

高等学校教材

自动控制原理 (上)

周其节 李培豪 高国桢 编



电子工业出版社

自动控制原理

(上册)

周其书 李培豪 高国梁 编

电子工业出版社

内 容 简 介

本书讨论经典自动控制理论的基本内容。

全书分上、下两册。上册讨论线性连续控制系统的分析与综合。下册讨论非线性连续控制系统的分析方法，线性离散控制系统的分析与综合。

本书是工科高等学校自动控制、工业电气自动化及相近专业的教材，也可供有关专业师生及从事自动化方面工作的工程技术人员参考。

自 动 控 制 原 理

(上 册)

周其节 李培豪 高国燊 编

责任编辑：王明君

*

电子工业出版社出版 (北京市万寿路)

新华书店沈阳发行所发行 各地新华书店经售

鞍山市旧堡区印刷厂

*

开本：787×1092 1/16 印张：21.5 字数：493.5千字

1985年11月第1版 1985年11月第1次印刷

印数：11000册 定价：7.30元(上、下册)

统一书号：15290·182

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作，从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二～一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

前 言

本教材系由计算机与自动控制教材编审委员会自动控制编审小组评选审定，并推荐出版。

该教材由华南工学院周其节担任主编，重庆大学周其鉴担任主审。编审者均依据自动控制编审小组审定的编写大纲进行编写与审阅的。

本课程的参考教学时数为100~110学时。教材内容包括经典控制理论的线性定常系统理论、非线性系统理论和离散系统理论。本教材分上、下两册。上册第一章、第二章介绍自动控制系统的一般概念和控制系统的数学模型。第三章至第五章分别论述分析线性定常系统常用的三种方法：时域分析法、根轨迹法和频率法。对各种分析方法的基本概念、基本理论和主要方法都作了较为详细的介绍，并以频率法为重点。第四章中还简单介绍了线性定常系统的根轨迹法综合。线性定常系统的频率法综合在第六章中专门介绍。下册第七章、第八章论述非线性系统理论，分别讨论描述函数法和相平面分析法。第九章和第十章介绍离散控制系统的基本理论及离散控制系统的分析与综合，在控制理论和控制工程上已广泛使用电子计算机的情况下，本教材在第三、四、五、六各章中都增加了利用计算机分析系统和进行控制系统辅助设计的内容。

本教材编写过程中，力求突出重点、精简篇幅。既讲透基本原理和基本方法又保持课程内容的系统性和连贯性。为便于自学和使读者更好地掌握基本概念，基本理论以及分析、综合系统的基本方法，教材各章都有较多的例题和习题。使用本教材时必须注意由浅入深、理论结合实际，完成一定份量的习题并配合相应的实验。本课程上册参考教学时数为60~65学时，下册为40~45学时。本课程的实验参考教学时数为15~20学时。

本教材由李培豪编写上册各章，高国桑编写下册各章，周其节统编全稿。参加审阅工作的还有吴志清、汪庭凯同志，他们为本书提出了许多宝贵的修改意见。这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

一九八五年五月

目 录

第一章 自动控制的一般概念	(1)
§ 1-1 自动控制的基本原理和自动控制系统的组成	(1)
§ 1-2 自动控制系统的特点和种类	(4)
§ 1-3 自动控制系统的研究内容、研究方法 以及对系统的基本要求	(9)
小 结	(12)
习 题	(12)
第二章 自动控制系统的数学模型	(14)
§ 2-1 线性元件微分方程的编写	(14)
§ 2-2 非线性元件微分方程的线性化	(21)
§ 2-3 自动控制系统微分方程的编写 和微分方程的拉氏变换法求解	(25)
§ 2-4 传递函数和结构图	(35)
§ 2-5 结构图的等效变换和闭环系统的传递函数	(49)
§ 2-6 信号流图	(62)
§ 2-7 脉冲响应函数	(68)
小 结	(71)
习 题	(71)
第三章 自动控制系统的时域分析	(79)
§ 3-1 典型输入作用和时域性能指标	(79)
§ 3-2 一阶系统的瞬态响应	(84)
§ 3-3 二阶系统的瞬态响应	(86)
§ 3-4 高阶系统分析	(104)
§ 3-5 稳定性和代数稳定判据	(108)
§ 3-6 稳态误差分析	(116)
§ 3-7 电子计算机在自动控制系统时域分析中的应用	(129)
§ 3-8 误差准则和系统最佳化概述	(134)
小 结	(136)
习 题	(136)
第四章 根轨迹法	(143)
§ 4-1 根轨迹法的基本概念	(143)
§ 4-2 绘制根轨迹的基本法则	(147)
§ 4-3 参量根轨迹	(159)
§ 4-4 控制系统根轨迹的绘制	(163)

