



GH

高等学校工科电子类教材

自动控制 基础

(修订版)

沈裕康 严武升 杨庚辰

西安电子科技大学出版社

高等学校教材

自动控制基础

(修订版)

沈裕康、严武升、杨庚辰

西安电子科技大学出版社

1995

(陕)新登字 010 号

内 容 简 介

本教材为全国高等学校工科电子类“八·五”规划教材,适用于电子机械类各专业的本科生。主要内容以经典控制理论为基础,讲述时域分析、根轨迹分析及频域分析三种分析方法。适当介绍非线性控制系统的描述函数分析法和相平面分析法。第八章介绍采样控制系统的基本理论与分析方法。第九章讲述机械结构因素对控制系统性能的影响,是本教材的特色。参考教学时数为 64~80 小时,根据专业不同,可以适当取舍内容。每章都附有习题或思考题。

高等学校教材

自动控制基础

(修订版)

沈裕康 严武升 杨庚辰 编著

责任编辑 李荣才

西安电子科技大学出版社出版发行

地址:西安市太白南路 2 号 邮编:710071

西安电子科技大学印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1 092 1/16 印张 10 12/16 字数 465 千字

1986 年 12 月第 1 版 1995 年 6 月第 2 版 1995 年 6 月第 2 次印刷 印数 8 001 - 13 000

ISBN 7 - 5606 - 0356 - 4/TP · 0135(课)

定价: 14.50 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990年已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的、以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的，其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的，其三是经过质量调查在前几轮组织编定出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类专业教材办公室

修订版前言

本教材系按中国电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由电子机械教材编审委员会无线电设备结构设计编审小组征稿并推荐出版。责任编委为吴凤高。

本教材由沈裕康编写第二、三、五章,由严武升编写第一、六、八章及附录,由杨庚辰编写第四、七、九章,沈裕康统编全稿。东南大学李宝云担任主审。

本课程参考教学时数为 60~80 学时。其主要内容是以线性系统的经典控制理论为主。主要介绍线性定常系统的数学模型的建立,控制系统常用的三种分析方法:时域分析法、根轨迹分析法和频域分析法。适当介绍了非线性控制系统的描述函数分析法和相平面分析法。为适应数控技术和计算机控制的需要,第八章介绍了采样控制系统的理论及分析方法。第九章的机械结构因素对控制系统性能的影响,体现了机械电子工程专业的特色,对伺服机械中常见的摩擦、齿隙、传动误差、结构弹性变形等因素对系统的影响作了定量和定性的分析。在编写过程中,适当减少繁杂的数学推导,加强基本概念和基本原理的阐述,习题的数量,难易适中。

在编写过程中,编委及李宝云同志提出许多宝贵意见,在此一并表示感谢。由于编者水平有限,谬误之处在所难免,切望读者不吝指正。

作 者

1994.4

目 录

第一章 自动控制的基本概念	1
第一节 引言	1
第二节 控制系统的分类	2
第三节 反馈控制系统的基本组成	4
第四节 对控制系统的基本要求	7
习题	9
第二章 控制系统的数学模型	11
第一节 数学模型	11
第二节 控制系统运动方程的列写	11
第三节 传递函数	14
第四节 非线性数学模型的线性化	20
第五节 典型环节及其传递函数	24
第六节 系统的结构图及其变换	26
第七节 信号流图	31
习题	36
第三章 时域分析法	40
第一节 概述	40
第二节 典型试验信号	40
第三节 一阶系统的时域响应	42
第四节 二阶系统的时域响应	45
第五节 暂态响应的性能指标	48
第六节 二阶系统的暂态响应指标与参数的关系	49
第七节 二阶系统的单位斜坡响应	52
第八节 高阶系统的暂态响应	57
第九节 控制系统的稳定性	59
第十节 系统的误差分析	63
习题	78
第四章 根轨迹法	82
第一节 根轨迹	82
第二节 根轨迹方程	83
第三节 绘制根轨迹的一般规则	85
第四节 控制系统根轨迹分析	96
第五节 参数根轨迹	103
习题	105

