



普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材
上海精品课程教材

自动控制原理

◎ 周武能 主编 ◎ 李曼珍 石红瑞 副主编

ZIDONG KONGZHI YUANLI



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材
上海精品课程教材

自动控制原理

主 编 周武能
副主编 李曼珍 石红瑞
参 编 齐 洁 陈 亮
范 瑾 陆宏谦



机械工业出版社

本书是普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材，也是上海市精品课程“自动控制原理”的主选教材。

本书较系统地介绍了自动控制系统的基本概念、基本原理、主要分析与综合方法、重要校正方法等。全书共分七章，内容包括自动控制系统的结构、数学模型、时域分析方法、根轨迹法、频率响应法、重要校正方法和非线性系统基本理论，各章有 Matlab 分析方法及总结。

本书对基本概念的介绍力求以实际应用为背景，内容精炼、由浅入深，例题精讲，习题精选且附答案或提示，并配有电子教案。全书语言流畅，可读性强。

本书可作为高等院校电气、信息及自动化类各相关专业本科生或专科生的“自动控制原理”课程的教材，也可作为自动化及相关行业的科研人员或工程技术人员的参考书。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录教材服务网 www.cmpedu.com 下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/周武能主编. —北京: 机械工业出版社,
2011. 6

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 34397 - 4

I. ①自… II. ①周… III. ①自动控制理论 - 高等学校
- 教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 078310 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 于苏华 责任编辑: 于苏华 王小东

版式设计: 霍永明 责任校对: 李锦莉

封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2011 年 7 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.25 印张 · 426 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 34397 - 4

定价: 35.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

销售二部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

“自动控制原理”是电气、信息及自动化类本科生的重要专业课,是“现代控制理论”和“计算机控制系统”等后续课程的重要基础课,也是控制工程专业人员的必备知识。几十年来,自动化专业一直是东华大学的重要专业,而“自动控制原理”也是该专业的重要课程。经过多年的教学实践与学科建设,东华大学“自动控制原理”于2009年被批准为上海市精品课程,“控制理论与控制工程”于1990年被批准为二级学科博士点,“控制科学与工程”于2010年被批准为一级学科博士点。结合上海市精品课程建设和一级学科博士点建设,以及普通高等教育“十二五”规划教材建设,在多年教学经验的积累下,我们编著了这本《自动控制原理》。

本书较系统地介绍了自动控制系统的基本概念、基本原理、主要分析与综合方法、重要校正方法等。全书共分七章。第1章绪论,主要介绍自动控制系统的结构、分类、研究任务及发展简史等;第2章自动控制系统的数学模型,主要介绍自动控制系统的微分方程、传递函数、频率特性、框图与信号流图等模型的概念、性质及建模方法,以及各种模型间的相互关系等;第3章自动控制系统的时域分析,主要介绍系统的测试信号、稳定性及劳斯判据、稳态误差和瞬态响应分析等;第4章自动控制系统的根轨迹法,主要介绍根轨迹的概念及绘制方法、根轨迹分析法等;第5章自动控制系统的频率响应法,主要介绍频率特性的概念、极坐标图(奈奎斯特图)和对数坐标图(伯德图)的概念及绘制方法、稳定性的奈奎斯特判据和瞬态性能的频率特性指标等;第6章自动控制系统的校正,主要介绍串联超前校正、串联滞后校正、串联超前-滞后校正和PID控制等;第7章非线性控制系统分析,主要介绍相平面分析法、描述函数法和李雅普诺夫稳定性理论等。各章有相关内容的Matlab分析方法及总结。

本书的重点是自动控制原理,考虑到状态空间法和离散系统分别要在“现代控制理论”和“计算机控制系统”课程中介绍,本书将不涉及这两方面的内容。本书可作为高等院校电气、信息及自动化类各相关专业本科生或专科生的“自动控制原理”课程的教材,一般可用64课时完成本书的教学内容。

本书对基本概念的介绍力求以实际应用为背景,内容精炼、由浅入深,例题精讲,习题精选且附答案或提示,并配有电子教案。全书语言流畅,可读性强。

本书第1章和第2章由周武能和陆宏谦执笔撰写,第3章由齐洁执笔撰写,第4章由李曼珍执笔撰写,第5章由石红瑞执笔撰写,第6章由陈亮执笔撰写,第7章由范瑾执笔撰写。石红瑞和李曼珍对全书进行了仔细的审阅,提出了许多宝贵的修改意见。周武能认真审校了全书,从文字、格式、内容和图表等方面作了大量修改。

本书的写作得到了东华大学信息学院领导和老师们的关心,他们给予了许多鼓励。另外,周武能、石红瑞和李曼珍的几名学生参与了本书部分图稿的绘制和校对工作。在此谨一并向他们表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,诚请广大读者指正。