§ 4-5	利用计算机绘制控制系统的根轨迹图	(179)
§ 4-6	控制系统的根轨迹法分析	(182)
§ 4-7	控制系统的根轨迹法综合	(186)
小 结		(198)
习 题		(198)
第五章	控制系统的频率分析法	(202)
§ 5-1	频率特性的基本概念	(202)
§ 5-2	频率特性和传递函数、微分方程以及系统时域响应的关系	(205)
§ 5-3	频率特性的几种表示方法	(214)
§ 5-4	典型环节的频率特性	(218)
§ 5-5	开环系统频率特性的绘制	(230)
§ 5-6	乃奎斯特稳定性判据	(239)
§ 5-7	稳定裕度	(250)
§ 5-8	利用数字计算机计算系统的频率特性和分析系统的性能	(253)
§ 5-9	稳态误差分析	(258)
§ 5-10	闭环系统频率特性的绘制	(260)
§ 5-11	频率法分析控制系统的瞬态性能	(271)
§ 5-12	频率特性的实验确定法	(286)
小 结		(289)
习 题		(289)
第六章	控制系统的频率法综合	(297)
§ 6-1	校正装置的频率特性	(297)
§ 6-2	串联校正装置的综合	(313)
§ 6-3	并联校正装置的综合	(328)
§ 6-4	控制系统的计算机辅助设计	(332)
小 结		(334)
习 题		(334)

第一章 自动控制的一般概念

近几十年来, 自动控制技术得到了迅速的发展。它已广泛地应用于工农业生产、交通运输、国防建设和航天事业等许多部门。随着科学技术和生产的进一步发展, 在各个专业的工程领域中, 其作用愈加显得重要。显然它将成为现代科学技术中最有发展前途的学科之一。

自动控制原理是研究自动控制技术的基础理论和自动控制共同规律的技术科学。第二次世界大战期间, 由于军事装备的需要, 随动系统的理论和技术得到迅速发展。至五十年代末期, 以反馈控制原理为基础的自动控制理论已形成比较完整的体系, 称为经典控制理论。它以传递函数为工具, 主要研究单输入—单输出反馈控制系统的理论问题, 采用的主要研究方法是根轨迹法和频率法。五十年代末期、六十年代以来, 由于航天技术、微电子技术、计算技术等科学技术的高度发展, 对控制系统提出更高的要求。在理论上迫切需要解决经典控制理论所不能解决的最优控制、多变量、变参数、非线性等控制理论问题, 使自动控制理论出现了新的飞跃, 进入现代控制理论的新阶段。近年来又由于科学技术的进一步发展, 现代控制理论在大系统工程、人工智能控制等方面继续向前深入, 显示出自动控制理论和自动控制技术的无可估量的发展前景和巨大潜力。

本教材研究经典控制理论的一般问题。上册为线性系统理论, 第一章介绍自动控制的基本概念。

§ 1-1 自动控制的基本原理和自动控制系统的组成

所谓自动控制就是在没有人参与的情况下, 利用自动控制装置 (通常简称控制器) 使整个生产过程或工作机械 (称为控制对象) 自动地按预先规定的规律运行, 或使它的某些参数 (称为被控量或被控制量) 按预定要求变化。下面以水位控制系统为例, 说明自动控制的基本原理和有关的一些基本概念。

图 1-1 的水池中, 水自水泵源源不断地通过管道和阀门流进水池, 而由各出水管道流出, 供用户使用。若要求在用水量随意改变的情况下, 保持水池水位高度不变, 则可由人工操作来实现。操作人员首先测量水池的实际水位, 并将它和要求的水位值相比较, 得出偏差或误差。然后根据偏差值调节进水阀门的打开程度, 改变进水量。例如, 当用水量增大, 水位迅速下降时, 应开大阀门使进水量大于用水量, 水位回升。当水位回升到要求值时, 调小阀门使进水量等于用水量。如果用水量等于零, 则应关闭阀门使水位保持在要求的高度。若要求的水位高度随时间变化, 操作人员同样可根据偏差改变进水量, 使水池的实际水位高度随要求高度而变化。这就是人工操作的过程。这个过程可归纳为看、比、算、动, 且连续不断地进行。这一由人工完成控制任务的系统称为人工控制系统。图 1-1 就是水池水位人工控制系统。

在这个控制系统中, 水池是控制对象。水池实际水位是被控量。水池水位要求值称

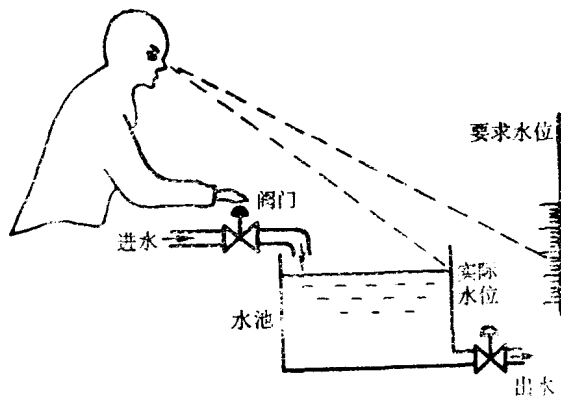


图 1-1 水池水位人工控制系统示意图

为给定值。给定值和实际水位之差，称为偏差或误差。我们将影响被控量偏离要求值的不利因素称为干扰作用或扰动作用，而使被控量回到要求值的作用称为控制作用。图 1-1 中，用水量是扰动作用，进水量是控制作用。