第五章 频率响应法	108
第一节 频率特性的基本概念	108
第二节 对数频率特性(伯德图)	110
第三节 开环控制系统的伯德图	116
第四节 极坐标图	120
第五节 对数幅相图	126
第六节 奈奎斯特稳定判据	128
第七节 控制系统的相对稳定性	135
第八节 闭环频率特性	138
第九节 由频率特性实验曲线确定系统的传递函数	148
习题	152
第六章 控制系统的设计与校正	155
第一节 概述	155
第二节 常用校正装置及其特性	156
第三节 开环频率特性与系统性能指标的关系	164
第四节 串联校正	169
第五节 反馈校正	175
第六节 根轨迹法校正	180
结束语	186
习题	186
第七章 非线性控制系统	189
第一节 非线性控制系统的基本概念	189
第二节 非线性系统的特性	190
第三节 描述函数法	192
第四节 相平面分析法	214
习题	222
第八章 采样系统理论	224
第一节 引言	224
第二节 信号采样和复现	227
第三节 z 变换	232
第四节 脉冲传递函数	241
第五节 采样系统的性能分析	250
第六节 采样和数字控制系统的设计与校正简介	258
习题	259
第九章 结构因素对控制系统的影响	263
第一节 概述	263
第二节 摩擦对控制系统的影响	263
第三节 传动链齿隙对控制系统性能的影响	272
第四节 传动误差对控制系统的影响	280

第五节 转动惯量对控制系统的影响.....	283
第六节 机械结构弹性变形对控制系统的影响.....	285
思考题.....	293
附录 拉普拉斯变换.....	295
参考文献.....	306

第一章 自动控制的基本概念

第一节 引言

一、自动控制技术及其应用

自动控制技术在现代社会的许多领域中获得广泛应用。随着生产和科学技术的发展,自动控制技术所起的作用更加重要,自动化水平也越来越高。

自动控制是指在没有人直接参与的情况下,利用控制装置使被控对象(如机器、设备或生产过程)的某一物理量(或工作状态)自动地按照预定的规律运行(或变化)。如烘炉的炉温控制,数控机床的进给控制,跟踪雷达和指挥仪及高炮组成的自动化防空系统等等,都是应用自动控制技术的结果。

自动控制技术在国民经济中的广泛应用,对改善劳动条件、提高产品质量和劳动生产率、实现企业管理自动化等各个方面,都取得了明显的效果。在某些领域(如宇航、导弹制导)中自动控制技术尤为重要。近 20 年来,电子计算机已成为自动控制技术不可分割的重要组成部分,并为自动控制技术的发展和應用开辟了广阔的天地。

二、自动控制系统

自动控制系统是指能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统。它一般由控制装置和被控对象组成。被控对象指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。控制装置则指对被控对象起控制作用的设备总体。由于被控对象种类繁多,要求的控制功能多种多样,所以控制系统也千差万别。有只控制一个物理量(如温度、压力、电压等)的简单系统;也有对一个车间、企业、机构的全过程进行控制的大系统;也可以是抽象的社会系统、生态系统等。

三、自动控制理论

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。按其发展的不同阶段,可把自动控制理论分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论是以传递函数为基础,研究单输入、单输出的自动控制系统。这部分理论经过长期的发展,在工程实际应用中业已成熟。根据电子机械专业的需要,本教材主要介绍经典控制理论的基本理论和分析、设计方法,并深入讨论机械结构因素对控制系统的影响。

现代控制理论是以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、变参数、非线性等控制系统的理论。现代数学和电子计算机的发展极大地推进了它的进步,目前在大系统和人工智能等领域进展较大并获得成功应用。

应当指出,现代控制理论的发展,绝不意味着经典控制理论已经过时,相反,在工程应用中,今后还将继续发挥其指导作用。

第二节 控制系统的分类

控制系统有多种分类方法。按照描述系统的数学模型不同,可分为线性系统、非线性系统或定常系统和时变系统;按照传递信号的性质,可分为连续系统和离散系统;按照系统执行元件类型,可分为机电系统、液压系统、气动系统等;按照系统的功能分类,则有温度控制系统、位置控制系统等;按照输入信号的变化规律不同,则有随动系统和调节系统之分。为了全面反映控制系统的特点,通常将上述各分类方法组合运用。

控制系统分类方法虽然很多,但究其实质,主要有开环控制和闭环控制两大类。

一、开环控制系统

开环控制是指系统的输出量对系统的控制作用无任何影响的控制过程。

图 1-1(a)所示的贮槽液位控制系统中, h 为液位高度。无论经阀门 V_1 的输出流量如何变化,都可以通过人工控制阀门 V_2 的流量(即系统的输入量)使液位高度 h 保持在希望值的允许偏差范围内。因为通过阀门 V_2 的输入流量的大小是靠人工控制的,与系统的输出流量无关,所以它是开环系统。

