



21 世纪高等学校规划教材  
Textbook Series of 21st Century

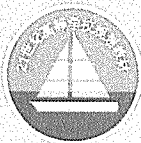
# 自动控制原理

杨平 翁思义 郭平 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



21 世纪高等院校规划教材

中国海洋出版社 (SINO OCEAN PRESS) 北京 100028

# 内 容 提 要

## 内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书比较全面地介绍了自动控制系统分析与设计的基本理论和应用技术。内容包括：控制系统的数学模型，控制系统的时域分析与系统设计导论，控制系统的根轨迹分析与设计、频域分析与设计、状态空间分析与设计、离散控制系统的分析与设计以及非线性控制系统的分析。所选内容都是目前常用的控制理论和应用技术中最基础的部分，所以特别适用于想要了解和掌握自动控制技术的初学者进行入门学习。

本书可以作为普通高校工科电气信息类专业（自动化、电气工程及自动化、信息工程）、仪器仪表类专业、机械类专业、能源动力类专业以及应用自动化技术的相关专业的课程教材，也可供从事自动化科技的工程技术人员学习参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/杨平, 翁思义, 郭平编著. —北京:  
中国电力出版社, 2006  
21 世纪高等学校规划教材  
ISBN 7 - 5083 - 4638 - 6

I. 自... II. ①杨... ②翁... ③郭...  
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 (2006) 第 094638 号

中国电力出版社出版、发行  
(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)  
北京同江印刷厂印刷  
各地新华书店经售

\*  
2006 年 9 月第一版 2006 年 9 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.5 印张 599 千字  
印数 0001—3000 册 定价 36.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

## 前 言

在自动控制技术被广泛应用的今天,越来越多的人想要了解和掌握自动控制原理,尤其是那些可能从事和接触自动化科技的科技人员。学习自动控制原理课程就成为熟悉自动控制的基础知识、理解控制系统的工作原理及掌握自动控制系统的分析和设计基本技能的主要途径。学习自动控制原理课程首先需要有一本好的教材。这对于学生来说,是请到了一个好的书本教师,而对于教授此课的教师来说,是得到了一个精心设计的参考教案。对于这个学生和教师在几个月的课程学习中共同依赖的课本,自然有许多理想特性的期待。这些期待也正是我们编书者的努力目标。

就知识点的分布而言,本书有较大的宽度,可以覆盖常用的原理性的全部基础知识。

就论述知识的深度而言,本书采用以建立基本概念和掌握基本技能够用为度的原则。因为所讲述的多种分析方法都是前人精心开发并已得到理论证明和多年实践检验的,所以本书不加证明地直接引用,只是为了让学生在有限时间内学习更多的有用知识和掌握更本质的概念和技能。为此,学生也应当采用“拿来先用”和“边用边理解其本质”的学习策略。

就自动控制原理课程的本质而言,本书突出的是自动控制系统的特性分析方法和控制器的初步设计理念。我们所期待的一个控制工程师或科技人员面对一个自动控制系统时可表现的能力是:首先,他会用方框图变换或信号流图法将该系统分解成环节或综合成大的系统;其次,他会用机理建模或实验建模法建立系统的数学模型。可能且传递函数,且其太去积形书

拒绝先进工具的使用,而是因为已有了配套的教材(见 2005 年中国电力出版社出版的杨平等编的《自动控制原理学习辅导》和《自动控制原理实验与实践》)。再者,本书也考虑到了建立基本概念比会用工具更重要,有限的篇幅只宜于突出有限的重点。

