



自动控制原理

■ 范军芳 苏 中 编著 ■



国防工业出版社

National Defense Industry Press

自动控制原理

范军芳 苏 中 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书从系统设计和应用的角度阐述了控制理论的主要内容。全书共八章,分别介绍了自动控制的基本概念、数学模型、时域分析、根轨迹、频率域分析、校正设计,以及离散系统和现代控制理论的基本概念与方法。本书从智能科学与技术专业培养需求出发,内容以经典控制为主,全书兼顾理论、教学实际以及工程应用,并积极引进辅助教学设计软件,以概念讲解清楚、公式删繁就简、结合专业应用等为特色。

本书可供高等院校智能科学与技术等专业控制理论少学时课程作为教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 范军芳, 苏中编著. —北京: 国防工业出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-118-07279-2

I. ①自... II. ①范... ②苏... III. ①自动控制理论
IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 013017 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 366 千字

2010 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

前 言

编写本书的初衷是为北京信息科技大学智能科学与技术专业的本科生提供一本合适的控制理论教学参考书。智能科学与技术是形成于生命科学、控制理论、信息技术以及计算机技术等学科交叉基础之上的新兴专业方向。控制理论在其专业教学中扮演着重要的地位,它既是引领学生进入智能科学技术领域的一把钥匙,更是深入学习与研究的基础。同时,“A key difference with many scientific disciplines is that control is fundamentally an engineering science. Unlike natural science, . . . , the goal of engineering science is to understand and develop new systems that can benefit mankind.” (Richard M. Murray, Karl J. Åström, Stephen P. Boyd, etc, Control in an Information Rich World, 2002)。自动控制非常强调数学工具、物理意义和工程实践的结合,高水平教材均是如此且各有独特之处。

按照理论完整性并结合实际需求,本书侧重基本思想和方法的阐述,充分利用软件,不拘泥于复杂公式的推导。各章内容安排如下:

第1章在介绍基本概念的基础上,讲解自动控制研究的发展历史,结合实际系统,讨论工程与理论、时域与频域等辩证关系,并以框图形式给出各部分内容的内在联系。

第2章由微分方程导出传递函数、框图模型,结合工具软件进行分析。

第3章详细讨论单位阶跃信号作用下的二阶系统响应,简略分析脉冲和斜坡信号响应,简化 Routh - Hurwitz 判据的讲解,最后介绍计算稳态误差的一般性方法和静态系数法。

第4章介绍根轨迹的绘制,重在利用根轨迹进行系统分析与估算。

第5章介绍控制系统频率域分析方法,侧重物理概念、典型环节描述与稳定性判据的应用,并简要论述时域指标与频域指标之间的联系。

第6章介绍系统校正方法,详细讨论超前/滞后校正以及 PID 控制器的设计,建议与第8章的极点配置设计方法作比较。

第7章介绍离散控制系统基本内容,以便于和后续计算机控制课程衔接。

第8章详细介绍现代控制理论的主要内容以及若干最新成果。

为了帮助理解基本概念,前五章安排习题较多,后3章以例题为主。

囿于作者水平,且时间亦颇仓促,很多有意义的内容,如机器人控制等实例、新的控制思想以及新的课程体系并未完全体现,有待今后得以实现。

本书在编写过程中,参考了多位国内著名学者的著作,并得到了苏中教授、李擎教授、吴细宝老师、北京理工大学林德福副教授等老师的热情鼓励与无私指点。国防工业出版社的编辑做了大量的编辑工作,在此一并致以衷心感谢。

作者
2010年12月

目 录

第 1 章 自动控制的一般概念	1
1.1 自动控制的基本原理与方式	1
1.1.1 自动控制技术及其应用	1
1.1.2 自动控制理论	1
1.1.3 反馈控制原理	3
1.1.4 反馈控制系统的基本组成	4
1.1.5 自动控制系统基本控制方式	5
1.2 自动控制系统示例	7
1.2.1 函数记录仪	7
1.2.2 火炮方位角控制系统	7
1.2.3 导弹自动驾驶仪	8
1.2.4 电压调节系统	9
1.3 自动控制系统的分类	9
1.4 对自动控制系统的基本要求	10
1.4.1 基本要求的提法	10
1.4.2 典型外作用	12
1.5 本课程的研究内容	13
1.6 小结	14
习题	15
第 2 章 控制系统的数学模型	17
2.1 控制系统的时域数学模型	17
2.1.1 线性元件的微分方程	17
2.1.2 线性定常微分方程的求解	20
2.1.3 非线性微分方程的线性化	21
2.1.4 运动的模态	22
2.2 控制系统的复数域数学模型	23
2.2.1 传递函数的定义和性质	23
2.2.2 典型元部件的传递函数	26
2.3 控制系统的结构图与信号流图	32
2.3.1 控制系统结构图的组成和绘制	32
2.3.2 结构图的等效变换与简化	34
2.3.3 信号流图的组成及性质	38