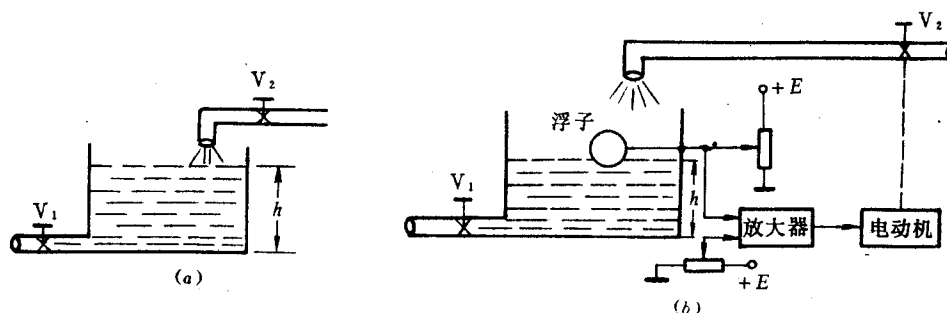


图 1-1

图 1-2(a)表示以直流电机拖动的速度控制系统。当控制信号不变时,电机以某一速度旋转。当负载力矩不变时,控制电压与电机转速具有对应的关系,输出转速不参与控制作用,所以是开环控制。但是,当负载转矩发生变化时(称之为扰动,如图 1-2(b)所示),由电机原理可知,其输出转速将发生波动。因此,开环系统的精度,主要取决于它的标定精度以及组成系统的元件特性的稳定程度,它没有抵抗干扰的能力,故控制精度较低。但是,开环系统结构简单、成本低、稳定性好,也容易实现,在某些自动化装置中仍大量被采用。

二、闭环控制

闭环控制是指系统的输出量对控制作用有影响的控制过程,也称为反馈控制。

如果在图 1-1(a)所示液位开环控制系统中加入一些部件,使液位高度 h 经浮子和电位器变换成与其对应的电压信号,并负反馈到放大器的输入端,与输入控制信号相减,就可组成如图 1-1(b)所示的液位闭环控制系统。若液位高度 h 等于希望值时,反馈到放大

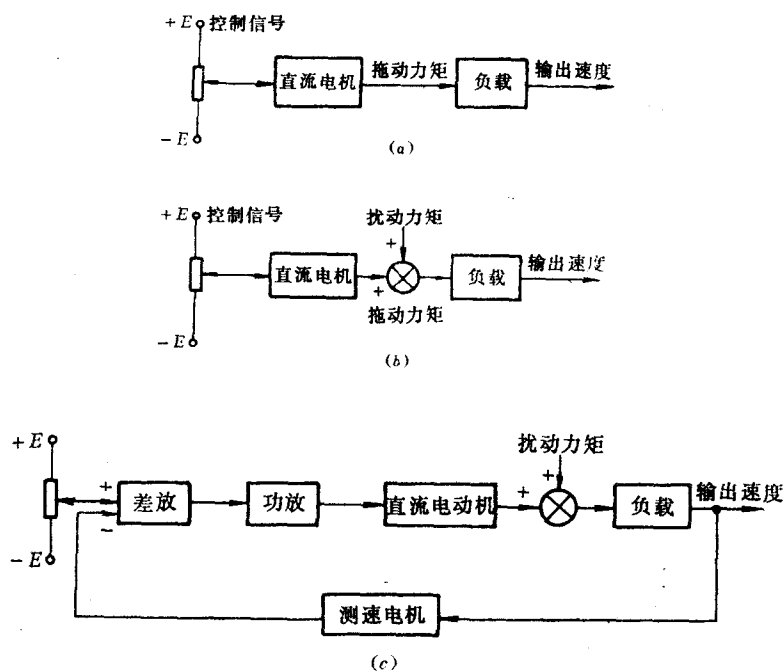


图 1-2

器输入端的电压等于输入控制信号电压，放大器输出电压为零，电机不动作；当液位 h 偏离希望值时，则反馈电压和输入控制电压之间出现差值，经放大器放大后，驱动电机以改变阀门 V_2 的开度，从而调节输入流量，使 h 恢复到希望值。由于系统中存在反馈， h 的实际值对控制作用有影响，所以是闭环系统。

同理，若用测速发电机把图 1-2(b) 的输出速度转换成与其成比例的电压，并负反馈到差动放大器的输入端，即构成闭环速度控制系统，如图 1-2(c) 所示。当系统受到扰动使输出速度偏离希望值时，差放输出的误差(偏差)电压亦随之变化，它经放大器放大后控制电机，使系统恢复到希望的速度。