作 者

目 录

前言		2.5 控制系统的框图与传递函数	29
第1章 绪论	1	2.5.1 框图的绘制方法	29
1.1 引言	1	2.5.2 框图的等效简化	30
1.2 自动控制系统实例	1	2.5.3 框图与传递函数	33
1.2.1 液面高度控制系统	1	2.6 控制系统的信号流图与传递函数	35
1.2.2 位置随动控制系统	3	2.6.1 信号流图的概念	35
1.3 自动控制系统的结构及工作原理	3	2.6.2 信号流图的性质	36
1.4 自动控制系统的类别	5	2.6.3 信号流图与框图的等效	36
1.4.1 开环与闭环控制系统	5	2.6.4 梅逊公式及传递函数	36
1.4.2 线性与非线性控制系统	7	2.7 控制系统数学模型的 Matlab 方法	38
1.4.3 连续与离散控制系统	7	2.7.1 系统微分方程模型的解曲线	38
1.4.4 恒值与随动控制系统	8	2.7.2 多项式的表示及运算	39
1.5 自动控制系统设计的性能要求及任务	8	2.7.3 系统传递函数的表示及运算	40
1.6 自动控制系统理论的发展简史	9	2.8 结语	44
1.7 结语	11	2.9 习题	44
1.8 习题	12	第3章 自动控制系统的时域分析	50
第2章 自动控制系统的数学模型	15	3.1 引言	50
2.1 引言	15	3.2 典型测试信号	50
2.2 控制系统的微分方程模型	16	3.3 控制系统的稳定性	52
2.2.1 微分方程模型建模方法及举例	16	3.3.1 稳定性的概念	52
2.2.2 非线性微分方程模型的线性化	17	3.3.2 劳斯稳定性判据	55
2.2.3 拉普拉斯变换及线性微分方程模型的解	18	3.3.3 相对稳定性和稳定裕量	58
2.3 控制系统的传递函数模型	20	3.4 控制系统的稳态误差	59
2.3.1 传递函数的概念	21	3.4.1 给定稳态误差	59
2.3.2 传递函数的基本性质	22	3.4.2 扰动稳态误差	64
2.3.3 传递函数的表示方法	22	3.5 控制系统的瞬态响应分析	65
2.3.4 典型环节的传递函数	24	3.5.1 瞬态响应指标	65
2.3.5 用拉普拉斯变换求解线性系统的输出	28	3.5.2 一阶系统的瞬态响应	66
2.4 控制系统的频域模型	28	3.5.3 二阶系统的瞬态响应	68
		3.5.4 零、极点对二阶系统瞬态响应的影	77
		3.5.5 高阶系统的瞬态响应	79
		3.6 时域分析的 Matlab 方法	83
		3.6.1 单位阶跃响应	83
		3.6.2 单位脉冲响应	85

3.6.3 一般输入信号下的响应	86	5.5 控制系统稳定性的奈奎斯特判据	161
3.7 结语	87	5.5.1 围线映射及辐角原理	162
3.8 习题	88	5.5.2 奈奎斯特稳定性判据	163
第4章 自动控制系统的根轨迹法	92	5.5.3 奈奎斯特稳定性判据的应 用举例	165
4.1 引言	92	5.5.4 对数坐标图的奈奎斯特稳 定性判据	172
4.2 根轨迹的基本概念	92	5.6 控制系统瞬态性能的频率特性 指标	175
4.2.1 根轨迹	92	5.6.1 稳定裕度	175
4.2.2 根轨迹与系统性能的关系	93	5.6.2 相位裕量	176
4.2.3 闭环零、极点与开环零、极 点的关系	94	5.6.3 增益裕量	177
4.3 根轨迹的幅值条件及相角条件	95	5.6.4 开环频率特性与时域响应的 关系	179
4.4 根轨迹的绘制步骤	96	5.6.5 闭环频率特性指标	184
4.5 控制系统的根轨迹分析	107	5.7 频率响应的 Matlab 方法	188
4.5.1 利用根轨迹确定系统的有 关参数	107	5.7.1 用 nyquist (sys) 绘制极坐标图 (奈奎斯特图)	188
4.5.2 开环零、极点对根轨迹的 影响	108	5.7.2 用 bode (sys) 绘制对数坐标图 (伯德图)	191
4.5.3 参数变化对闭环极点的影响	109	5.7.3 用 margin (sys) 计算增益裕量 和相位裕量	192
4.6 根轨迹的 Matlab 方法	115	5.8 结语	193
4.6.1 绘制系统的零、极点分布图	115	5.9 习题	195
4.6.2 绘制系统的根轨迹	116	第6章 自动控制系统的校正	201
4.6.3 根轨迹与系统性能	120	6.1 引言	201
4.7 结语	125	6.2 串联超前校正	202
4.8 习题	125	6.2.1 超前校正网络	202
第5章 自动控制系统的频率响应法	133	6.2.2 基于根轨迹的超前校正	204
5.1 引言	133	6.2.3 基于对数坐标图的超前 校正	206
5.2 频率特性	133	6.3 串联滞后校正	208
5.2.1 频率特性的基本概念	133	6.3.1 滞后校正网络	208
5.2.2 频率特性的求取	136	6.3.2 基于根轨迹的滞后校正	210
5.3 频率特性的几何表示方法	138	6.3.3 基于对数坐标图的滞后 校正	212
5.3.1 极坐标图(奈奎斯特图)	138	6.4 串联超前-滞后校正	214
5.3.2 典型环节的极坐标图	139	6.4.1 超前-滞后校正网络	214
5.3.3 对数坐标图(伯德图)	142	6.4.2 基于根轨迹的超前-滞 后校正	215
5.3.4 基本因子的对数坐标图	142	6.4.3 基于对数坐标图的超前- 滞后校正	217
5.4 控制系统开环频率特性的绘制	151		
5.4.1 开环极坐标图的绘制	151		
5.4.2 开环对数坐标图的绘制	153		
5.4.3 最小相位系统和非最小相 位系统	157		
5.4.4 频率特性函数的几项重要 性质	158		