2.3.4	信号流图的绘制	39
2.3.5	梅森增益公式	40
2.3.6	闭环系统的传递函数	41
2.4	数学模型的实验测定法	42
2.4.1	数学模型实验测定的主要方法	43
2.4.2	输入测试信号的选择	43
2.4.3	测定实验注意事项	43
2.4.4	实验结果的数据处理	44
2.5	小结	45
	习题	45
第3章	线性系统的时域分析法	49
3.1	线性系统时间响应的性能指标	49
3.1.1	典型输入信号	49
3.1.2	动态过程与稳态过程	50
3.1.3	动态性能与稳态性能	50
3.2	一阶系统的时域分析	51
3.2.1	一阶系统的数学模型	51
3.2.2	典型输入下一阶系统的响应	52
3.3	二阶系统的时域分析	54
3.3.1	二阶系统的数学模型	54
3.3.2	二阶系统的单位阶跃响应	55
3.3.3	欠阻尼二阶系统的动态过程分析	57
3.3.4	过阻尼二阶系统的动态过程分析	60
3.3.5	二阶系统的单位斜坡响应	61
3.3.6	二阶系统性能的改善	65
3.3.7	非零初始条件下二阶系统的响应过程	68
3.4	高阶系统的时域分析	69
3.4.1	三阶系统的单位阶跃响应	69
3.4.2	高阶系统的阶跃响应	71
3.4.3	闭环主导极点	71
3.4.4	高阶系统的动态性能估算	72
3.5	线性系统的稳定性分析	73
3.5.1	稳定性的基本概念	73
3.5.2	线性系统稳定的充要条件	73
3.5.3	劳斯—赫尔维茨稳定判据	74
3.5.4	劳斯稳定判据的特殊情况	76
3.5.5	劳斯稳定判据的应用	77
3.6	线性系统的稳态误差计算	78
3.6.1	误差与稳态误差	78

3.6.2	系统类型	79
3.6.3	阶跃输入作用下的稳态误差与静态位置误差系数	80
3.6.4	斜坡输入作用下的稳态误差与静态速度误差系数	80
3.6.5	加速度输入作用下的稳态误差与静态加速度误差系数	81
3.6.6	动态误差系数法	83
3.6.7	扰动作用下的稳态误差	85
3.6.8	减小或消除稳态误差的措施	88
3.7	小结	91
	习题	92
第4章	线性系统的根轨迹法	96
4.1	根轨迹法的基本概念	96
4.1.1	根轨迹概念	96
4.1.2	根轨迹与系统性能	97
4.1.3	闭环零、极点与开环零、极点之间的关系	97
4.1.4	根轨迹方程	98
4.2	根轨迹绘制的基本法则	99
4.3	广义根轨迹	106
4.3.1	参数根轨迹	106
4.3.2	零度根轨迹	107
4.4	系统性能的分析与估算	108
4.5	小结	109
	习题	109
第5章	线性系统的频域分析法	112
5.1	引言	112
5.2	频率特性	112
5.2.1	频率特性的基本概念	112
5.2.2	频率特性的几何表示法	114
5.3	典型环节和开环系统频率特性	116
5.3.1	典型环节	116
5.3.2	典型环节的频率特性	117
5.3.3	开环幅相曲线绘制	121
5.3.4	开环对数频率特性曲线	124
5.3.5	传递函数的频域实验确定	126
5.4	频率域稳定判据	127
5.4.1	奈奎斯特判据基础	128
5.4.2	奈奎斯特稳定判据	131
5.4.3	对数频率稳定判据	132
5.5	稳定裕度	133
5.6	闭环系统的频域性能指标	135

5.6.1	控制系统的频带宽度	135
5.6.2	闭环系统频域指标和时域指标的转换	136
5.7	小结	138
	习题	138
第6章	线性系统的校正方法	142
6.1	系统的设计与校正问题	142
6.1.1	性能指标	142
6.1.2	系统带宽的选择	143
6.1.3	校正方式	144
6.1.4	基本控制规律	145
6.2	常用校正装置及其特性	148
6.2.1	无源校正网络	148
6.2.2	有源校正装置	151
6.3	串联校正	153
6.3.1	频率响应法校正设计	153
6.3.2	串联超前校正	154
6.3.3	串联滞后校正	157
6.3.4	串联滞后—超前校正	159
6.3.5	串联综合法校正	161
6.3.6	串联工程设计方法	165
6.4	反馈校正	167
6.4.1	反馈校正的原理与特点	167
6.4.2	测速—相角超前网络反馈校正	168
6.4.3	综合法反馈校正	168
6.5	复合校正	169
6.5.1	复合校正的概念	170
6.5.2	按扰动补偿的复合校正	170
6.5.3	按输入补偿的复合校正	171
6.6	小结	174
	习题	175
第7章	离散系统的分析	178
7.1	离散系统基本概念	178
7.1.1	采样控制系统	178
7.1.2	数字控制系统	179
7.1.3	数字控制系统与采样控制系统的关系	180
7.1.4	离散控制系统的特点	180
7.1.5	离散系统的研究方法	181
7.2	信号采样与保持	181
7.2.1	信号采样	181