本书的第一、二、三、五、九章由翁思义编写,第四、六、八章由杨平编写,第七章由郭平编写,全书的统稿由杨平和翁思义完成。

本书全稿是请同济大学蒋式勤教授仔细审阅的,并且已按其审稿意见认真修改过。在此表示感谢。

对于本书中可能出现的错误和不妥之处,恳请来信批评指正(yangping1201@126.com)。

作 者

2006 年 7 月

## 目 录

前言	
第一章 绪论	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 反馈控制系统的基本概念	5
§ 1.3 自动控制系统的组成和方框图	5
§ 1.4 自动控制系统的分类	6
§ 1.5 控制系统性能分析	10
§ 1.6 自动控制系统的性能要求	13
习题	14
第二章 控制系统的数学模型	16
§ 2.1 引言	16
§ 2.2 机理分析建模方法	16
§ 2.3 传递函数	24
§ 2.4 典型环节的动态特性和传递函数	26
§ 2.5 系统方框图的等效转换和信号流图	35
§ 2.6 状态空间模型	43
§ 2.7 实验建模方法	46
§ 2.8 PID 控制器	56
习题	64
第三章 控制系统的时域分析	68
§ 3.1 引言	68
§ 3.2 时域性能指标	68
§ 3.3 一阶系统的时域分析	71
§ 3.4 二阶系统的时域分析	74
§ 3.5 高阶系统的动态响应及简化分析	84
§ 3.6 零极点分布对系统动态响应的影响	87
§ 3.7 控制系统的稳定性与代数判据	90
§ 3.8 控制系统的稳态误差分析及误差系数	101
§ 3.9 李亚普诺夫稳定性分析	109
习题	114
第四章 控制系统设计导论	117
§ 4.1 引言	117
§ 4.2 系统结构设计	119
§ 4.3 控制规律选择	120

§ 4.4	控制器参数整定	121
§ 4.5	串级控制系统	123
§ 4.6	多闭环控制系统	125
§ 4.7	比值控制系统	127
§ 4.8	前馈控制系统	128
§ 4.9	解耦控制系统	131
§ 4.10	延迟补偿控制系统	133
§ 4.11	其他控制系统	134
	习题	138
<b>第五章</b>	<b>控制系统的根轨迹分析与设计</b>	<b>140</b>
§ 5.1	引言	140
§ 5.2	根轨迹的基本概念	140
§ 5.3	绘制根轨迹图的规则和方法	145
§ 5.4	开环零极点对根轨迹的影响	156
§ 5.5	控制系统的根轨迹分析与设计	160
§ 5.6	参变量根轨迹族	165
§ 5.7	零度根轨迹	168
	习题	171
<b>第六章</b>	<b>控制系统的频域分析与设计</b>	<b>172</b>
§ 6.1	引言	172
§ 6.2	频率特性的基本概念	172
§ 6.3	频率特性的极坐标图	173
§ 6.4	频率特性的对数坐标图	180
§ 6.5	控制系统的奈氏图分析	188
§ 6.6	控制系统的伯德图分析	198
§ 6.7	闭环系统频率特性分析	204
§ 6.8	控制系统的频域分析与设计	210
	习题	219
<b>第七章</b>	<b>离散控制系统的分析与设计</b>	<b>222</b>
§ 7.1	引言	222
§ 7.2	连续信号的采样和复现	223
§ 7.3	离散控制系统的数学模型	226
§ 7.4	离散控制系统的性能分析	233
§ 7.5	离散控制系统的设计	242
	习题	258
<b>第八章</b>	<b>控制系统的状态空间分析与设计</b>	<b>261</b>
§ 8.1	引言	261
§ 8.2	连续状态方程的解	261
§ 8.3	离散状态方程的解	264

§ 8.4	连续状态方程与离散状态方程之间的转换	265
§ 8.5	状态转移矩阵的计算	266
§ 8.6	单变量连续系统状态空间描述的标准形	271
§ 8.7	化为标准形的变换	279
§ 8.8	系统的稳定性、能控性和能观性分析	282
§ 8.9	线性定常系统的结构分解	289
§ 8.10	闭环控制系统的状态空间分析	292
§ 8.11	用极点配置法设计状态控制器	296
§ 8.12	用极点配置法设计状态观测器	299
§ 8.13	最优控制概论	303
	习题	307
<b>第九章</b>	<b>非线性控制系统的分析</b>	<b>310</b>
§ 9.1	引言	310
§ 9.2	非线性系统的描述函数分析	316
§ 9.3	非线性控制系统的相平面分析	330
	习题	350
<b>附录</b>		<b>353</b>
附录 1	拉普拉斯变换表及定理	353
附录 2	用拉氏变换求解微分方程	355
附录 3	$z$ 变换表及定理	357
附录 4	典型系统的根轨迹图	359
附录 5	习题参考答案	360
<b>参考文献</b>		<b>381</b>