VI 自动控制原理

6.5 比例-积分-微分 (PID) 控制	219	7.3.1 相平面分析的基本概念	241
6.5.1 比例 (P) 控制	219	7.3.2 绘制相轨迹	244
6.5.2 比例-积分 (PI) 控制	220	7.3.3 线性系统的相平面分析	245
6.5.3 比例-微分 (PD) 控制	222	7.3.4 非线性系统的相平面分析	249
6.5.4 比例-积分-微分 (PID) 控制	223	7.4 李雅普诺夫理论	251
6.6 利用 Matlab 进行系统设计	224	7.4.1 非线性系统与平衡点	251
6.7 结语	231	7.4.2 稳定的概念	254
6.8 习题	231	7.4.3 线性化与局部稳定性	255
第7章 非线性控制系统分析	234	7.4.4 李雅普诺夫直接法	256
7.1 引言	234	7.5 描述函数法	259
7.2 控制系统中常见的非线性因素与 性态	236	7.5.1 描述函数的基本概念	260
7.2.1 常见的非线性因素及等效 增益	236	7.5.2 典型非线性特性的描述 函数	262
7.2.2 非线性系统的性态	238	7.6 结语	266
7.3 相平面分析	240	7.7 习题	266
		参考文献	269

第1章 绪 论

本章先通过几个工程实例介绍自动控制系统的结构及工作原理，接着按控制方式（或信号的传递路径）、输入-输出特性、内部传输信号的性质、参考输入信号的变化规律等四种分类方法将自动控制系统进行分类，最后介绍自动控制系统理论的研究任务和发展简史。

1.1 引言

什么叫自动控制系统？这是初学者普遍关心的问题。其实，细心观察一下周围的事物就不难发现其中的控制思想。例如，冰箱温控系统控制的目标是冰箱中冷藏室和冷冻室里的温度，若设置冷藏室的温度为 5°C ，冷冻室的温度为 -18°C ，冰箱中的传感器用于测量两室的温度。当两室之一的温度高于相应的设定值时，压缩机开始制冷工作，直至该室的温度达到其设定值为止。再例如，风力发电机的叶片迎风控制系统，当自然风向变化时，该系统测得风向的变化角度 α 后，起动控制装置去带动叶片轴转动直至迎风的方向。

从上述两个例子可以大致得出，所谓自动控制系统是不需要人的直接参与，利用控制器使被控对象的某些物理量或称被控量按照指定的规律变化的系统^[1-3]。

自动控制系统的例子不胜枚举，它广泛存在于工业、农业、军事、航天、交通、能源、生物乃至社会科学等领域。其被控量也是多种多样的，如温度、压力、流量、电压、转速、位移、角度和力等。

自动控制方法发展至今已形成了一门非常成熟的理论和技术。自动控制技术的广泛应用，不仅使生产设备或生产过程实现了自动化，极大地提高了生产效率和产品质量，改善了劳动条件，减少了劳动强度，而且在人类征服大自然、探索新能源、发展空间技术、节能减排、防灾减灾和改善人民生活等方面都发挥了极其重要的作用^[4]。

自动控制技术还是一门综合性技术。就某个自动控制系统而言，设计者首先要通晓该系统的工作原理、各个装置的特性，然后利用控制器的分析与设计知识去设计控制器，并取得预期的控制效果。

1.2 自动控制系统实例

为了对自动控制系统有一个较清晰的理解，下面列举两个实例，用以说明自动控制系统的结构和工作原理。

1.2.1 液面高度控制系统

例 1-1 液面高度控制系统。

以下分手动和自动两种情形说明控制系统的结构和工作原理^[4]。

1) 液面高度人工控制系统

2 自动控制原理

系统如图 1-1 所示， V_1 为出水阀， V_2 为进水阀， h_0 为要求的液面高度。

在这个系统中，被控对象是水池。人要用眼睛去观测液面高度 h ，并用大脑与期望的高度 h_0 进行比较，当 h 大于 h_0 时，用手往减小的方向调节进水阀，直至液面高度降至要求的高度以完成控制。这个系统中大体有被控对象（水池）、测量装置（眼睛）、比较装置（大脑）、控制装置（手）、执行装置（阀）等，其工作原理如图 1-2 所示。