7.2.2	零阶保持器	183
7.3	z 变换理论	184
7.3.1	z 变换定义	184
7.3.2	z 变换方法	184
7.3.3	z 变换的基本定理	185
7.3.4	z 反变换	187
7.3.5	z 变换法的局限性	188
7.4	离散系统的数学模型	189
7.4.1	线性常系数差分方程及其解法	189
7.4.2	脉冲传递函数	190
7.4.3	开环系统脉冲传递函数	191
7.4.4	闭环系统脉冲传递函数	193
7.5	离散系统的稳定性与稳态误差	194
7.5.1	s 域到 z 域的映射	195
7.5.2	线性定常离散系统稳定的充分必要条件	196
7.5.3	离散系统的稳定性判据	197
7.5.4	离散系统的稳态误差	198
7.6	离散系统的动态性能分析	199
7.6.1	离散系统的时间响应	199
7.6.2	闭环极点与动态响应的关系	200
7.7	离散系统的数字校正	201
7.7.1	数字控制器的脉冲传递函数	201
7.7.2	最少拍系统设计	201
第 8 章	控制系统的状态空间分析与综合	203
8.1	控制系统的状态空间描述	203
8.1.1	基本概念	203
8.1.2	系统的传递函数矩阵	206
8.1.3	线性定常系统动态方程的建立	206
8.2	线性系统的运动分析	213
8.2.1	线性定常连续系统的自由运动	213
8.2.2	状态转移矩阵的性质	216
8.2.3	线性定常连续系统的受控运动	216
8.2.4	线性定常离散系统的运动分析	217
8.3	控制系统的李雅普诺夫稳定性分析	218
8.3.1	李雅普诺夫稳定性概念	218
8.3.2	李雅普诺夫稳定性间接判别法	219
8.3.3	李雅普诺夫稳定性直接判别法	219
8.3.4	线性定常系统的李雅普诺夫稳定性分析	223
8.4	线性系统的可控性和可观测性	224

8.4.1	基本概念	224
8.4.2	线性定常系统的可控性	225
8.4.3	线性定常系统的可观测性	230
8.4.4	可控性、可观测性与传递函数矩阵的关系	232
8.4.5	连续系统离散化后的可控性与可观测性	233
8.5	线性系统非奇异线性变换及系统的规范分解	234
8.5.1	线性系统的非奇异线性变换及其性质	234
8.5.2	几种常用的线性变换	234
8.5.3	对偶原理	237
8.5.4	线性系统的规范分解	238
8.6	线性定常控制系统的综合设计	239
8.6.1	状态反馈与极点配置	240
8.6.2	输出反馈与极点配置	242
8.6.3	状态重构与状态观测器设计	242
8.6.4	降维状态观测器的例子	244
参考文献		246

第 1 章 自动控制的一般概念

1.1 自动控制的基本原理与方式

1.1.1 自动控制技术及其应用

自 20 世纪特别是第二次世界大战以来,自动控制科学和技术迅速发展,有力地提高了社会劳动生产率,推动了社会生活的进步。在军事上,自动控制极大地改善了武器的精确度和杀伤力,而在工农业、交通运输、航天、核能以及医疗等领域,自动控制都是不可或缺的。近年来,自动控制进一步扩展到生态环境、经济管理、社会科学和其他许多社会生活领域,促进了各学科之间的相互渗透。下面举两个例子。

在往复式轧钢机中,在钢材往复两次通过轧辊的短暂时间间隔里,既要使辊道停下以拨正钢材,同时使辊道反转把钢材反向送入轧辊,又要使轧辊及时停转并反向达到正确转速,同时还必须调整上下两个轧辊间的距离达到工艺要求以迎接反向而来的钢材。正是自动控制技术保证了这些动作互相配合,迅速完成。若人工操作,则难免由于配合的问题而造成等待,引入自动控制后如果每一个轧程能少等待 1s,一台轧钢机一年就能多生产上万吨钢材。