## 第一章 绪 论

### § 1.1 引 言

在工程和科学技术的发展过程中,自动控制技术起着十分重要的作用。应用自动控制理论和技术,能使人类把曾认为做不到的事情变为现实。人造卫星、宇宙飞船、人类登上月球、导弹制导、人工智能、自动驾驶等高精尖技术都离不开自动控制技术。在各种工业部门,例如石油、化工、冶金、机械、轻工、电子、汽车、通信、航空、航天、电力等部门,也都广泛采用自动控制技术。随着自动控制理论和实践的不断发展和完善,在经济、管理、生物、社会学、生态等各种非工程领域,也广泛应用自动控制理论和技术。因此,自动控制技术已成为最有发展前途的科学技术之一,它的发展趋势更是不可限量。可以毫不夸张地说,自动控制技术已经成为现代化社会中不可或缺的组成部分。

#### 一、控制的含义

控制(control)可定义为某个主体使某个客体按照一定的目的来动作。例如,一个人驾驶汽车去某处这样一种行为,就是实现了一种控制。这里,人是主体,汽车是客体,去某处为目的。因此可以说,上述行为是一个主体(人)为了一定的目的控制了一个客体(汽车)。我们通常把主体是人的控制称为人工控制,把主体是机器的控制称为自动控制。前者如人驾驶汽车,后者如全自动洗衣机洗衣。如果主体是由人和机器共同组成,则称为半自动控制,例如普通洗衣机洗衣。

客体的含义比较广泛,一个物体、一套装置、一个物理化学过程、一个系统等都是客体。例如,一个物体,可以是飞船、汽车、电炉、水箱等。一套装置,可以是发电机组、

(5) 普通洗衣机的控制：人们根据衣服的多少及脏的程度来控制加水和加洗衣粉的量、洗的次数、甩干时间等。

### (二) 自动控制举例

(1) 电饭煲温度的自动控制：根据人们事先设计好的顺序，自动进行定时加温、保温。

(2) 空调器的温度控制：根据人们设定的温度自动开关冷气机或调节电机转速以保持室内为一定的温度。

(3) 汽轮机的转速控制：汽轮机的转速高于或低于额定转速时，自动关小或开大主汽阀门，自动维持汽轮机的转速为额定值。

(4) 声控、光控的路灯：根据脚步声开灯关灯、根据天亮天黑程度关灯开灯等。

(5) 导弹飞行控制：飞行姿态控制、自动纠正方向、自动导向目标等。

(6) 人造卫星、宇宙飞船控制：正确进入预定轨道、姿态控制、使太阳能电池板一直朝向太阳、使无线电天线一直指向地球、使它所携带的各种测试仪器自动地工作等。

### 三、自动控制学科的特点

自动控制学科具有以下四个方面的特点。

#### 1. 应用广泛

小至电子手表，大至宇宙空间站，各个领域都有自动控制理论的应用，都离不开自动控制技术。例如，农业中已广泛应用的塑料大棚，大棚内的温度、湿度自动控制可以使农业生产不受季节、气候的影响，一年四季都可以吃到新鲜的蔬菜和水果。家庭中的电冰箱、洗衣机、收录机、空调等，交通工业中的汽车、飞机、轮船等，电信工业中的移动电话、传真等，无论何种行业都会用到自动控制技术。