如果用控制装置代替操作人员完成上述操作过程，则构成自动控制系统。上述水位控制系统控制装置至少必须包括以下几部分，才能完成人工操作的各项职能。1. 测量部分：测量水池实际水位高度；2. 比较部分：将测得结果和要求值相比较，得出偏差；3. 调节部分：根据偏差大小产生控制信号（一般来说，控制信号和偏差大小具有一定的关系，这种关系称为控制规律）；4. 执行部分：由控制信号产生控制作用，从而使被控量回到或趋于要求值。

图 1-2 就是由控制装置代替操作人员构成的一种水池水位自动控制系统。这里，浮子是测量元件，连杆起比较作用。电位器输出电压反映水位偏差。放大器、伺服电机、减速器和阀门起放大、调节和执行等各种作用。

由此可见，自动控制系统是由控制对象和控制装置按一定方式联结起来的、完成一定自动控制任务的总体。一般系统的控制装置包括测量元件、比较元件、调节元件和执行元件，通常还有放大元件、变换元件以及为改善系统工作性能而加入的校正元件。

为了更加清楚地表示控制系统的组成和各组成部分之间的互相作用，常画出控制系统的元件作用图，简称为方块图。方块图中，装置用方块表示，信号用箭头表示。进入方块的箭头表示该装置的输入量，离开方块的箭头表示其输出量。方块图中还包含有信号的分支点（表示信号分成多路取出，也叫做取出点）和相加点（表示多个信号的代数相加）。

图 1-3 (a) 为图 1-2 水位自动控制系统方块图。通常我们把控制系统的被控量叫做系统的输出量，而把影响系统输出量的外界输入叫做系统的输入量。一般系统的输入量有两类，即给定输入和扰动输入。在该水位自动控制系统中，水池实际水位

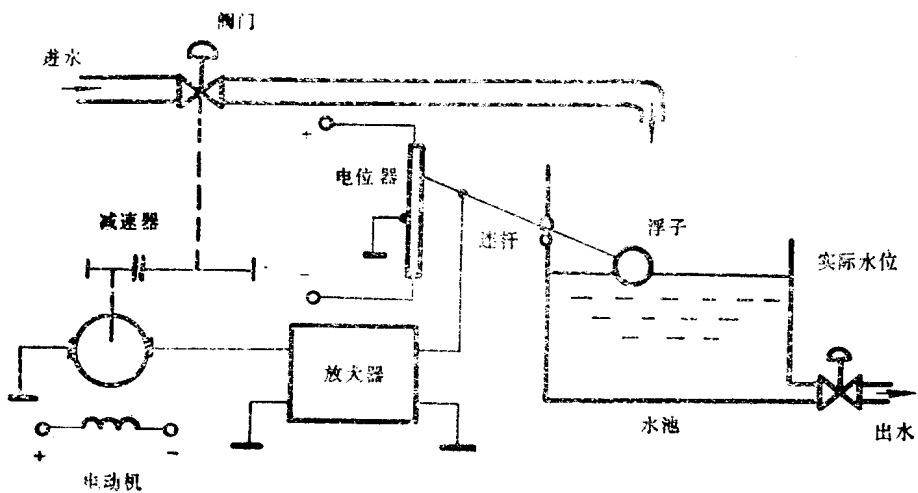
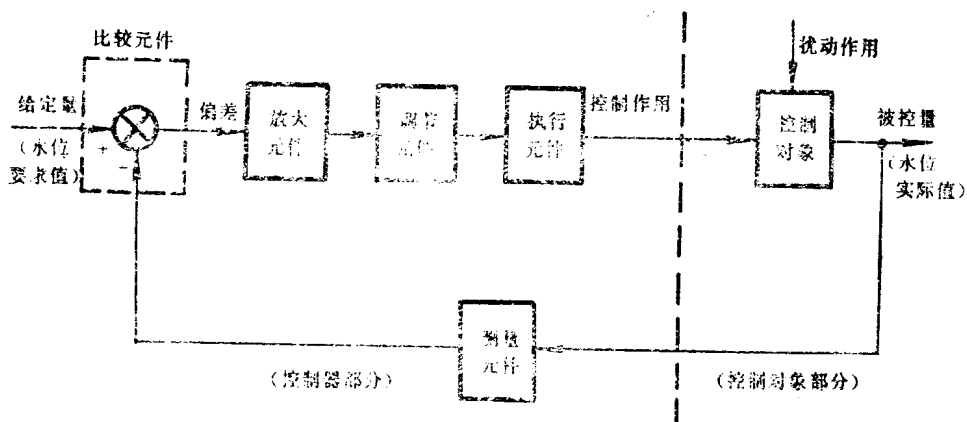
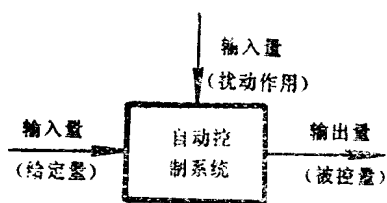