由此可见，闭环控制的基本工作原理是：由参考输入元件、测量反馈元件和比较环节去“测量偏差”；由放大变换元件和执行元件去“消除偏差”，所以属偏差控制。因此，无论是系统内部参数的变化，还是由于外扰动输入所引起的输出量偏离，闭环控制系统都能自动进行修正。

三、开环控制和闭环控制的比较

由于闭环控制中采用了负反馈，故系统对外部或内部干扰的影响都不甚敏感。这样，就可以选用不太精密的元件构成较为精确的控制系统。而开环控制，由于对输出量不检测，也无输出量的反馈，所以对扰动引发的误差无修正能力，故系统的精度完全由选用高稳定性、高精度的元件或采取有效的抗干扰措施来保证。

从系统的稳定性来考虑，开环控制一般不存在不稳定的问题，而闭环系统的稳定性始

终是一个十分重要的问题。

通常，若系统的输入量预知，且对系统中可能出现的干扰能有效地抑制时，采用开环控制较好，特别是被控量很难进行检测时更是如此。若系统的输入量和扰动无法预计的情况下，则采用闭环控制为好。对复杂且精度高的控制系统，还可将开环控制和闭环控制适当结合起来，组成比较简单且性能良好的控制系统——复合控制系统。

第三节 反馈控制系统的基本组成

下面举几个典型实例进一步说明控制系统的工作原理，并归纳出控制系统的基本组成。

1. 随动系统

闭环系统的输入量是任意的时间函数，而输出量为同样的物理量且能以一定的精度跟随输入量变化。此类系统称为随动系统或伺服系统。随动系统在工业、交通、国防等方面应用极广，如机床、船舶操舵、火炮和雷达的自动控制系统，都属于伺服系统。

图 1-3(a) 为雷达天线方位角手控系统。手柄转角 θ_r 为输入量，天线方位角 θ_c 为输出量。手柄轴与同步发送器的转子轴相连，自整角变压器的转子与天线方位轴相连。当手柄转动时，若 $\theta_c \neq \theta_r$ ，自整角变压器输出与角差成比例的电压，它经变换放大后驱动伺服电机，带动天线朝着角差减小的方向运动，直至 $\theta_c = \theta_r$ 。若手柄连续旋转，则天线方位轴跟随 θ_r 而旋转。其原理框图如图 1-3(b) 所示。图中的同步发送器和自整角变压器即为误差比较元件；速度反馈用来改善系统的性能。