#### 2. 日益重要

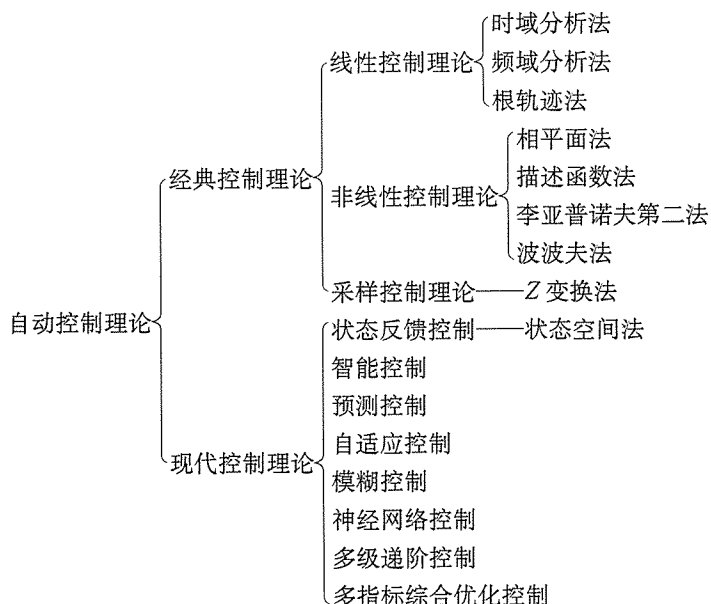
自动控制技术用得越广泛、越深入，就越显出它的重要性。现代工业、现代农业的生产，现代生活质量的提高，都可部分归功于自动控制技术的发展。许多现代化的工业企业，如果没有自动控制技术，生产将无法进行。例如大型现代化发电厂，需要监测的测量点有几千个，需要控制的量有几十个到几百个，如果没有自动控制系统，没有自动监控和保护系统，现代电厂的运行就无法进行。又如工业加热炉，其炉温按照生产要求必

简单到复杂，由初级到高级的发展过程。一般认为控制理论可以分为经典和现代两部分。经典控制理论是指 20 世纪 50 年代以前的控制理论。在工业化的历史发展中，经典自动控制技术也逐渐发展起来，18 世纪瓦特 (J. Watt) 发明的蒸汽机离心调速器是将自动控制技术应用到工业中的最早代表。1932 年奈奎斯特 (H. Nyquist) 提出了研究控制系统的频率响应法。1948 年伊文斯 (W. R. Evans) 提出了根轨迹法。这两项重大贡献，是控制理论和控制技术发展史上的一个里程碑。建立在频率法和根轨迹法基础上的控制理论被称为经典控制理论。

20 世纪 50 年代末至 60 年代初，核能、计算机及空间技术的科技发展，对自动控制学科提出了更高的要求。大型复杂系统的控制，高速度控制操作及高精度控制品质的要求，使经典控制理论的局限性暴露出来，促使人们寻求更完善的控制理论和更高级的控制技术。在这种背景下，贝尔曼 (Bellman) 等人提出了状态空间法。1960 年卡尔曼 (Kalman) 在控制系统的研究中成功地应用了状态空间法，并提出了能控性和能观测性的新概念，这被认为是现代控制理论发展的开端。60 年代以后，新控制理论不断涌现，如最优控制、系统辨识、多变量控制、自适应控制、专家系统、人工智能、神经网络控制、模糊控制、大系统理论等等。

#### 4. 相关学科多

从上面自动控制学科的发展可以看出，自动控制理论和技术的发展，已经向多学科的综



## 六、自动控制理论的基本研究课题

自动控制理论中的两大基本研究课题是控制系统的分析和控制系统的设计。

### (一) 控制系统的分析

这类课题是针对现有的控制系统，分析它是否符合所要求的性能指标，如超调量、振荡次数、调整时间、稳态误差等。控制系统分析的基本研究方法有三种：

#### 1. 实验法

在控制系统的输入端加入典型信号（例如阶跃信号、正弦信号等），分析系统的输出响应（例如阶跃响应、频率响应等），分析系统响应的特性是否符合所要求的性能指标。

#### 2. 解析法

根据控制系统数学模型的结构和参数，通过一定的计算求出系统的性能，分析其是否符合生产上提出的要求。解析法有效的前提是要能较方便和正确地建立控制系统的数学模型。在经典控制理论中，时域分析法、频域分析法和根轨迹法就是分析控制系统的解析方法。在现代控制理论中，状态空间法也是一种解析方法。