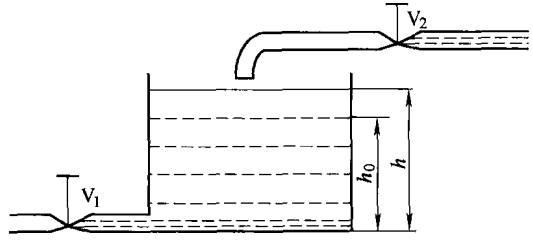


图 1-1 液面高度人工控制系统

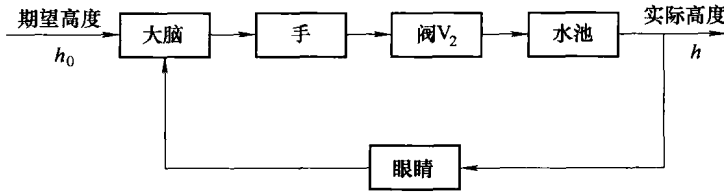


图 1-2 液面高度人工控制系统工作原理

人工控制的不足主要是控制的准确度不够以及劳动强度大等。

2) 液面高度自动控制系统

系统如图 1-3 所示， V_1 为出水阀， V_2 为进水阀， h_0 为要求的液面高度。

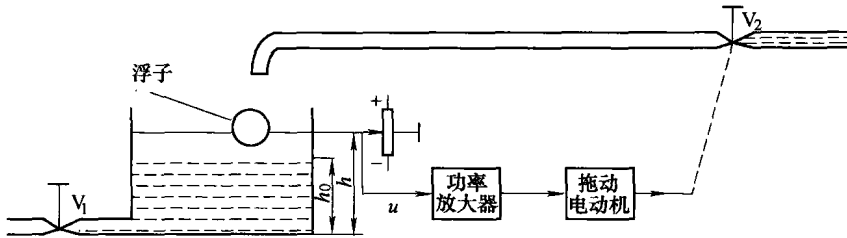


图 1-3 液面高度自动控制系统

在这个系统中，被控对象是水池。当水池液面高度因出水阀 V_1 开度的增大而有所降低时，通过浮子检测到实际高度 h ，利用比较装置得到一个误差值，系统立即产生一个与误差值成比例的误差电压 u ，该电压经放大器放大后供给进水阀 V_2 的拖动电动机，使阀 V_2 的开度相应地增大，直至使水池的液面高度恢复到所期望的高度 h_0 。这个系统中有被控对象（水池）、测量装置（浮子）、比较装置（内置）、控制装置（功率放大器）、执行装置（拖动电动机和阀）等，其工作原理如图 1-4 所示。

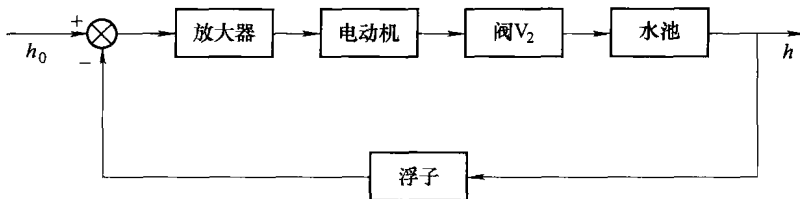


图 1-4 液面高度自动控制系统工作原理

自动控制克服了人工控制的不足，提高了工作效率。

1.2.2 位置随动控制系统

例 1-2 位置随动控制系统。

图 1-5 所示是一个位置随动控制系统^[4]。

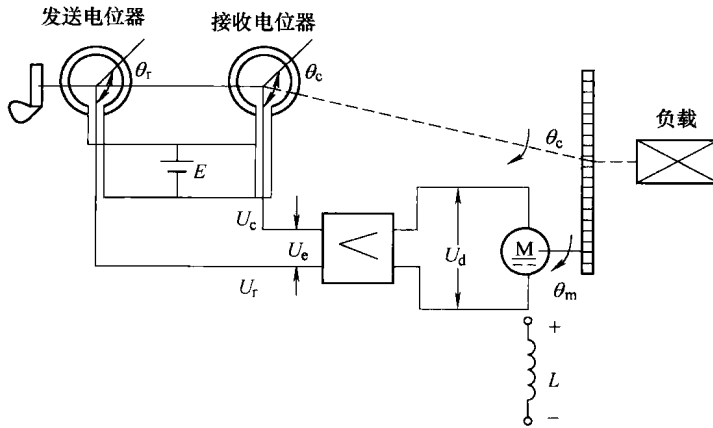


图 1-5 位置随动控制系统

该系统是用一对电位器作为位置的测量装置，它们分别把系统的输入与输出的位置信号转换成与之成比例的电信号，并进行比较。当发送电位器和接收电位器的转角相等时， $U_r = U_c$ ， $U_e = U_d = 0$ ，电动机处于静止状态。若使发送电位器的动臂按逆时针方向增加一个角度 $\Delta\theta_r$ ，此时由于 U_r 大于 U_c 而产生一个相应的误差电压 U_e ，经放大器放大后供电给直流电动机，使之带动负载和接收电位器的动臂一起旋转，一直到 $\theta_r = \theta_c$ 为止。

这个系统中有被控对象（减速器）、测量装置（电位器）、比较装置（内置）、控制装置（功率放大器）、执行装置（电动机）等，其工作原理如图 1-6 所示。

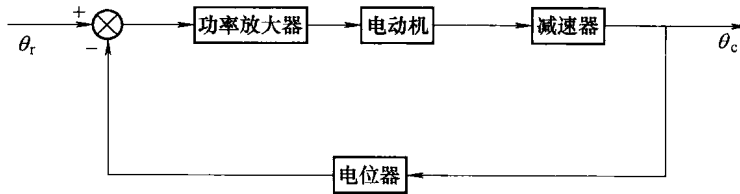


图 1-6 位置随动控制系统的工作原理

自动控制系统的例子还有很多，读者可参见文献[1] ~ [6]。

1.3 自动控制系统的结构及工作原理

从节 1.2 中的两个例子可得出自动控制系统的般结构和工作原理，如图 1-7 所示。下面分别说明图 1-7 中的各个部分。

被控对象：具有某种被控量（如高度、位移、温度等）的装置或元件。

4 自动控制原理

系统输出：被控量的当前值。系统输出的值也称为被控量或被控参数，通常用字母 y 表示。

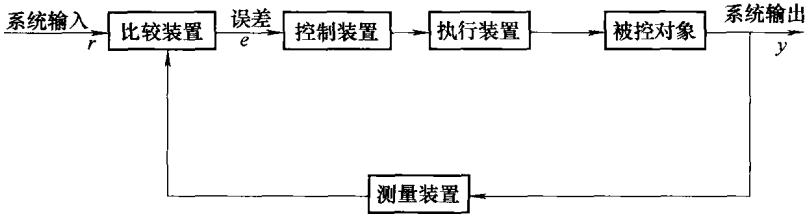


图 1-7 自动控制系统的结构和工作原理

测量装置：用于测量被控量的当前值，测量装置一般由传感器构成。

系统输入：被控量的期望值。系统输入也称为期望值或给（设）定值或参考输入等，通常用字母 r 表示。

比较装置：用于计算被控量的当前值与期望值之差，此差值一般称为误差或偏差，用字母 e 表示。

控制装置：基于被控量的误差值，用某种手段使此误差值变为零的装置，比如功率放大器，当测量装置测得的信号与给定信号比较后得到的误差信号不足以使执行装置动作时，加装放大装置，可以提高系统的控制准确度。控制装置也称为控制器。