现代战争的作战模式逐渐从以平台为中心转变为以网络为中心的中远程精确打击。制导控制系统是精确打击和先进导弹的核心所在,很大程度上决定了导弹的性能,尤其是制导精度和杀伤概率。例如在空战中,战斗机和其他空中目标的机动能力不断提高,为了有效摧毁目标,必须更大程度地提高空空导弹的机动能力,使其机动过载达到目标机动过载的 3 倍~5 倍。第四代空空导弹已具备全天候、全方位、多目标打击能力,并向更快、更远、更精确、更灵活的方向发展。这都得益于精确制导控制技术的进步。

自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称为控制装置或控制器),使机器、设备或生产过程(统称为被控对象)的某个工作状态或参数(被控量)自动地按照预定的规律运行。例如,数控车床按照预定程序自动地切削工件;化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定;导弹制导控制系统,自动地将导弹引导到敌方目标;无人驾驶飞机按照预定航迹自动升降和飞行;人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收等。这一切都是以高水平的自动控制技术为前提的。

1.1.2 自动控制理论

自动控制理论是研究关于自动控制系统组成、分析和设计的一般性理论,是研究自动控制共同规律的技术科学。作为现代的工程技术人员和科学工作者,都必须具备一定的自动控制理论基础知识。

自动控制理论是随着自动控制技术的产生和发展而进步的,而自动控制技术则是人

类长期以来社会活动的产物,特别是工业生产和军事需求的结果。在人类文明史中,亦曾有为数众多的带有自动控制意味的巧妙的发明创造,因而使得在回顾自动控制的发展史时往往将其起源追溯到远至中国古代黄帝征蚩尤的时代。但若观察的确曾对一段历史时期的社会分发展起过重要作用并产生重要后继影响的事件,则比较公认的事实是:自动控制技术最初产生于18世纪60年代。1765年俄国人波尔祖诺夫(И. И. Ползунов)发明了控制锅炉水位的自动装置,1768年英国人瓦特(J. Watt)发明了飞球调速器。由于蒸汽机是第一次工业革命的重要原动机,因此这些发明对于当时的社会进步起了巨大的影响。随后,蒸汽机运行中的“猎振”(Hunting)以及当时天文望远镜中的类似现象,推动了最初的自动控制理论的产生和发展。麦克斯韦尔(J. C. Maxwell)于1868年首先应用天体力学分析和解释“猎振”现象,开辟了用数学方法研究控制系统的途径。此后,英国数学家劳斯(E. J. Routh)和德国数学家赫尔维茨(A. Hurwitz)分别在1877年和1895年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。这些方法奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。1912年瑞典科学家达楞(Dalen)发明了用于灯塔和灯标的自动调节器,并为此获得了诺贝尔奖。

1932年,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题,运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性判据,奠定了频率响应法的基础。随后,伯德(H. W. Bode)和尼柯尔斯(N. B. Nichols)在20世纪30年代末和40年代初进一步将频率响应法加以发展,形成了经典控制理论的频域分析法。第二次世界大战期间,反馈控制方法被广泛用于设计研制飞行器自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统以及其他军用系统。这些系统的复杂性和对快速跟踪、精确控制的高性能追求,迫切要求拓展已有的控制技术,促使了许多新的见解和方法的产生。同时,还促进了对非线性系统、采样系统以及随机控制系统的研究。1948年,美国科学家伊万斯(W. R. Evans)创立了根轨迹分析方法,为分析系统性能随系统参数变化的规律性提供了有力工具,被广泛应用于反馈控制系统的分析与设计中。维纳(N. Wiener)在1948年出版的专著《控制论,或关于在动物和机器中的控制与通讯》,标志着控制论作为科学的一门重要分支正式诞生。维纳也因此成为控制论的主要创始人之一。我国著名科学家钱学森在1954年出版的专著《工程控制论》又进一步推动了控制论与工程技术问题的密切结合。

到20世纪50年代,频率响应方法已经在控制领域中占据主导地位,框图、传递函数、奈奎斯特图、伯德图、描述函数以及根轨迹图等概念和方法,都已是众所周知的有效且方便的工具,即使是随机扰动的作用亦能用频率响应方法表示。频率响应方法的成就达到了高峰。然而,数字计算机的问世使得形势又一次起了变化。同时,20世纪50年代中期空间技术的发展迫切要求解决更复杂的多变量、非线性系统的最优控制问题(例如火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆过程中的高精度、低消耗控制),实践的需求推动了控制理论的进步。俄国数学家李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)于1892年创立的稳定性理论被引用到控制中。1956年,苏联科学家庞特里亚金(Pontryagin)提出极大值原理,美国数学家贝尔曼(R. Bellman)创立了动态规划。极大值原理和动态规划为解决最优控制问题提供了理论工具。美国数学家卡尔曼(R. Kalman)于1959年提出了著名的卡尔曼滤波器,1960年又提出系统的可控性和可观测性问题。1967年旺纳姆(W. M. Wonham)导出了一个可控系统的全部闭环特征频率可以通过反馈任意配置的充分条件。随后,一套以状