#### 3. 计算机仿真法

当控制系统的模型建立后，可用计算机仿真法进行仿真试验。用针对系统模型的动态特性数值计算代替实际系统的测试实验。计算机仿真法已成为更高效和更常用的系统分析方法。

### (二) 控制系统的设计

这类课题是根据生产上提出的性能指标要求，设计控制系统及控制器的结构和参数。控制系统设计的步骤如下：

(1) 确定性能指标和约束条件。例如是否允许有稳态误差，误差允许范围如何，调整时

(4) 进行性能校核及参数调整。一般可用现场调试或计算机仿真试验两种方式。用计算机仿真试验法整定后一般还需要通过现场试验来确认。

## § 1.2 反馈控制系统的基本概念

一个自动控制系统主要由两部分组成：一部分是被控制的设备或过程，称为受控对象或受控过程。表征设备或过程的运行情况或状态且需要加以控制的参数称为被控量。希望被控量应该具有的数值称为设定值或给定值，又称之为参考输入。引起被控量变化的外部和内部因素，称为外扰和内扰，通称为扰动。组成自动控制系统的另一部分是起控制作用的设备或装置，称为控制器或调节器。

工业生产过程的自动控制系统绝大部分为反馈控制系统，即控制系统的输出端的信号对系统的输入端有反馈作用。“反馈”是自动控制原理中最基本的概念之一，以后还会经常提到。

现以一贮槽的液位控制系统为例来进一步说明反馈控制系统的一些基本概念，图 1-1 所示为贮槽液位控制系统的原理结构图。图中  $Q_1$  为进入贮槽的液体流量； $Q_2$  为流出贮槽的液体流量。控制的目的是使贮槽中的液位以一定的精度稳定于某一高度  $H_0$ 。这里贮槽即为受控对象，液位是被控量， $H_0$  为给定值。给定值  $H_0$  的大小，可以根据需要在控制器中加以改变。当外部负载（负荷）改变，即  $Q_2$  改变（即有了外扰）时， $Q_1 \neq Q_2$ ，将使液位上升

系统的每一个组成部分（或称环节）用一个方框来代表，环节间用带箭头的的作用线连接起来，表示环节之间的信号传递关系，其中箭头方向代表作用方向。一个环节所接受的作用称为该环节的输入量，而输入量在该环节中引起的变化称为该环节的输出量。

从上节介绍的贮槽液位的自动控制系统中可以看出，它包括了受控对象、测量变送元件器、控制器、执行器、调节阀等五个主要环节，它的组成方框图如图 1-2 所示。在图中，当受控对象受到扰动  $d$  时被控量  $y$  就要发生变化。经测量变送元件或变送器将被控量的测量值  $z$  与给定值  $r$  进行比较，产生偏差值  $e=r-z$ 。偏差值（或称偏差信号） $e$  被送入控制器，控制器进行控制规律运算并输出控制信号  $u$ 。该信号再经执行器到调节阀，改变调节阀门开度，使受控对象的流入量和流出量重新达到平衡，使被控量  $y$  恢复到原有数值（即给定值）。