执行装置：用于直接驱动被控对象，使被控量达到期望值。执行装置也称为执行器。

一般的自动控制系统都可归结为图 1-7 所示的结构，其中有些装置可以由多个元件组成。只是对于不同的自动控制系统，各个部分的具体含义各不相同而已。此外，为了改善控制系统的瞬态和稳态性能，通常还在系统中加上某种形式的校正装置。

在控制工程中，工作原理一般用框图表示。其中，用方框表示系统中的各个装置，在每个方框中填入它所表示的装置名称或其功能函数表达式，而不必画出它们的具体结构。根据信号在系统中的传递方向，用有向线段依次把它们连接起来，有向线段上方或下方一般用一个量来标记，指向方框的有向线段表示该方框所示装置的输入，由方框引出的有向线段表示该方框所示装置的输出。若一条有向线段连接两个方框，则它既表示起始框的输出，又表示终止框的输入。这样就得到整个控制系统的框图。

控制系统的框图一般由如图 1-8 所示的三种基本单元构成。

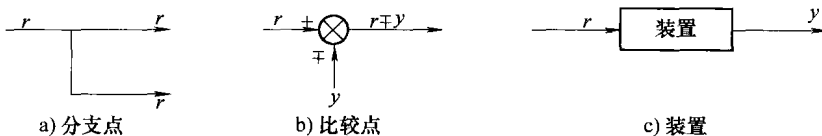


图 1-8 控制系统框图的基本单元

由此可画出一般的控制系统的框图，如图 1-9 所示。

从图 1-9 所示系统框图可看出系统的工作原理。即首先由测量装置测定系统被控对象的被控量的实际输出 $y(t)$ ，将它送入比较装置与参考输入 $r(t)$ 进行比较，得出差值 $e(t)$ 。接着由控制器基于这一差值，根据某种控制手段得到一个转换量 $u(t)$ ，并将它送入执行器。最后由执行器直接驱动被控对象以达到控制效果。

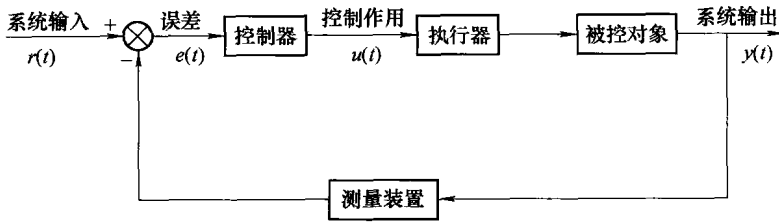


图 1-9 一般的控制系统的框图

更一般的自动控制系统的框图如图 1-10 所示^[3]。

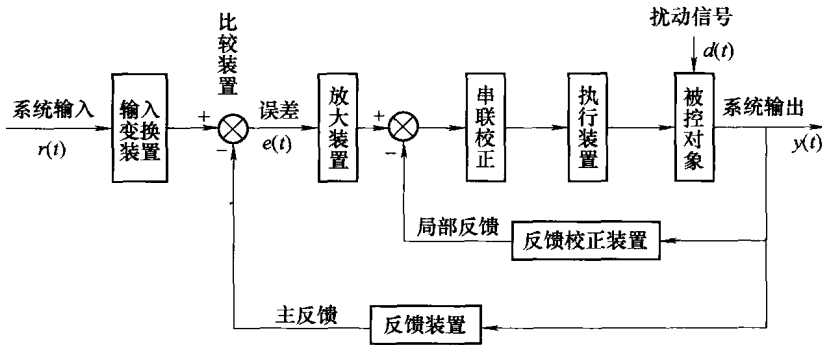


图 1-10 更一般的自动控制系统的框图

图 1-10 中，新增装置有以下几种：

输入变换装置：将输入信号转换成比较装置要求的物理量，通常是电压。

反馈校正装置：用于改善系统的瞬态和稳态性能。串联校正装置是串联在系统前向通道中的校正装置，而在系统局部反馈回路内部接入的反馈装置称为反馈校正装置。简单的校正装置可以是一个阻容网络，复杂的校正装置可以是一台微型计算机。

扰动信号：除输入信号外，影响系统输出的其他输入统称为扰动信号。扰动信号一般用 $d(t)$ 表示。

1.4 自动控制系统的类别

虽然自动控制系统千差万别，但总可以将它们进行分类。分类的标准不同，所分的类别也不相同：按系统的控制方法（或信号的传递路径）分类，可分为开环控制系统与闭环控制系统；按系统的输入/输出特性分类，可分为线性系统与非线性系统；按系统内部传输信号的性质分类，可分为连续系统与离散系统；按系统参考输入信号的变化规律分类，可分为恒值系统与随动系统。下面分别介绍这四种分类方法所得到的系统。