态方程作为描述系统的数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波为核心的控制系统分析、设计的新原理和方法基本确定,现代控制理论应运而生。状态空间方法的重要价值在于,它比频率域理论更一般、更严格、也更深刻地反映了系统的内在结构;但是,其对于被控对象模型的依赖以及控制器的复杂性等不足使得对于频率域方法的研究又逐步复活起来。当今很多控制工程师仍然以频率响应的理论作为共同的语言,表明了建立在奈奎斯特判据基础上的频率域控制理论的强大生命力。

为了解决被控对象精确状态空间模型不易建立、合适的最优性能指标难以构造、控制器过于复杂等问题,近 30 年来研究人员不断提出一些新的控制方法和理论,如几何控制、自适应控制、智能控制、预测控制、容错控制、鲁棒控制、非线性控制和复杂系统控制等,大大地扩展了控制理论的研究范围。此外,20 世纪 90 年代以来,诸如 MATLAB/SIMULINK、SciLab 等控制系统辅助分析、设计软件也有了长足的进步,对自动控制本身的发展也起到了明显的促进作用。

控制理论目前还在向更纵深、更广阔的领域发展,在数学工具、理论基础以及研究方法上都产生了实质性的飞跃,启发并扩展了人的思维方式,引导人们去探讨自然界更为深刻的运动机理。

1.1.3 反馈控制原理

为了实现各种复杂的控制任务,首先要将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来,成为一个有机总体,这就是自动控制系统。控制系统中,被控对象的输出量即被控量,是需要严格加以控制的物理量,可以是恒定值,例如温度、压力、液位等,也可以按照给定规律运行,例如飞行航迹、记录曲线等。控制装置则是对被控对象施加控制作用的机构的总体,它可以采用的原理和方式有很多种,但最核心的策略是基于反馈控制原理与被控对象构成反馈控制系统。

反馈控制的原理在于,控制装置将被控量信号引回输入端,与输入信号相比较,利用所得偏差信号进行控制,从而实现对被控对象进行控制的任务。事实上,人的一切活动都体现出反馈控制的原理,人本身就是一个具有高度复杂控制能力的反馈控制系统。例如,人用手拿取桌上的书,汽车司机操纵方向盘驾驶汽车沿公路平稳行驶等,这些日常生活中习以为常的平凡动作都渗透着反馈控制的原理。

下面,通过分析手从桌上取书的动作过程,揭示其中所包含的反馈控制机理。在这里,书的位置是手运动的指令信息,一般称为输入信号(或参量)。取书时,首先人要用眼睛连续目测手相对于书的位置,并将这个信息送入大脑(称为位置反馈信息);然后由大脑判断手与书之间的距离,产生偏差信号,并根据其大小发出控制手臂移动的命令(称为控制作用或操纵量),逐渐使手与书之间的距离(偏差)减小。显然,只要这个偏差存在,上述过程就要反复进行,直到偏差减小为零,手便取到了书。可以看出,大脑控制手取书的过程,是一个利用偏差(手与书之间距离)产生控制作用,并不断使偏差减小直至消除的运动过程;同时,为了取得偏差信号,必须要有手位置的反馈信息,两者结合起来,就构成了反馈控制。将上述人取物视为一个反馈控制系统时,手是被控对象,手位置是被控量(系统的输出量),产生控制作用的机构是眼睛、大脑和手臂,统称为控制装置。可以用图 1-1 的系统方块图来展示这个反馈控制系统的基本组成及工作原理。

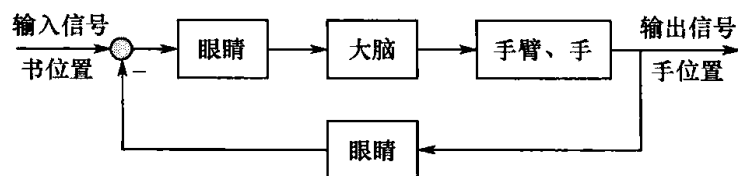


图 1-1 人取书的反馈控制系统方框图

通常,把取出输出量送回到输入端,并与输入信号相比较产生偏差信号的过程,称为反馈。若反馈的信号是与输入信号相减,使产生的偏差越来越小,则称为负反馈;反之,则称为正反馈。反馈控制就是采用负反馈并利用偏差进行控制的过程,而且,由于引入了被控量的反馈信息,整个控制过程成为闭合的,因此反馈控制也称闭环控制。