图 1-2 水池水位自动控制系统示意图



(a)



(b)

图 1-3 自动控制系统的方块图

是系统输出量,要求的水位高度为给定输入而用水量为扰动输入。整个自动控制系统也可以用一个大方块表示,如图 1-3 (b) 所示。

图 1-3 (a) 也是一般自动控制系统的方块图。现在我们参照该图讨论自动控制系统的工作原理,讨论时应注意其各组成部分在系统中的作用和它们之间的互相关系。自动控制系统能使被控量克服各种扰动(外部的或内部的)的影响而按给定值的要求而变化。当被控量偏离给定值的要求时(通常是给定值变化或给定值未变而由扰动作用引起被控量变化),测量元件测得被控量的值,经物理量变换后由比较元件将其与给定值比较得出偏差。根据偏差大小,经放大、调节、执行等元件后,产生控制作用。控制作用使被控量回复到或趋近于要求值,从而使偏差消除或减少。这种通过测量、比较得到偏差,由偏差产生控制作用和控制作用使偏差消除或减少的原理,就是我们所研究的自动控制系统的工作原理。

§ 1-2 自动控制系统的特点和种类

为什么自动控制系统能够自动地检测偏差并且消除或减小偏差呢?下面我们进一步分析自动控制系统的优点。

首先,系统的输出量经测量后回送到输入端,和给定值进行比较得出偏差。从信号的传送来看,回送的信号使信号通路闭合,构成闭环。回送信号的过程称为反馈。这里,反馈的联结方式是负反馈。由负反馈构成闭环是自动控制系统的结构特点。因此它能自动地检测偏差。

第二,从控制作用的产生来看,它是由偏差引起的。即一旦出现偏差,就产生控制作用。由于系统的联结方式,这种控制作用将使系统的被控量自动地沿减小或消除偏差的方向运动。由偏差(或误差)引起控制作用叫偏差控制。偏差控制也是自动控制系统的一个特点。

由于具有上述的两个特点,如上自动控制系统又称为闭环控制系统、反馈控制系统或偏差控制系统。上面所讨论的自动控制系统的工作原理,叫做反馈控制原理。

和闭环控制系统不同的另一类系统是开环控制系统,在这一类系统中,信号的传送不构成闭合回路。和偏差控制系统不同的另一类系统是扰动控制系统。扰动控制系统的控制作用是由扰动量产生的。还有一类系统同时具有开环和闭环的通路或者同时具有偏差控制作用和扰动控制作用,这样的系统称为复合控制系统。控制工程上遇到的控制系统包括开环控制系统、闭环控制系统,扰动控制系统和复合控制系统。通常都把这些系统称为自动控制系统。

现以直流电动机转速控制为例,给出上述各种结构方式的自动控制系统的线路图和方块图,并且简单叙述它们的工作原理和特点。

图 1-4 是直流电动机转速开环控制系统的原理线路图。电动机励磁电压为常数,采用电枢控制方式。给定值是电压 u_g ,改变电位器滑臂位置,可得到不同的 u_g 值。 u_g 值经放大后得不同的 u_a 值,从而控制电机转速 n 。当负载力矩不变时, u_a 和 n 有一一对应的关系,因此可由给定电压直接控制转速。从相应的方块图(图 1-5)可见,这里没有反馈,信号通路不闭合,所以是开环系统。这种系统线路简单,成本低,但精确程度也

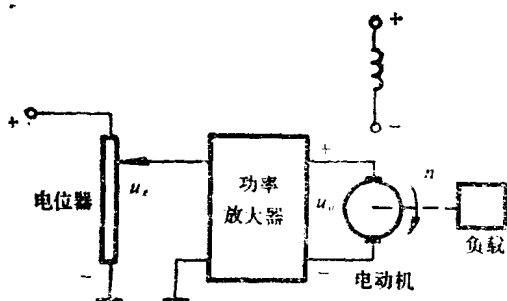


图 1-4 直流电动机转速开环控制系统

器,则可构成闭环控制系统。图1-6、图1-7分别为它的原理线路图和方块图。这里 u_g 和 n 也有一一对应的关系。例如已调整好 $u_g = u_{g1}$ 时, $n = n_1$ 。一旦扰动作用引起转速变化,例如转速小于 n_1 ,测速发电机输出电压降低,偏差电压 $u_e = u_g - u_a$ 相应增大,使 u_a 增加,转速上升。反之,当转速大于 n_1 , u_e 减小, u_a 也相应减小,转速下降。这种由反馈构成闭环、按偏差产生控制作用的系统,任何因素引起转速的变化都将引起自动进行调节转速的过程,以减小或消除偏差。所以这种闭环