1.4.1 开环与闭环控制系统

1. 开环控制系统

若一个控制系统不存在将输出量与参考输入进行比较的装置，即控制系统不存在反馈通道，则称这种控制系统为开环控制系统。其框图如图 1-11 所示。

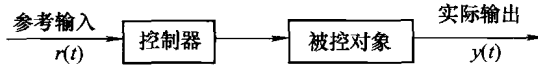


图 1-11 开环控制系统框图

例 1-3 计算机开环控制机床。

典型的开环控制系统是工业用微型计算机开环控制机床，如图 1-12 所示^[3]。

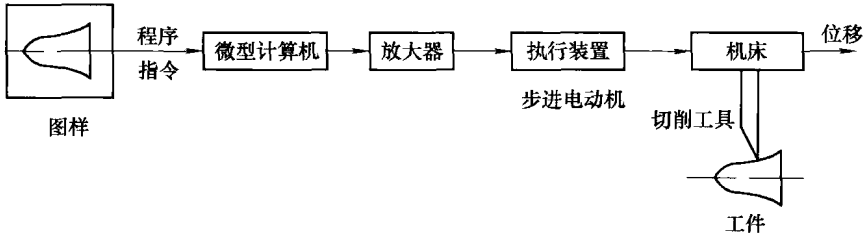


图 1-12 微型计算机开环控制机床

微型计算机开环控制机床的工作原理是：根据设计要求，编写加工过程指令并存入微型计算机。微型计算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装置（步进电动机），驱动机床运动以完成程序指令的要求。

开环控制系统的显著特点是系统的输出不会对控制作用发生影响。其次，开环控制系统结构简单、使用成本较低，系统也容易稳定。然而，由于没有反馈装置，所以一旦系统受到干扰，被控量偏离原来的平衡状态，系统就没有消除误差的能力了，这将导致控制的准确度不高。这是开环控制系统的最大的缺点。

2. 闭环控制系统

若将系统被控量的实际输出通过测量装置反馈到系统的输入端，并与参考输入进行比较，产生误差信号，利用控制器产生控制信号以减小系统误差，则称这样的系统为闭环控制系统。由于反馈的存在，闭环控制系统又称为反馈控制系统。其系统框图如图 1-9 和图 1-10 所示。

比如，例 1-1 中的液面高度控制系统和例 1-2 中的位置随动控制系统等都是反馈控制系统。

例 1-4 计算机闭环控制机床。

在例 1-3 的微型计算机开环控制机床中，若添加反馈测量装置，则构成如图 1-13 所示的闭环控制系统。

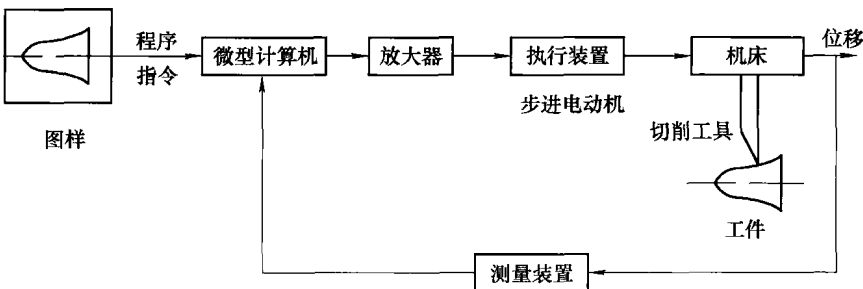


图 1-13 微型计算机闭环控制机床

微型计算机闭环控制机床的工作原理是：系统反馈装置把切削工具的实际位置送给计算机，与程序指令进行比较，经计算机处理后发出控制信号，再经放大器放大后驱动执行装置，就可以减小由各种原因产生的系统误差。

与开环控制系统相反，闭环控制系统的主要特点在于系统的输出对控制作用产生直接影响，控制作用是由参考输入与反馈信号的差值来产生的。控制系统引入反馈装置的主要优点有以下几个方面：

- 1) 能减小因参数变化而造成的影响。
- 2) 使系统响应速度变快。
- 3) 控制或部分消除扰动信号的影响。
- 4) 减小稳态误差。

基于以上这些优点，工程上一般采用反馈控制系统。然而反馈控制系统的结构比较复杂而造成使用成本较高。另外，如果系统参数配置不当，则闭环系统容易产生振荡，导致系统稳定性下降而不能正常工作。这就是闭环控制系统的主要缺点。

1.4.2 线性与非线性控制系统

1. 线性控制系统

若控制系统的所有元件都具有线性特性，则称之为线性控制系统。线性控制系统的数学模型（即系统的输入与输出的关系）一般由线性微分方程表达。

线性系统的主要特点是具有叠加性和齐次性。这里所说的叠加性是指：若系统的任意输入 $r_1(t)$ 、 $r_2(t)$ 对应系统的输出分别为 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ ，则系统的输入 $r_1(t) + r_2(t)$ 所对应的系统的输出为 $y_1(t) + y_2(t)$ 。而齐次性是指：若系统的任意输入 $r(t)$ 对应系统的输出为 $y(t)$ ，则对任意常数 α 而言，系统的输入 $\alpha r(t)$ 所对应的系统的输出为 $\alpha y(t)$ 。同时具有叠加性和齐次性的控制系统就是线性系统。容易得出线性系统具有下述线性特性：若系统的任意输入 $r_1(t)$ 、 $r_2(t)$ 对应系统的输出分别为 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ ，则对任意两个常数 α_1 、 α_2 而言，系统的输入 $\alpha_1 r_1(t) + \alpha_2 r_2(t)$ 所对应的系统的输出为 $\alpha_1 y_1(t) + \alpha_2 y_2(t)$ 。

