复平面和根轨迹。在 20 世纪 80 年代,数字计算机在控制系统中得到普遍使用,这些新控制部件的使用使得控制精确、快速。

随着人造卫星的发展和太空时代的到来和其他一些因素,必须为导弹和太空卫星设计高精度复杂的控制系统。因而,重量小、控制精度高的系统使最优控制变得重要起来。基于这些原因,时域手段得到越来越多的重视。状态空间方法属于时域方法,其核心是最优化技术。它以状态空间描述 (实质上是一阶微分或差分方程组) 作为数学模型,利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段,适应于多变量、非线性、时变系统。它不但在航空、航天、制导与军事武器控制中有成功的应用,在工业生产过程控制中也得到逐步应用。

1.4.3 大系统控制理论阶段

20 世纪 70 年代开始,一方面现代控制理论继续向深度和广度发展,出现了一些新的控制

方法和理论。如①现代频域方法,该方法以传递函数矩阵为数学模型,研究线性定常多变量系统;②自适应控制理论和方法,该方法以系统辨识和参数估计为基础,处理被控对象不确定和缓时变,在实时辨识基础上在线确定最优控制规律;③鲁棒控制方法,该方法在保证系统稳定性和其他性能基础上,设计不变的鲁棒控制器,以处理数学模型的不确定性;④预测控制方法,该方法为一种计算机控制算法,在预测模型的基础上采用滚动优化和反馈校正,可以处理多变量系统。

另一方面随着控制理论应用范围的扩大,从个别小系统的控制,发展到若干个相互关联的子系统组成的大系统进行整体控制,从传统的工程控制领域推广到包括经济管理、生物工程、能源、运输、环境等大型系统以及社会科学领域,人们开始了对大系统理论的研究。

大系统理论是过程控制与信息处理相结合的综合自动化理论基础,是动态的系统工程理论,具有规模庞大、结构复杂、功能综合、目标多样、因素众多等特点。它是一个多输入、多输出、多干扰、多变量的系统。例如人体就可以看作为一个大系统,其中有体温的控制、化学成分的控制、情感的控制等。

大系统理论目前仍处于发展阶段。

1.4.4 智能控制阶段

这是近年来新发展起来的一种控制技术,是人工智能在控制上的应用。智能控制的概念和原理主要是针对被控对象、环境、控制目标或任务的复杂性提出来的,它的指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧,解决那些目前需要人的智能才能解决的复杂的控制问题。被控对象的复杂性体现为:模型的不确定性、高度非线性、分布式的传感器和执行器、动态突变、多时间标度、复杂的信息模式、庞大的数据量以及严格的特性指标等。环境的复杂性则表现为变化的不确定性和难以辨识。

试图用传统的控制理论和方法去解决复杂的对象、复杂的环境和复杂的任务是不可能的。原因如下。

①传统的控制理论都是建立在精确模型基础之上的,它们以微分和积分为工具,不是以直接使用工程技术用语描述和解决问题。目前出现的智能机器人等复杂对象,要求突破传统的数学语言的分析与设计方法,寻求新的描述方法。

②传统的控制理论提供了一些方法处理对象的不确定性复杂性,如自适应控制和鲁棒控制,达到优化控制的目的。但由于实际应用中,尤其在工业工程控制中,被控对象的严重非线性,不确定性,工作点的剧烈变化等因素,使得自适应和鲁棒控制应用的有效性受到限制,促使人们采用新的控制技术和方法。

③传统的控制理论输入信息比较单一,而现代的复杂系统必须处理多种形式的信息,进行信息融合。这样的控制系统就要求具有自适应、自学习和自组织的功能,因而需要新一代的控制理论和技术来支持。

智能控制是从“仿人”的概念出发的。一般认为,其方法包括模糊控制,神经网络控制,专家控制和基于现代仿生优化(遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等)方法的控制等。

本章小结

本章首先介绍了什么是自动控制,接着以电动机转速控制为例,介绍了自动控制理论中常用的术语:被控对象,参考输入信号(给定值信号),扰动、偏差信号、被控量、控制量和自动控制系统等。

本章还介绍了自动控制系统的组成及其方框图。并以微机数控机床为例,说明什么是开环控制系统和闭环控制系统,并指出实际生产过程的自动控制系统,绝大多数是闭环控制系统。