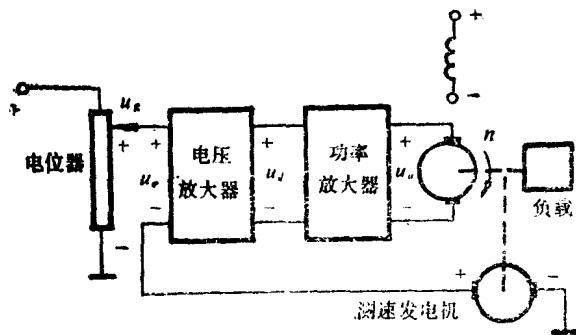


图 1-6 直流电动机转速闭环控制系统

测量元件的测速发电机,能将转速转换成电压,以便和给定电压比较得到电压 u_n 。由 u_e 产生控制作用, u_e 为系统的偏差。系统的误差定义为被控量的实际值和要求值之差,在这里是转速差。显然误差和偏差是不同的。由于给定值和被控量的要求值有一定的对应关系,所以在系统分析中可用偏差反映系统的误差。

在一般的转速控制系统中,负载力矩的变化将引起转速的改变。如果我们能测量变化的负载力矩,并根据它的大小产生附加的控制作用,以补偿它引起的转速的改变,这样就可以克服或减小力矩变化对转速的影响。这种系统具有扰动产生的附加控制作用或

低。例如,根据 u_g 和 n 的对应关系, $u_g = u_{g1}$ 时, $n = n_1$ 。如果出现扰动(例如负载力矩变化),将引起转速变化,出现误差。但该开环系统既无测量转速的设备,也无法通过改变控制作用来调节转速。这时实际转速不等于 n_1 ,即 u_{g1} 和 n_1 的对应关系在扰动变化的情况下是不精确的。为提高控制精确度,应采用闭环控制系统,或在开环控制的基础上附加扰动控制。

如果在上述系统中加进自动控制

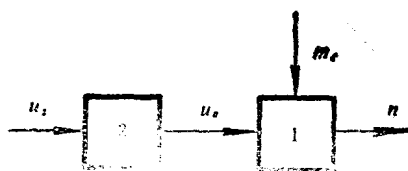


图 1-5 开环控制系统的方块图

图中 1—电动机

2—功率放大器

控制系统或偏差控制系统具有较高的控制精确度。但闭环控制系统使用元件多,线路复杂。并由于信号反馈作用,如果未选好元件或参数配合不合适时,调节转速的过程可能变得很差,甚至出现发散或等幅振荡的情况。

图 1-6 系统中,被控制量是转速 n ,给定值是电压 u_g 。转速和电压是不同的物理量。作为

补偿作用，故称为扰动控制系统。图1-8是对负载力矩实现扰动补偿的扰动控制系统。这里，电枢电流反映负载力矩的大小。即 u_B 作为附加的控制电压，它将引起 u_a 的变化以产生附加的控制作用。画出相应的方块图，可以看出补偿控制的信号通路仍然是开环的（见图1-9）。

扰动控制此偏差控制线路较简单，也具有较高的精确度。但它只能在扰动可以测得的情况下采用，而且一个补偿装置只能补偿一种与之相对应的扰动因素。对于其他的扰动因素，它未必能起补偿的作用。

图1-10是同时具有偏差控制和扰动控制的复合控制系统。它把两种控制方式结合起来，可以得到更理想的控制效果。其方块图如图1-11。

精心设计的反馈控制系统具有很好的控制性能，因而得到了广泛的应用。以它为基础的控制理论已具有较完整的体系。本课程所研究的经典控制理论就是这类具有闭环结构的反馈控制系统的理论。

为了研究上的方便，我们还将反馈控制系统按照一定的原则分成各种类型。通常控制系统的输入作用有两类：给定输入和扰动输入。按照输入作用的变化情况可将反馈控制系统分成恒值控制系统和随动系统两大类。

1. 恒值控制系统（或称定值调节系统、自动镇定系统）

这类控制系统中，给定值是不变的。但由于扰动的存在，将使被控量偏离要求值。控制系统能根据偏差产生控制作用，使被控量回复到要求值，以克服扰动作用的影响。上面列举的水位控制系统和速度控制系统，当给定值不变时都是恒值控制系统。