2. 非线性控制系统

若控制系统中至少有一个元件不具有线性特性，则称之为非线性控制系统。非线性系统不满足线性特性，这是它与线性系统的本质差别。

严格地说，绝对的线性系统是不存在的，这是因为所有的物理系统和元件都不同程度上具有非线性特性。然而，为了简化对控制系统的分析与设计，在误差允许的范围内，人们往往将非线性系统局部线性化。这样，在某种范围内，非线性系统就近似为线性系统，从而可用线性系统的理论去分析和设计非线性系统。

值得注意的是，为了改善控制系统的性能，工程上常常人为地引入某种非线性元件。例如为了实现最短时间控制，常采用开关型（Bang-Bang）控制方式。

1.4.3 连续与离散控制系统

1. 连续控制系统

若控制系统中各部分的信号都是时间 t 的函数，则称之为连续控制系统。比如例 1-1 中的液面高度控制系统和例 1-2 中的位置随动控制系统等都是连续控制系统。

2. 离散控制系统

若控制系统各部分的信号中至少有一个是时间 t 的离散信号，则称之为离散控制系统。常见的离散信号有脉冲信号和数字信号等。例如，图 1-14 所示的计算机控制系统就是较常见的离散控制系统。

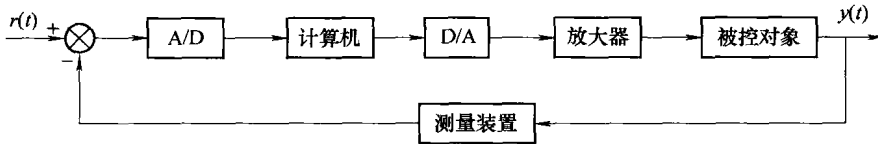


图 1-14 计算机控制系统的框图

1.4.4 恒值与随动控制系统

1. 恒值控制系统

若控制系统的参考输入为常量，则称之为恒值控制系统。恒值控制系统要求被控量在任何扰动下都以一定的准确度接近参考输入量。工业生产中的恒温、恒压等自动控制系统就属于恒值控制系统。例如，例 1-1 中的液面高度控制系统就是一个恒值控制系统。

恒值控制系统主要研究如何克服各种扰动对系统输出的影响。

2. 随动控制系统

若控制系统的参考输入是一个随时间变化的量，则称之为随动控制系统。如例 1-2 中的位置随动控制系统就是一个随动控制系统。

随动控制系统要求系统的被控量能快速、准确地跟随参考输入信号的变化而变化。

1.5 自动控制系统设计的性能要求及任务

由节 1.4.4 知，恒值控制系统的任务主要是使系统的被控量不受外界扰动的影响，系统的输出尽量与参考输入信号所要求的期望输出值接近。而随动控制系统的任务主要是要求系统的输出能准确、迅速地重现参考输入信号的变化规律。在工程实际中，这些要求并不能百分之百地被满足，而只能部分地得到实现。其主要原因是系统中总存在着一些不同特性的储能元件，比如机械的惯性、电路中的电容与电感等。在这种情况下，即使在系统中加装了校正装置，系统的误差也不会立即被完全减小到零。另外，由于系统具有的能源功率有限、系统的放大能力有限，导致系统的运动加速度也有限，从而相应的速度和位移就不可能瞬间发生突变，而必须经历较长一段时间。这段时间就是系统的瞬态响应过程。再者，测量元件本身在制造上的精细度所造成的误差和机械传动间隙所引起的误差等因素，也都会影响系统的控制效果。因此对于控制系统的设计问题，可以只要求系统在某种可能的范围内设计的效果满足其技术上的标准。

自动控制系统的性能一般从稳定性、响应速度和稳态误差等三方面来评价。

1. 稳定性

稳定性是控制系统首先要满足的性能。一个不稳定的控制系统是没有实际意义的。所谓稳定的系统，粗略地说就是，当系统受到外界干扰时，系统的输出（被控量）一般会偏离

原来的平衡状态，而在扰动撤离后，系统会在一定的时间范围内恢复到原有的平衡状态。一个稳定的系统，当其内部参数、初始条件和外部环境稍有改变时，仍能正常地进行工作。正是由于系统在工作过程中会产生内部参数、初始条件和外部环境的变化，所以在进行系统设计时，不仅要使系统稳定，而且还要使系统具有一定的稳定裕量。

2. 响应速度

控制系统在稳定的前提下，还必须具有响应的快速性。所谓快速性就是，当系统在突加扰动时，被控量不仅能在一定的时间内从偏离状态回到平衡状态，而且能尽快恢复到原有的稳态值。快速性对于机械、化工等工业控制系统来说是一个十分重要的性能指标。

3. 稳态误差

系统稳态精度通常用它的稳态误差的大小来衡量。所谓系统的稳态误差是指，在参考输入信号作用下，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。显然，系统的稳态误差越小，系统的输出跟随参考输入的精度就越高。另一方面，系统在扰动信号作用下，输出必然会偏离原平衡状态。在系统施加自动调节作用后，其输出量会逐渐向原平衡状态方向恢复，直至达到稳态。当系统达到稳态后，系统的输出量若不能恢复到原平衡状态时的稳态值，则必然产生一个差值，这个差值就叫做扰动稳态误差。显然，系统的扰动稳态误差越小，系统抗干扰的能力就越强，其稳态精度也越高。