1.1.4 反馈控制系统的基本组成

任何一个自动控制系统都是由被控对象和控制器有机构成的。自动控制系统根据被控对象和具体用途不同,可以有各种不同的结构形式。图 1-2 是一个典型自动控制系统的功能框图。图中的每一个方框,代表一个具有特定功能的元件。除被控对象外,控制装置通常是由测量元件、比较元件、放大元件、执行机构、校正元件以及给定元件组成。这些功能元件分别承担相应的职能,共同完成控制任务。

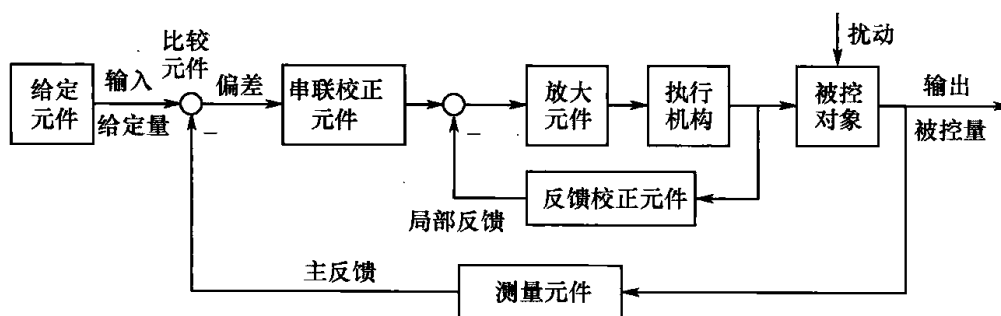


图 1-2 典型反馈控制系统方框图

图中,用“○”代表比较元件,它将测量元件检测到的被控量与参据量进行比较,“-”号表示两者符号相反,即负反馈。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称前向通路;系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外,还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含一个主反馈通路的系统称单回路系统,有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。

(1)被控对象。一般是指生产过程中需要进行控制的工作机械、装置或生产过程。描述被控对象工作状态的、需要进行控制的物理量就是被控量。

(2)给定元件。主要用于产生给定信号或控制输入信号。例如,直流电动机转速控制系统中的电位器。

(3)测量元件。用于检测被控量或输出量,产生反馈信号。如果测出的物理量属于非电量,一般要转换成电量以便处理。例如,直流电动机转速控制系统中的测速发电机。

(4)比较元件。用来比较输入信号和反馈信号之间的偏差。它可以是一个差动电路,也可以是一个物理元件(如电桥电路、差动放大器、自整角机等)。

(5)放大元件。用来放大偏差信号的幅值和功率,使之能够推动执行机构调节被控对象。例如,功率放大器、电液伺服阀等。

(6)执行机构。用于直接对被控对象进行操作,调节被控量。如阀门,伺服电动机等。

(7)校正元件。用来改善或提高系统的性能。常用串联或反馈的方式连接在系统中。例如,RC 网络、测速发电机等。

1.1.5 自动控制系统基本控制方式

反馈控制是自动控制系统最基本也是应用最广泛的一种控制系统。除此之外,还有开环控制方式和复合控制方式,它们都有其各自的特点和不同的适用场合。

1. 开环控制系统

系统的控制输入不受输出影响的控制系统称开环控制系统。在开环控制系统中,输入端与输出端之间,只有信号的前向通道而不存在由输出端到输入端的反馈通路。

图 1-3(a)所示的他激直流电动机转速控制系统就是一个开环控制系统,其任务是控制直流电动机以恒定的转速带动负载工作。系统的工作原理是:调节电位器 R 的滑臂,使其输出给定参考电压 u_r 。 u_r 经电压放大和功率放大后成为 u_a ,送到电动机的电枢端,用来控制电动机转速。在负载恒定的条件下,他激直流电动机的转速 ω 与电枢电压 u_a 成正比,只要改变给定电压 u_r ,便可得到相应的电动机转速 ω 。在本系统中,直流电动机是被控对象,电动机的转速 ω 是被控量,也称为系统的输出量或输出信号。把参考电压 u_r 通常称为系统的给定量或输入量。就图 1-3(a)而言,只有输入量 u_r 对输出量 ω 有单向控制作用,而输出量 ω 对输入量 u_r 却没有任何影响和联系,这种系统即为开环控制系统。

直流电动机转速开环控制系统可用图 1-3(b)所示的方框图表示。图中用方框代表系统中具有相应功能的元部件;用箭头表示元部件之间的信号及其传递方向。电动机负载转矩 M_c 的任何变动,都会使输出量 ω 偏离希望值,这种作用称之为干扰或扰动,在图 1-3(b)中用一个作用在电动机上的箭头来表示。