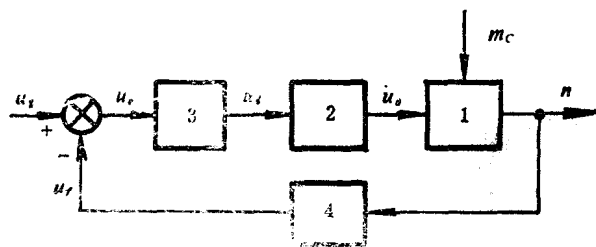


图1-7 闭环控制系统的方块图

图中 1—电动机 2—功率放大器
3—电压放大器 4—测速发电机

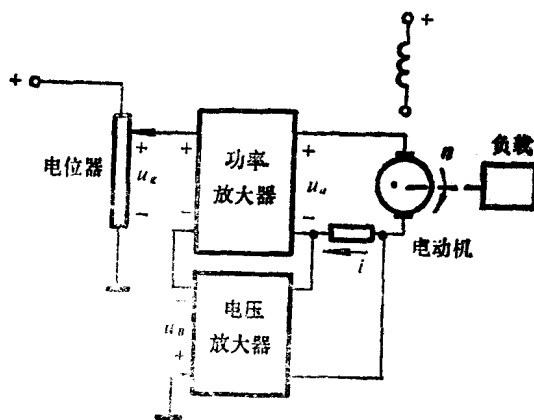


图1-8 直流电动机转速扰动控制系统

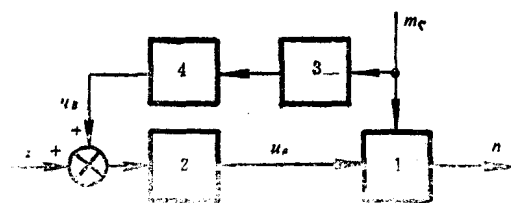


图1-9 扰动控制系统方块图

图中 1—电动机 2—功率放大器
3—扰动测量器 4—电压放大器

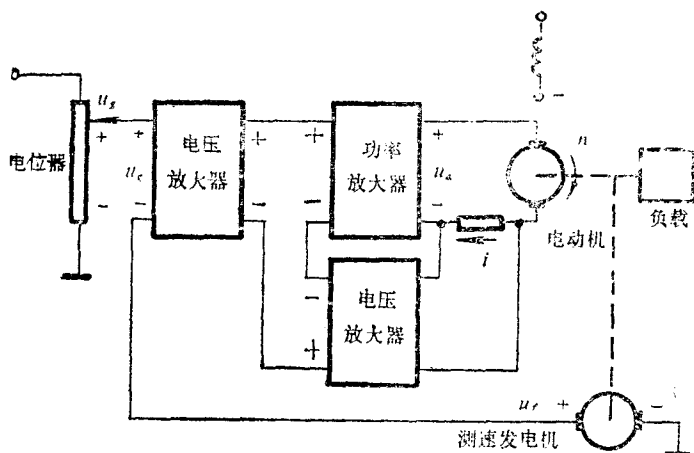


图 1-10 直流电动机转速复合控制系统

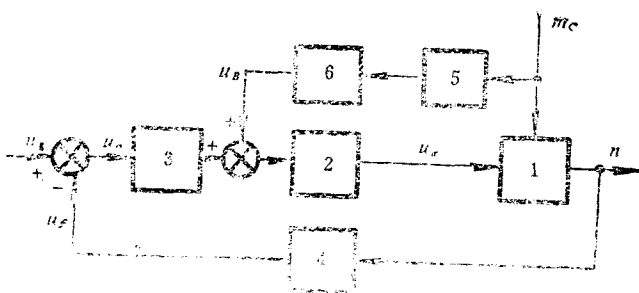


图 1-11 复合控制系统方块图

- | | |
|-----------|---------|
| 1—电动机 | 2—功率放大器 |
| 3、6—电压放大器 | 4—测速发电机 |
| 5—扰动测量器 | |

2. 随动系统（或称自动跟踪系统）

这类系统中，给定值是预先未知的随时间任意变化的函数。控制系统能够使被控量（即输出量）以尽可能小的误差跟随给定值（即输入量）随时间的变化。随动系统也能克服各种扰动作用的影响，但一般说来，扰动的影响是次要的。

现举一个随动系统的例子。图 1-12 是船舶驾驶舵角位置跟踪系统。给定值 θ_i 表示命令的角位置，被控量 θ_o 为船舵角位置。控制系统使船舵角位置按给定命令变化，即被控量跟随给定值。理想跟踪情况下两者相等。当两者不等时，电位器组有电压 u_e 输出。 u_e 经放大以后使执行电机连同船舵和输出电位器的滑臂一起做跟随给定值 θ_i 的运动。这一系统的组成部分和图 1-2 的水位控制系统的各部分是对应的。自动控制器也包括有测量、比较、放大、控制、执行等部分。这个系统中被控量 θ_o 的要求值即为给定值 θ_i 。系统误差 $\theta_i - \theta_o$ 也是偏差。这里电位器组起测量比较作用，其输出电压 u_e 反映系