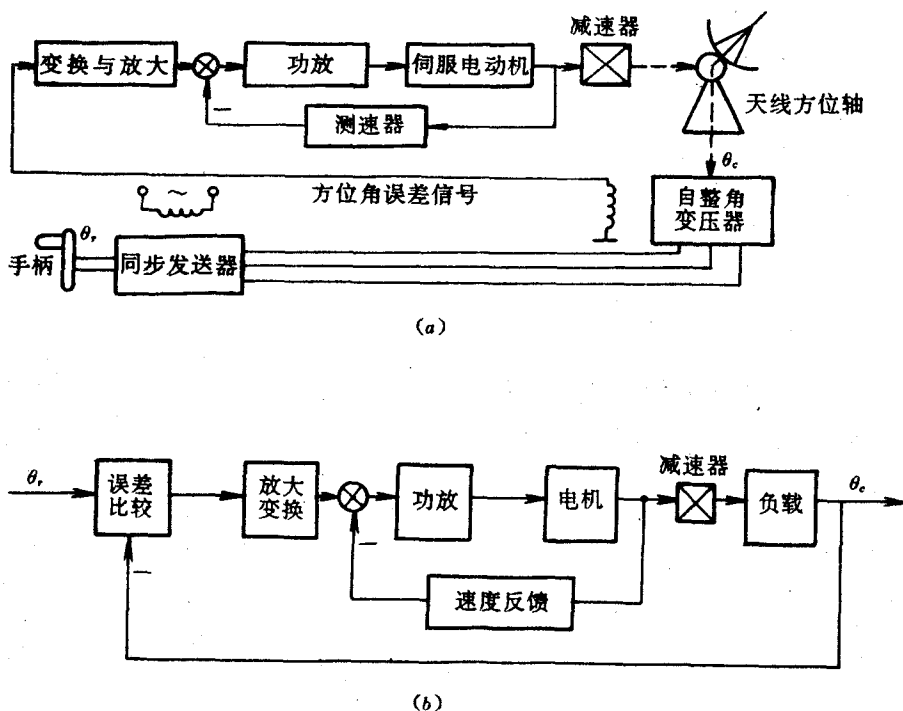


图 1-3

图 1-4(a) 为函数记录仪控制系统原理图。它可以在直角坐标上自动描绘两个电量的函数关系，也可在走纸机构的纸带上描绘输入信号 u_r 对时间的函数关系。图中由电位器 R_0 和 R_M 组成桥式测量电路，记录笔固定在电位器 R_M 的电刷上，故测量电路的输出电压 u_r 与记录笔位移成正比。当有输入信号 u_r 时，放大器输入端得到偏差电压 $\Delta u = u_r - u_r$ ，经放大后驱动伺服电机，并通过齿轮系及绳轮而带动记录笔移动，使 Δu 减小。当 $\Delta u = 0$ 时，电机停转，记录笔的位移与输入信号相对应。若 u_r 随时间连续变化，记录笔便描绘出其随时间连续变化的相应曲线。图 1-4(b) 为系统的原理框图，测速发电机构成速度负反馈，以改善系统性能。

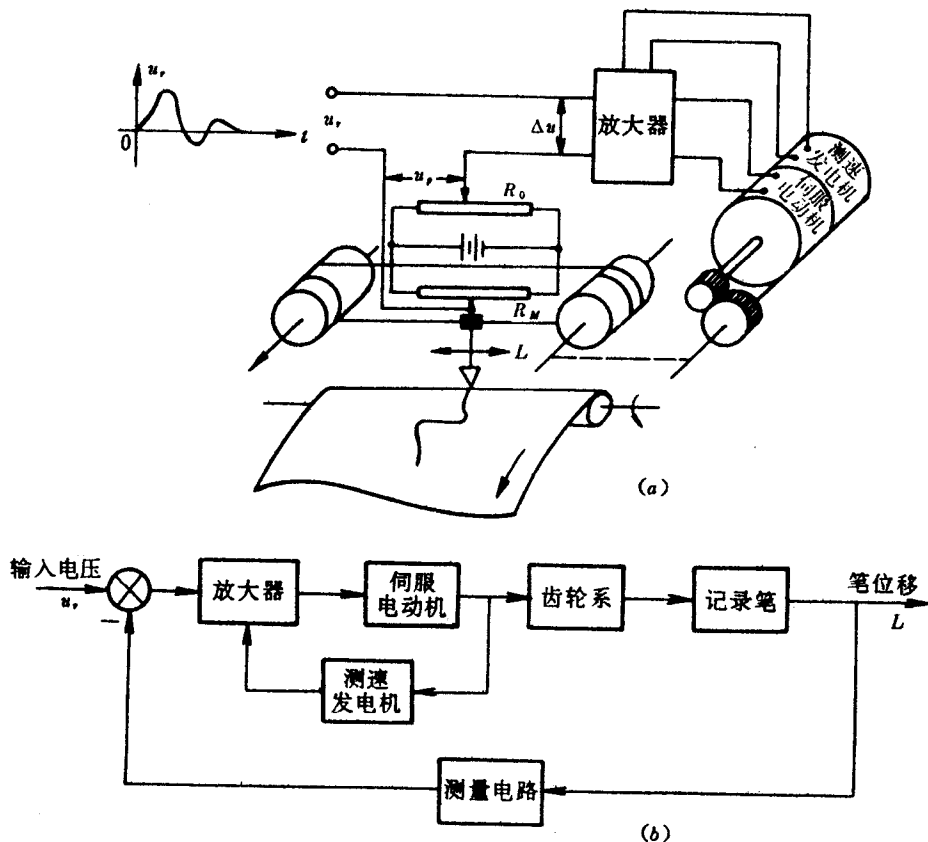


图 1-4

2. 自动稳定系统

闭环控制系统的参考输入信号(或输出量)保持恒定时，称为自动稳定系统。如各种反馈式稳压、稳流、稳速和温度自动调节装置，都是自动稳定系统。

图 1-5(a) 为炉温自动控制系统原理图。当炉温 θ 偏离给定值时(由给定电位器给定)，测温电阻阻值发生变化，使电桥失去平衡，电桥输出电压经放大后驱动电机，经减速器去控制进气阀门的开度 φ ，以改变加热气体的进气量，使炉温趋于给定值。图 1-5(b) 为系统的原理框图。