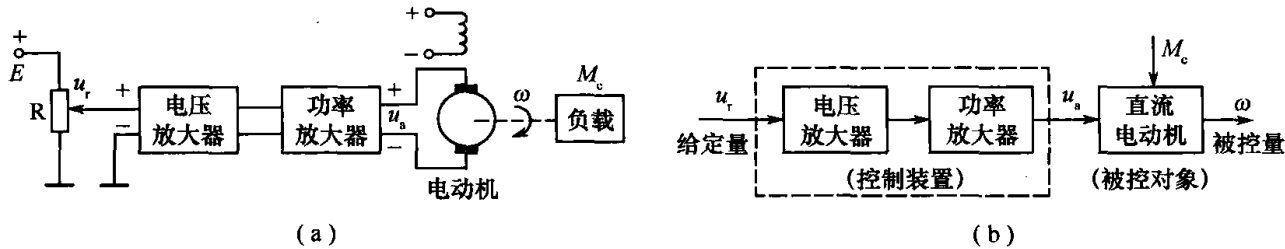


图 1-3 直流电动机转速控制系统

(a) 直流电动机转速开环控制系统; (b) 直流电动机转速开环控制系统方框图。

2. 闭环控制系统

开环控制系统一般精度不高且适应性欠佳。若要提高控制精度,必须把输出量的信息反馈到输入端,通过比较输入值与输出值,产生偏差信号,该偏差信号以一定的控制规律产生控制作用,逐步减小以至消除这一偏差,从而实现所要求的控制性能。

在图 1-3(a)所示的直流电动机转速开环控制系统中,加入一台测速发电机,并对

电路稍作改变,便构成了如图 1-4(a) 所示的直流电动机转速闭环控制系统。图 1-4(a) 中,测速发电机由电动机同轴带动,它将电动机的实际转速 ω (系统输出量) 测量出来,并转换成电压 u_f ,再反馈到系统的输入端,与给定值电压 u_r (系统输入量) 进行比较,从而得出电压 $u_e = u_r - u_f$ 。由于该电压能间接地反映出误差的性质(大小和正负方向),通常称之为偏差信号,简称偏差。偏差 u_e 经放大器放大后成为 u_a ,用以控制电动机转速 ω 。

直流电动机转速闭环控制系统可用图 1-4(b) 的方框图来表示。图中清楚地表明,采用反馈回路,使信号的传输路径形成闭合回路,使输出量反过来直接影响控制作用。

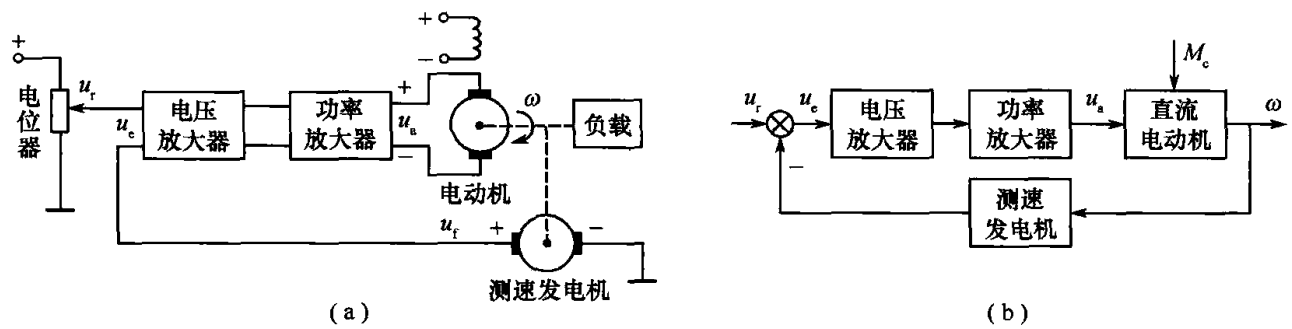


图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统
(a) 直流电动机转速闭环控制系统; (b) 直流电动机转速闭环控制系统方框图。

必须指出,在系统主反馈通道中,只有采用负反馈才能达到控制的目的。若采用正反馈,将使偏差越来越大,导致系统发散而无法工作。闭环控制是最常用的控制方式,我们所说的控制系统,一般都是指闭环控制系统。闭环控制系统是本课程讨论的重点。

下面对开环控制系统和闭环控制系统进行简单比较分析。一般而言,开环控制系统结构比较简单,成本较低,其缺点是控制精度不高,抑制干扰能力差,而且对系统参数变化比较敏感。一般用于可以不考虑外界影响或精度要求不高的场合,如洗衣机、步进电机控制及水位调节等。