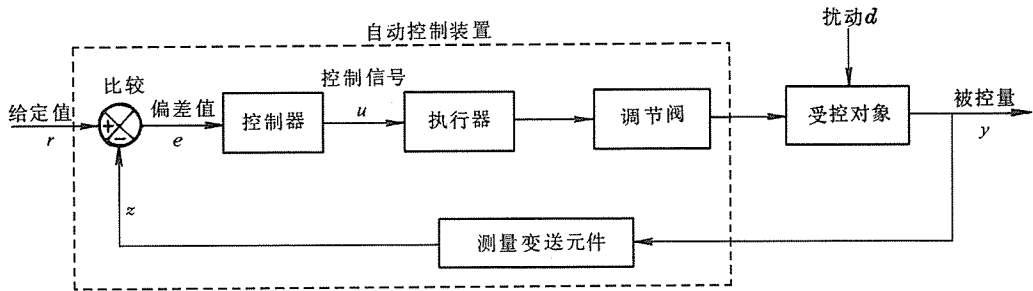


图 1-2 自动控制系统的组成方框图

图 1-2 方框图中除了受控对象以外的其他元件属于自动控制装置（见图中虚线框）。自动控制装置中各部分的作用可陈述如下：

(1) 测量变送元件(又称测量变送单元或变送器)：用来测量被控量的大小，并把被控量（例如过程控制中的水位、压力、温度、流量、转速等）变换成电压、电流、气压或液压等信号后送到控制器去。这些信号的类型选取，一般都要求与控制器的信号相一致。

(2) 控制器(又称调节器、调节单元)：将测量变送单元送来的被控量信号与给定值比较，生成偏差信号，并据此按一定的控制规律运算出控制信号给执行器。

(3) 执行器(又称执行单元或执行机构)：将控制器发出的控制信号经功率放大后推动

去改变电动机的电枢电压，从而改变电动机的转速。不同的电位器位置，就有相应的电动机转速。当接到控制指令，改变电位器位置，就可控制转速。从图 1-3 的控制系统可以看出，转速对电位器的控制作用没有反作用。这种控制系统的输出信号（图 1-3 中是转速）对输入信号（电位器位置改变）没有影响的系统，称为开环控制系统。图 1-3 的方框图如图 1-4 所示。在图 1-4 中，信号是单方向（自左至右）传递的，形成开环，这是开环控制系统的优点。

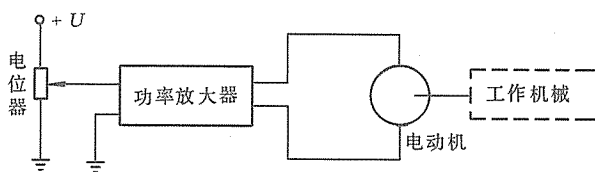


图 1-3 直流电动机转速开环控制系统

开环控制系统易受各种干扰的影响，所以控制精度较低，但结构简单，成本低，也容易实现，这是它的优点。

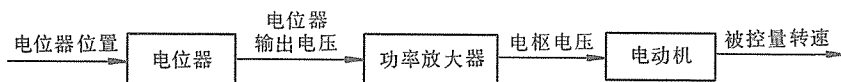
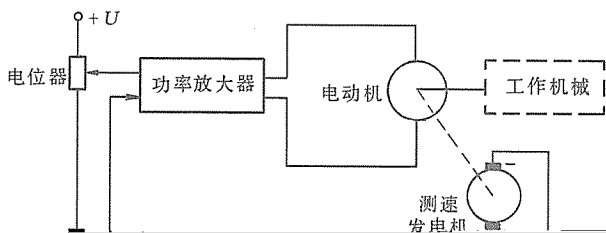


图 1-4 电动机转速开环控制方框图

## 2. 闭环控制系统

控制系统的输出量（被控量）对输入量有影响的系统，称为闭环控制系统或反馈控制系统。如果在图 1-3 的基础上，增加一个测速发电机来检测电动机转速，再将这个转速信号

反馈到功率放大器输入端与电位器的电压进行比较，其偏差值使放大器的输出电压改变，从而实现控制电动机的转速，这就形成了电动机转速的闭环控制系统，如图 1-5 所示。电动机转速闭环控制的方框图如图 1-5 所示。



电动机转速闭环控制的方框图如图 1-5 所示。

量等于给定值的目的。图 1-5 和图 1-6 都是反馈控制系统。因为反馈控制系统是将被控量变化的信号反馈到调节器的输入端，形成一个闭合回路，所以反馈控制系统一定是闭环控制系统。它是生产过程控制系统中最基本的一种。一个复杂的控制系统，也可能有多个反馈信号（除被控量外，还有其他反馈信号）组成多个闭合回路。这称为多回路反馈控制系统。