3. 数字控制系统

数字控制系统的操作指令以数字的形式表示,工作过程按照规定的程序自动进行。典型的数控设备是数控机床和坐标测量机。数控系统发展的趋势是计算机数控(CNC)。

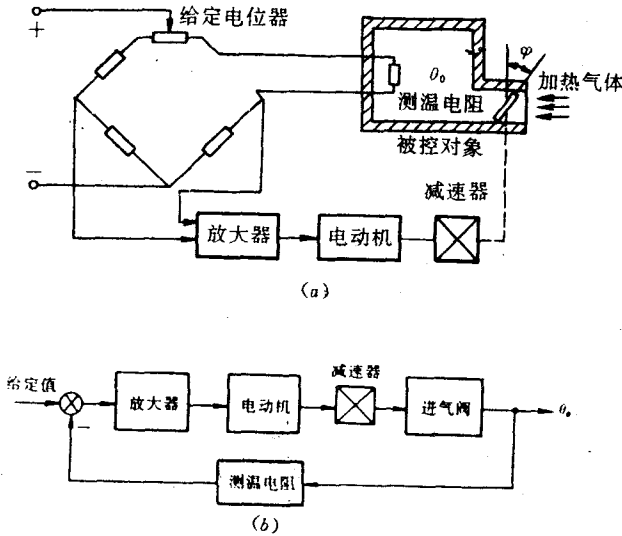


图 1-5

控制系统、智能控制系统、自适应控制系统等不断地涌现出来,这里就不一一介绍了。

从上述闭环控制系统的典型实例可以看出,尽管各种系统由不同的元件组成,系统的功能也不一样,但它们都采用了负反馈工作原理。相同的工作原理决定了它们必然具有类似的结构。例如,它们都有测量装置、比较装置、放大装置和执行机构。在不同的系统中,可以采用不同的元

件去实现某一种相同的功能。为了改善系统的性能,通常要引入校正装置,如速度反馈等。

因此,典型的自动控制系统的基本组成可用图 1-7 所示方块图表示。图中,系统的基本元件和被控对象都用方块表示;信号的传输方向用箭头表示,该传输方向是单向不可逆的,这是由元件的物理特性决定的;“-”号表示输入信号与反馈信号相减(负反馈),“+”号表示正反馈。

信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称为前向通路;系统输出量经测量装置反馈到输入端的传输通路称为主反馈通路;前向通路与主反馈通路一起,构成主回路。

图 1-6 为计算机数控机床的原理示意图。CNC 系统软件部分主要有:零件程序、控制程序和服务程序。零件程序中包含对被加工零件的要求和切削条件的描述;控制程序将接受的零件程序作为输入数据,经过插补运算产生驱动信号;服务程序用来检查、编辑和修改零件程序。大多数 CNC 系统都包括速度和位置反馈回路,如图 1-6 所示。其硬件主要有:伺服放大器、传感器检测电路及接口部件。由于 CNC 系统软件丰富、柔性较大、成本较低,所以在制造系统中应用非常广泛。