在闭环控制系统中,不论是输入信号的变化,或者干扰的影响,或者系统内部的变化,只要是被控量偏离了规定值,都会产生相应的作用去消除偏差。因此,闭环控制抑制干扰能力强,与开环控制相比,系统对参数变化不敏感,可以选用不太精密的元件构成较为精密的控制系统,获得满意的动态特性和控制精度。但是采用反馈装置需要添加元部件,增加了成本和系统的复杂性。如果系统的结构参数选取不适当,控制过程可能变得很差,甚至出现振荡或发散等不稳定的情况,因此,如何分析系统,合理选择系统的结构参数,从而获得满意的系统性能,是自动控制理论必须研究解决的问题。

3. 复合控制系统

反馈控制只有在外部作用(输入信号或干扰)对控制对象产生影响之后才能做出相应的控制。尤其当控制对象具有较大延迟时间时,反馈控制不能及时地影响输出的变化,会影响系统输出的平稳性。前馈控制能使系统及时感受输入信号,使系统在偏差即将产生之前就注意纠正偏差。将前馈控制和反馈控制结合起来,构成复合控制,可以有效提高系统的控制精度。

1.2 自动控制系统示例

1.2.1 函数记录仪

函数记录仪是一种通用记录仪,它可以在笛卡儿坐标上自动描绘两个电量的函数关系。同时,记录仪还带有走纸机构用以描绘一个电量对时间的函数关系。

函数记录仪通常由减速器、测量元件、放大元件、伺服电动机、测速发电机、齿轮系及绳轮等组成,其工作原理如图 1-5 所示。系统的输入(给定量)是待记录电压,被控对象是记录笔,笔的位移是被控量。系统的任务是控制记录笔位移,在纸上描绘出待记录的电压曲线。函数记录仪方框图如图 1-6 所示。其中,测速发电机是校正元件,它测量电动机转速并进行反馈,用以增加阻尼,改善系统性能。

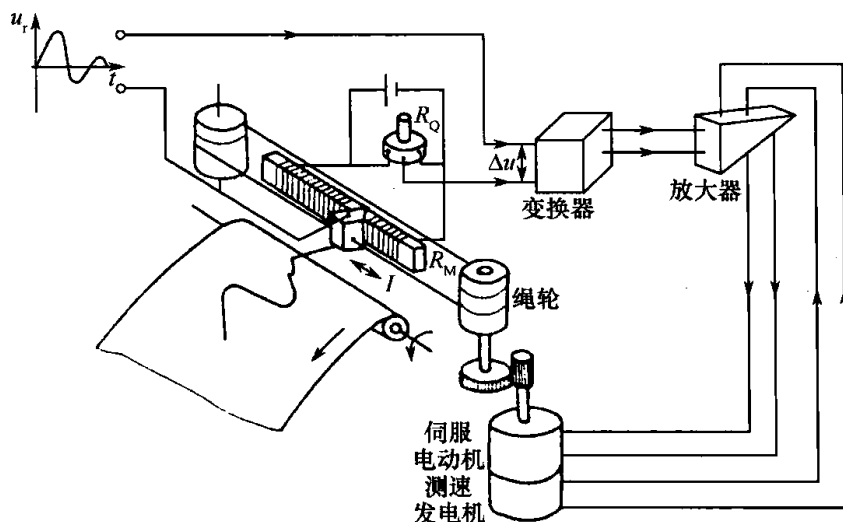


图 1-5 函数记录仪工作原理图

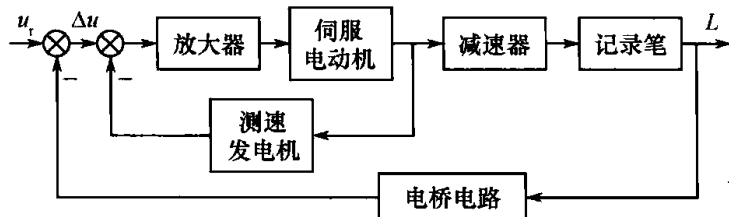


图 1-6 函数记录仪方框图

在图 1-5 中,测量元件是由电位器 R_Q 和 R_M 组成的桥式测量电路,记录笔就固定在电位器 R_M 的滑臂上,因此,测量电路的输出电压 u_p 与记录笔位移成正比。当有慢变的输入电压 u_r 时,在放大元件输入口得到偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p$,经放大后驱动伺服电动机并通过齿轮减速器及绳轮带动记录笔移动,同时使偏差电压减小。当偏差电压 $\Delta u = 0$ 时,电动机停止转动,记录笔也静止不动。此时 $u_p = u_r$,表明记录笔位移与输入电压相对应。如果输入电压随时间连续变化,记录笔便描绘出相应的电压曲线。

1.2.2 火炮方位角控制系统

采用自整角机作为角度测量元件的火炮方位角控制系统如图 1-7 所示。图中的自