需要说明的是，对特定的控制系统，以上三方面的性能是有所侧重的，例如恒值系统侧重于稳定性和抗干扰的能力，而随动系统对快速性和稳态精度的要求较高。

一般来讲，控制系统在工作过程中，系统的瞬态稳定性与瞬态响应的快速性和高精度不能同时被满足。例如，要提高系统瞬态响应的快速性和稳态精度，就要增大系统的放大能力，而系统放大能力的增大，必然导致系统瞬态性能的变差，甚至会使系统不稳定。反过来，若过份强调系统瞬态过程的平稳性，则系统的放大倍数就应变小，而系统放大倍数的变小必然会导致系统稳态精度的降低以及瞬态过程的缓慢。这样，系统的瞬态稳定性与瞬态响应的快速性和高精度之间就形成了一对矛盾。

如何解决这个矛盾，正是自动控制系统的分析与设计所要研究的两大课题^[4]：

1) 对于一个具体的控制系统，如何从理论上对它的瞬态性能和稳态精度进行定性的分析和定量的计算。

2) 根据对系统性能的要求，如何合理地设计校正装置，使系统的性能尽可能全面地满足技术上的要求。

1.6 自动控制系统理论的发展简史

利用反馈控制对系统实施控制有着悠久的历史。

近代欧洲最早发明的反馈系统是荷兰人 Cornelis Drebbel (1572—1633) 发明的温度调节器。Dennis Papin (1647—1712) 则在 1681 年发明了第一个锅炉压力调节器，该调节器是一种安全调节装置，与目前压力锅的减压安全阀类似。

一个得到公认的事实是：自动控制技术最初产生于 18 世纪 60 年代。

俄国人断言：最早的具有历史意义的反馈系统是由波尔祖诺夫 (Polzunov I.) 于 1765 年发明的用于水位控制的浮球调节器，它用浮筒与杠杆操纵蒸汽锅炉的进水阀门以调节锅炉

水位。

人们普遍认为最早应用于工业过程的自动反馈控制器是瓦特 (James Watt) 于 1769 年发明的飞球调节器, 它用来控制蒸汽机的转速。

1868 年以前, 自动控制系统发展的主要特点是凭借直觉的实证性发明。提高控制系统准确度的不懈努力导致人们要解决瞬态振荡问题, 甚至是系统的稳定性问题, 因此发展自动控制理论便成了当务之急。

麦克斯韦 (Maxwell J. C.) 于 1868 年首先用微分方程建立了一类调节器的模型, 发展了与控制理论相关的数学理论, 其工作重点在于研究不同系统参数对系统性能的影响。在同一时期, 维什聂格拉茨基 (Vyshnegradskii I. A.) 建立了调节器的数学理论。

1877 年劳斯 (Routh E. J.) 提出了稳定性的一种代数判据, 1895 年赫尔维茨 (Hurwitz A.) 又提出了稳定性的另一种判据。后来证明, 稳定性的这两种代数判据是等价的。

二战之前, 控制理论及应用在美国和西欧的发展与它在俄国和东欧的发展采取了不同的途径。在美国, 伯德 (Bode)、奈奎斯特 (Nyquist) 和布莱克 (Black) 等人在贝尔 (Bell) 电话实验室对电话系统和电子反馈放大器所做的研究工作, 是促进反馈系统应用的主要动力。他们所采用的带宽等频域变量术语的频域方法当初主要用来描述反馈放大器的工作情况。1932 年奈奎斯特建立了稳定性判据。与此相反, 在前苏联, 一些著名的数学家和应用力学家发展和主导着控制理论, 因而他们倾向于用微分方程描述系统的时域方法。

二战期间, 自动控制理论及应用得到了巨大的发展。战争需要用反馈控制的方法设计和建造飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统以及其他军用系统。在设计技术方面, 频率响应法迅速推广到机械、航空、航海和化工等领域, 形成了统一的严谨的理论体系。战后出版了一大批优秀教科书和专著, 使频域思想迅速推广和普及。由于雷达的应用, 许多火力控制系统要求处理离散的数据, 因而奈奎斯特稳定性判据被推广到了离散数据形式。拉格基尼 (Ragazzini J. R.) 等在教科书中叙述了与连续系统中的 s 变换方法相平等的 z 变换方法。艾文斯 (Evans W. R.) 于 1948 年提出了根轨迹法, 他运用复变函数方法解决了当线性系统开环增益变化时判断闭环系统的特征频率如何变化的问题。

维纳 (Wiener N.) 于 1948 年出版了名著《控制论 (或关于在动物与机器中控制和通信的科学)》(汉译本由郝季仁译, 科学出版社, 1961)。书中首次提出了“控制论”作为这门学科的名称。

到 20 世纪 50 年代, 频率响应法已经成为控制领域中居主导地位的方法。框图、传递函数、极坐标图 (奈奎斯特图)、对数坐标图 (伯德图)、描述函数、根轨迹等概念和方法, 都已是相关人士所熟知的有效且方便的工具, 就连随机扰动的作用也已能用频率响应的方法来表示。20 世纪 20 年代以前那种时间域方法主导一切的局面为之一变。

然而, 计算机的问世使形势又一次发生了变化。对多变量控制问题的研究导致了最优控制理论的产生。1963 年苏联的庞特里亚金 (Pontryagin L. S.) 提出的极大值原理奠定了最优控制理论的基础。事实上, 最优控制问题的研究起源于常微分方程组的控制问题, 而 1892 年庞卡莱 (Poincare H.) 就系统地处理了这个问题, 1907 年李雅普诺夫 (Lyapunov A. M.) 发表了关于稳定性的著名论著。这些形成了状态空间法的理论基础。贝尔曼 (Bellman R.) 的动态规划研究的也是约束下的动态优化问题。贝尔曼揭示了状态概念对于许多决策问题与控制问题的重要意义。卡尔曼 (Kalman R. E.) 于 1960 年基于状态概念深入解决了二次型