随着科学技术的发展,诸如最优

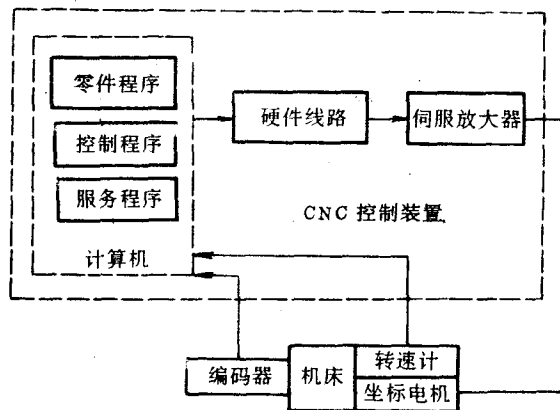


图 1-6

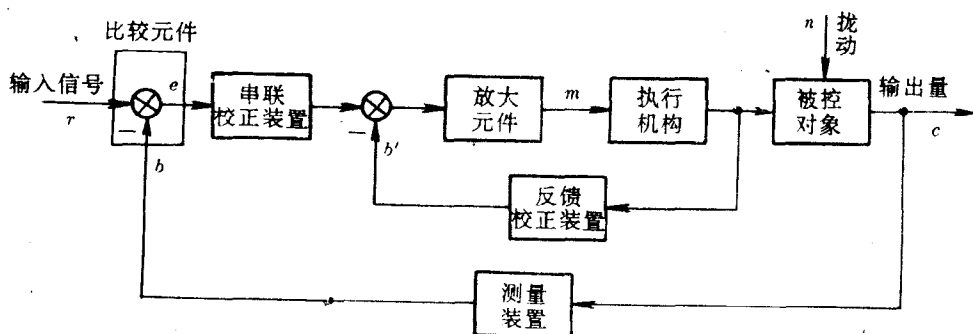


图 1-7

此外，还有局部反馈通路以及由它组成的内回路。只有一个反馈通路的系统称为单回路系统，有两个以上反馈通路的系统称为多回路系统。

一般来说，控制系统受两种信号的作用，即有用信号和扰动，它们都可作为系统的输入信号。有用输入信号决定了系统被控制量的变化规律，而扰动是不希望的外作用，它破坏有用信号对系统输出量的控制，故应设法进行抑制或补偿。通常所说的系统输入信号，泛指有用信号。

图 1-7 中各元件(或装置)的作用如下：

测量元件：对系统输出量进行测量，将输出量变换成主反馈信号 b 。

比较元件：对系统的输入量和主反馈信号进行加减计算，给出偏差(误差)信号 e 。这个作用往往是由综合电路或由测量元件完成的，这时统称为误差检测元件。

放大元件：对微弱的偏差信号进行放大和变换，输出足够功率和要求的控制量 m 。

执行元件：根据控制量对被控对象执行控制任务，使被控制量(输出量 c)与希望值趋于一致。

被控对象：系统所要控制的机器、设备或生产过程。

校正装置：参数或结构便于调整的元件，用于改善系统性能。

第四节 对控制系统的基本要求

为了使被控对象按预定规律变化，控制系统必须具备一定的性能。这些性能主要包括：稳定性好、响应迅速和精度高。

一、稳定性

任何一个能够正常工作的控制系统，首先必须是稳定的。这是对控制系统的基本要求。

由于闭环系统有反馈作用，所以系统有可能趋向振荡或不稳定。现以图 1-3 所示的雷达天线手控系统为例说明这个问题。设系统原处于静止状态， $\theta_0 = 0$ 。如手柄突然转动某一角度(相当于系统输入阶跃信号)，天线轴与手柄轴之间产生偏差角，在偏差信号的作用下，电机驱动天线朝角差减小的方向运动。当再次达到 $\theta_0 = 0$ 时，由于电机电枢、天线等的

惯性, 天线轴不能立即停止转动, 而产生过冲。过冲导致偏差信号极性相反, 使电机驱动天线反向运动。如此重复下去, 天线将在 θ_r 确定的方位上来回摆动。若系统有足够的阻尼, 则天线的摆动振幅随时间迅速衰减, 并最终停止在 $\theta_r = \theta_r$ 的方位上, 如图 1-8(a) 所示。这样的系统是稳定的。

若系统受到外界突发扰动的作用, 如阵风的作用, 则设计合理的系统输出量的摆动振幅亦应是衰减的, 天线将恢复到原始状态, 如图 1-8(b) 所示。

因此, 稳定的控制系统在阶跃信号或扰动的作用下, 其响应的暂态过程是收敛的。

反之, 若系统设计不当, 其响应可能呈现发散的振荡现象, 这种情况称为系统不稳定。激烈而持久的振荡会使功率元件过载, 甚至使设备损坏而发生事故, 这是不允许的。

系统稳定性包含两个方面的含义。一是系统稳定, 叫做绝对稳定性。另一个含义是输出响应振荡的强烈程度, 称为相对稳定性。相对稳定性差的系统, 其输出响应虽然是收敛的, 但振荡衰减得很慢。考虑到实际系统中各元件的参数和特性都会发生一定的变化, 所以, 系统不但必须是稳定的, 而且还应有一定的稳定裕度, 以保证在元件性能略有变化时, 系统仍能正常工作。系统稳定性的优劣, 常以它的稳定裕度的大小来衡量。稳定性是稳态指标, 与系统结构形式及元件参数有关, 与外作用及干扰信号无关。