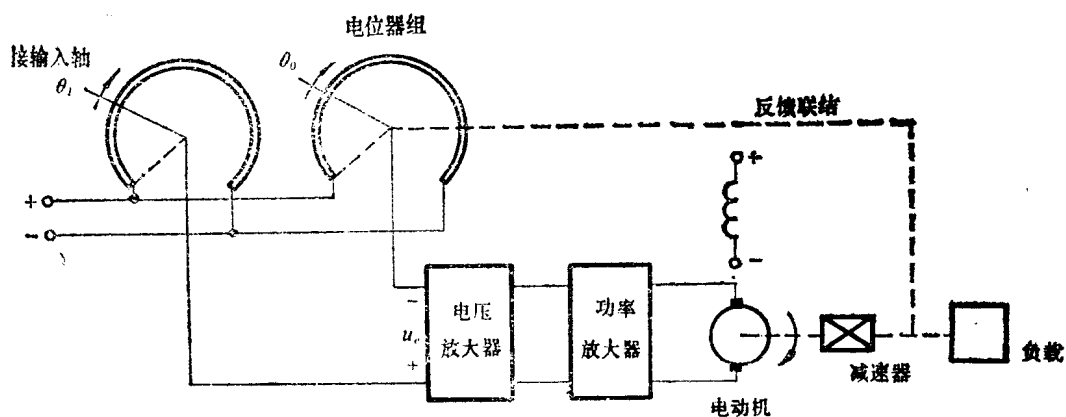


图 1-12 电位器随动系统原理图

统误差或偏差。作出该系统的方块图 (图 1-13)，可见 θ_o 直接反馈到输入端和 θ_i 比较，这种系统称为具有单位反馈或直接反馈的控制系统。随动系统常具有这种结构形式。

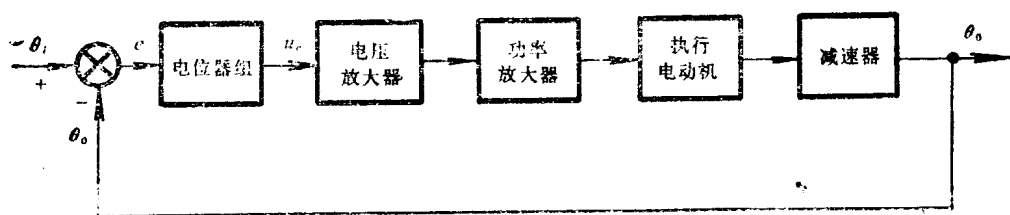


图 1-13 电位器随动系统方块图

图 1-12 的随动系统也可以对给定输入附加一个补偿通道 (是一个开环通道) 构成开环-闭环复合控制系统。图 1-14 是复合控制随动系统的方块图。

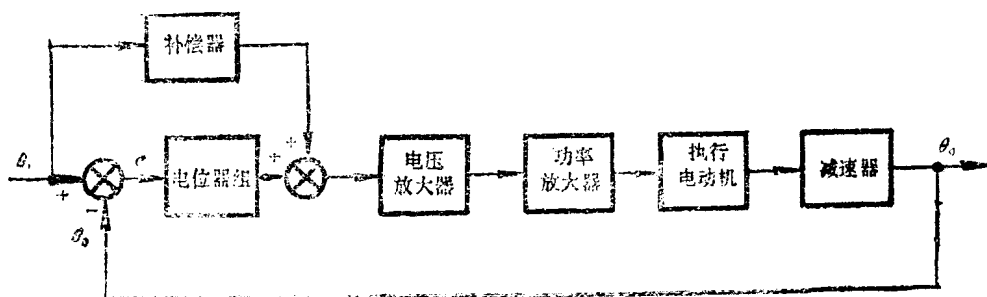


图 1-14 复合控制随动系统方块图

还有一类自动控制系统，它的被控量是温度、流量、压力等生产过程参数。它们在控制过程中要求保持恒定或按某种预定规律变化，控制对象往往是整个生产过程或其中一些装置。这类控制系统称为过程控制系统。

反馈控制系统还有其他的分类方法。控制工程上常见到的反馈控制系统，在变量之间的数学关系上可以是线性的，也可以是非线性的。在控制作用和时间关系上可以是断续的，也可以是连续的。这些都是本课程研究的内容。随着现代科学和生产的发展，对控制技术的要求愈来愈高，因此出现了许多新的、更加复杂、性能更高的自动控制系统。例如，使用计算机完成控制或处理数据的计算机控制系统 按某方面要求实现性能最优的最优化控制系统，能不断改变自身结构和参数以适应环境或内部参数变化的自适应系统，以及具有判别、积累经验和学习能力的自学习系统等等。这些新型的控制系統将在现代控制理论和各专题课程中研究。

§ 1-3 自动控制系统的研究内容、研究方法 以及对系统的基本要求

自动控制系统虽然有不同的类型，但具有相类似的研究内容和方法。例如，已知系统的结构和参数时，研究它在某种典型输入信号作用被控量变化的全过程。从这个变化过程得出其性能指标，并讨论性能指标和系统的结构、参数的关系。这类问题叫做对系统进行分析。对恒值系统来说，研究典型扰动作用引起被控量的变化过程。对随动系统来说，研究典型给定量变化时，被控量跟随给定量变化的过程。如果系统中扰动作用