## 2. 前馈控制系统

前馈控制系统直接根据扰动信号进行调节。扰动量是控制量变化的依据。由于它没有被控量的反馈信号，不能形成闭合回路，所以它是一种开环控制系统。

图 1-7 所示为前馈控制系统方框图，扰动  $d(t)$  将使被控量  $y(t)$  发生变化，前馈控制器根据扰动量进行控制，及时抵消扰动量  $d(t)$  对被控量  $y(t)$  的影响，从而使被控量  $y(t)$  保持不变。但是由于前馈控制是一种开环控制系统，没有被控量的反馈作用，不能保证被控量控制的精度（例如当有其他不可测的扰动影响受控对象时），所以在实际生产过程的自动控制中是不能单独使用的。但是，针对图 1-7 的可测扰动  $d(t)$ ，前馈控制将能十分有效地控制被控量的变化，这个特点是很有用的。因而一般在反馈控制系统中加入前馈控制作用，构成前馈—反馈复合控制系统，以达到兼备两者优点的目的。

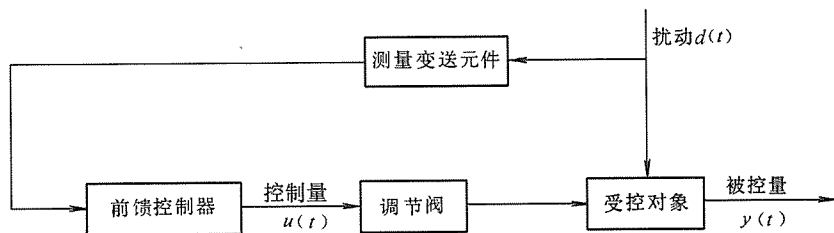
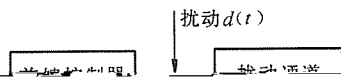


图 1-7 前馈控制系统方框图

## 3. 前馈—反馈复合控制系统

如图 1-8 所示，在反馈控制系统的基础上，增加了对于主要扰动  $d(t)$  的前馈控制，便构成了前馈—反馈复合控制系统。当扰动  $d(t)$  发生后，前馈控制器能及时消除扰动对被控量的影响，而反馈控制器将保证被控量能较精确地等于给定值，改善了被控量的控制精度。



房间温度控制、容器的液位控制、电力网的频率控制等都是恒值控制系统。

## 2. 随动控制系统

随动控制系统又简称随动系统，是被控量的给定值随时间任意变化的控制系统。它的作用是使被控量随时跟踪给定值的变化。例如在锅炉燃烧过程控制中，要求空气量随时跟踪燃料量的变化而成比例地变化。运动目标的自动跟踪、跟踪卫星的雷达天线控制系统、工业控制中的位置控制系统等都属于随动控制系统。

## 3. 程序控制系统

被控量的给定值是一个已知的时间函数，控制的目的是保证被控量按确定给定值的时间函数来改变。例如发电厂汽机启动过程中，要求转速按预先规定的时间函数来升速。又如热处理的升温加温过程控制及程序控制机床等，都属于程序控制系统的范畴。

# 四、按照控制系统主要元件的特性来分类

## 1. 线性控制系统

当控制系统各元件的输入/输出特性具有线性关系，即系统的动态过程可以用线性微分方程来描述时，则称这种系统为线性控制系统。

线性元件的特性如图 1-9 所示。线性系统的特点是可以应用叠加原理。

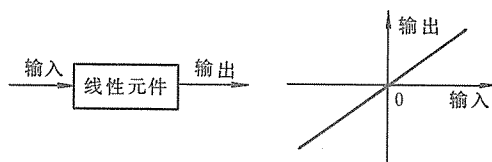


图 1-9 线性元件的特性

## 2. 非线性控制系统

当控制系统中含有一个或一个以上的非线性元件时，系统就要用非线性方程来描述。由非线