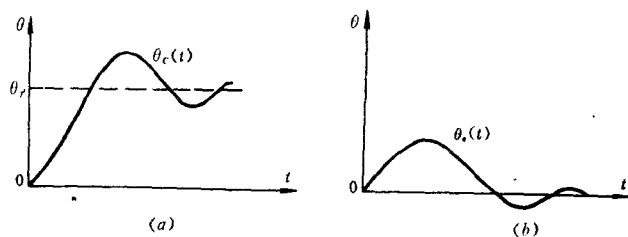


图 1-8

二、快速性

控制系统不仅要求稳定, 而且要求被控量能迅速地按照输入信号所规定的规律变化, 即要求系统具有一定的响应速度。如前所述, 系统中总包含一些惯性元件, 所以在输入信号作用下, 其响应总要经过一个暂态过程之后才能达到稳态。暂态过程结束的时间愈短, 说明系统的快速性好。快速性是动态性能指标, 只取决于系统本身的结构形式及元件参数, 与外作用及干扰信号无关。

三、精确度

系统在输入信号的作用下, 其响应经过暂态过程之后进入稳态, 这时系统的实际输出与希望值之差, 称为稳态误差。它是表征控制系统精确度的一项性能指标, 为稳态指标。

要求控制系统没有任何误差是不可能的, 因为反馈控制系统本身就是建立在误差控制的基础上的。若输入信号与主反馈信号之间不存在偏差, 则系统不会产生任何控制作用。而且由于各种因素的存在, 输入信号与主反馈信号之间的偏差也不可能完全消除。控制系统的误差主要有以下几个方面:

(1) 系统本身的原理性误差。它既与系统的结构形式及参数有关, 又与输入信号的性质及幅值有关。详见第三章有关内容。

(2) 系统内部或外部存在的各种干扰所产生的误差。如放大器中的起伏噪声、温度漂移、电磁元件中的杂散耦合、机械振动、风力矩、工业环境等所引起的干扰误差。

(3) 由于系统的结构和元件的特性不够完善以及非线性因素造成的误差。如传动机构中的齿隙、游隙、偏心、摩擦及电磁元件中的饱和、死区、磁滞回线等非线性因素所引起的误差。这类误差通常称为结构误差或非线性误差。

控制系统的误差允许值要根据具体要求来确定, 如机床进给系统的精度由所要加工工件的精度而定; 跟踪雷达控制系统的精度由雷达的测角精度来确定。

随着科学技术的发展以及各种高精度控制元件和测量元件的问世, 控制系统能够达到的精度也随之提高。如跟踪雷达的测角精度, 50 年代为 $1 \sim 2$ 密位 ($1 \text{ 密位} = 0.06^\circ$); 60 年代达到 $0.1 \sim 0.2$ 密位; 以后又提高到 0.05 密位。

控制系统指标除上述之外, 还包括用以衡量抗干扰能力的系统带宽、运行条件、经济性等方面的指标。

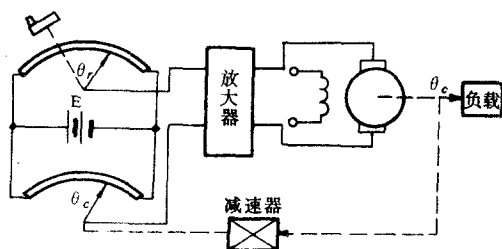
近年来, 最佳控制、模糊控制、智能控制等新型控制方法的应用日趋广泛, 随之提出了多种定义系统性能的方法, 在此恕不赘述。

习 题

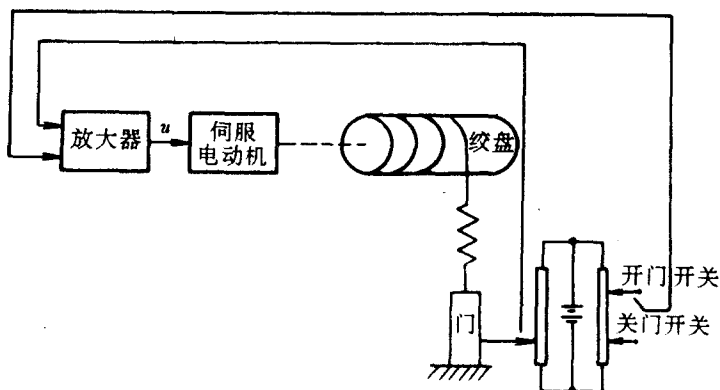
1-1 试举几个日常生活中的开环和闭环控制系统的例子, 并说明它们的工作原理。

1-2 某位置随动系统如题图 1-2 所示。试说明其工作原理并画出原理框图。

1-3 某仓库大门自动控制系统如题图 1-3 所示。试说明大门自动开、关的工作原理并画出原理框图。



题图 1-2



题图 1-3