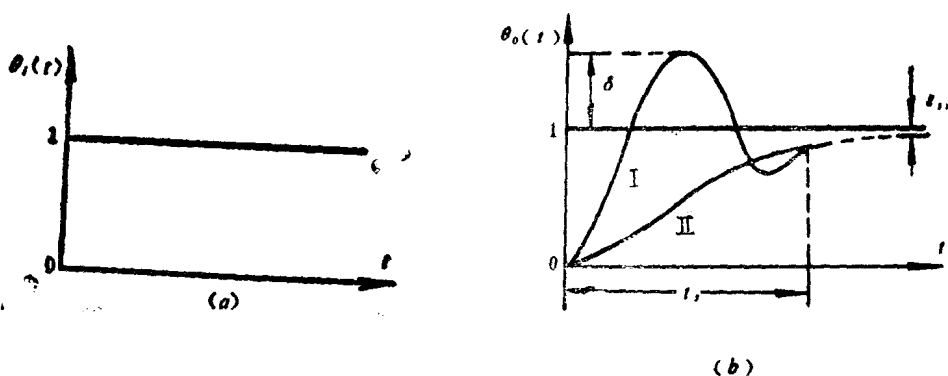


图 1-15 随动系统工作情况

(a) 单位阶跃给定值变化

$$\theta_i(t) = 1(t)$$

$$1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$

(b) 被控量跟踪过程

曲线 I 衰减振荡的跟踪过程

$\delta \times 100\%$ —最大超调量

t_s —调节过程时间

ϵ_{ss} —稳定误差

曲线 II 单调跟踪过程

和给定量均在改变，则研究系统如何克服扰动的影响而使被控量跟随给定量的变化。恒值系统和随动系统，虽然输入作用的变化和调节过程的特点有所不同，但都是反馈控制系统，工作原理和组成部分是相类似的。因此，在分析上可采用相类似的方法研究运动过程的共同规律。

例如，研究随动系统在给定值为单位阶跃变化时〔如图 1-15 (a) 所示〕，被控量的跟踪过程。由于实际系统中存在惯性，被控量不可能具有阶跃变化的跟踪过程。通常如图 1-15 (b) 所示，出现单调的或振荡的跟踪过程。随着时间的增长，被控量逐渐趋于它的要求值（或新的稳态值）。我们称阶跃加入后一段时间里被控量的变化过程为瞬态过程，时间足够大以后被控量趋于新的稳态值的变化过程为稳态过程*。我们用振荡情况、快动作性等指标来描述瞬态过程的性能，用稳态误差来描述稳态过程的性能。图 1-16 还画出了恒值系统在阶跃变化扰动作用下被控量的调节过程。这里也有瞬态过程和稳态过程的概念。瞬态过程也称动态过程、暂态过程。外作用加入后，系统须经过一段时间才能过渡到稳态过程，所以瞬态过程也称为过渡过程。

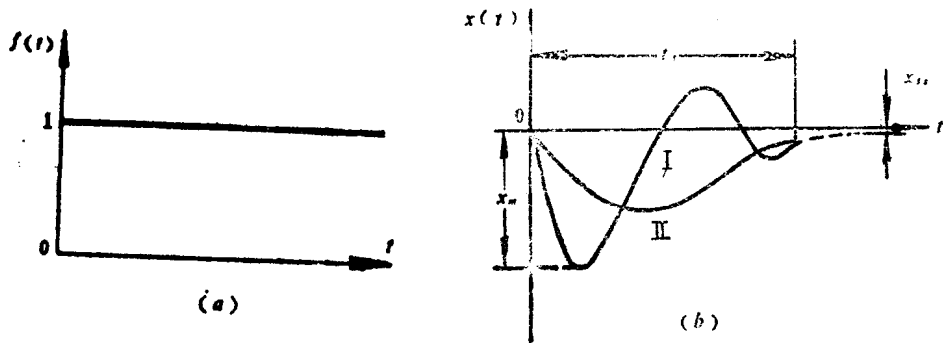


图 1-16 恒值系统工作情况

- (a) 单位阶跃扰动变化
 $f(t) = 1(t)$
- (b) 被控量调节过程
- 曲线 I: 衰减振荡的调节过程
 x_m —最大过调量
 t_s —调节过程时间
 x_{ss} —稳态误差
- 曲线 II: 单调调节过程

但是，并不是所有的反馈控制系统在阶跃变化的外作用加入后都有如图 1-15 或 1-16 所示的变化过程。例如讨论随动系统的情况，因为惯性的存在，跟踪过程开始时（即 $t=0$ 时）被控量的变化速度不会突变而是慢慢加大。随着时间的增大，被控量逐渐上升。它和给定的阶跃变化值之差即误差也将逐渐变小。当误差为零时，控制作用也为零。由于系统有惯性，被控量并不因控制作用为零而停在给定值上，仍以一定的速度继续运动，产生了反方向的误差。这时控制作用反向，使原来的跟踪速度逐渐减到零，并出现与反向控制作用相应的反向消除误差的运动。接着，反向误差减到零以后，又产生正向误差……。周而复始，出现振荡的跟踪过程。如果振荡的振幅保持不变，或随时间逐渐加大，被控量将无法保持在要求值上。这种跟踪过程叫做不稳定的跟踪过程。如

* 详见 § 1—3