

第一章 控制系统的一般概念

§ 1.1 引言

随着生产和科学技术的发展,自动控制技术在国民经济和国防建设及人民生活中所起的作用越来越大,自动化水平也越来越高。自动控制技术广泛地应用于工农业生产、交通运输、航空和航天等各个领域。所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,通过控制器使被控制对象或过程自动地按照预定的规律运行。例如,在工业生产过程中,对诸如压力、温度、湿度、流量、频率以及原料、燃料等方面的控制都是自动控制的具体应用。

自动控制技术的应用不仅使生产过程实现了自动化,改善了劳动条件,极大地提高了劳动生产率和产品质量,而且在能源开发、空间技术发展和人民物质生活改善方面也起着极其重要的作用。

导弹能准确地命中目标,人造卫星能按预定轨道返回地面,宇航飞船能准确地月球着陆,并成功返回,这些都是自动控制技术的具体应用。特别是近 20 年来,计算机技术的发展,使之成为自动控制技术不可缺少的重要组成部分,同时为自动控制技术的发展和應用开辟了广阔的新领域。

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系统共同规律的技术科学。在控制理论的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理。随着生产和科学的进步,现已发展成为一门独立的学科——控制论。控制论包括工程控制论、生物控制论和经济控制论。工程控制论主要研究自动控制系统中的信息变换和传送的一般理论及其在工程设计中的应用。而自动控制原理仅仅是工程控制论的一个分支,它是研究控制系统分析和设计的一般理论。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制原理可以分为“古典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

古典控制理论是 20 世纪 50 年代初期所形成的理论体系,它主要研究以传递函数为基础的单输入-单输出线性定常系统的分析和设计问题。这些理论的发展较早,已臻成熟,在工程实践中已得到广泛的应用。

现代控制理论是 60 年代随着科学技术的发展和工程实践的需要,特别是宇航技术的需要而出现的新理论。它主要以状态空间法为基础,研究多输入-多输出、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题。如最优控制、最优滤波、自适应控制及模糊控制等。现代应用数学和计算机技术的应用大大推进了现代控制理论的发展。这使它正向系统工程、大系统理论以及人工智能等方面发展。值得注意的是,现代控制理论不仅是古典控制理论的简单延伸和推广,而且是理论上的一次飞跃。

现代控制理论的发展虽然解决了许多古典控制理论不能解决的问题,但是并不能说古典

控制理论已经过时。正相反，由于古典控制理论便于工程应用，今后还将在工业生产过程中发挥重要作用。两者相辅相成，不断推动自动控制理论的发展。

§ 1.2 开环控制与闭环控制

一、控制系统工作原理

自动控制系统是指能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的系统。在各种生产过程或生产设备中，为了维持正常的工作条件，常常需要使其中某些物理量（如温度、压力、位置、转速等）以一定的精度维持某一数值，或使它们按一定的规律变化。要满足这种需要，就应对该生产过程或设备进行合适的控制，以抵消外界的干扰和影响。那么，自动控制系统是怎样维持温度、压力、转速等物理量的恒定而实现自动控制的呢？下面我们先来研究一个温度恒值控制系统的例子。

实现恒温控制一般有两种方法，即人工控制和自动控制。图 1-1 所示为温度人工控制系统原理图。所谓人工控制系统就是由人直接参与对一些物理量进行控制的系统。人工控制的任务是克服外界干扰，维持某一物理量恒定。对图 1-1 所示系统而言，就是要克服电源电压波动、环境温度变化、被加热工件放入与取出等干扰，保持恒温箱的温度恒定，以满足被加热工件对温度的要求。通常可以通过移动变阻器的滑动触头位置来改变加热电阻丝的电流，以达到控制温度的目的。箱内温度是用温度计人工测量的。人工温度控制过程大致可以归纳如下：首先观察由测量元件（温度计）测出的恒温箱的实际温度（被控制量），然后将测出的实际温度与恒温箱内要求达到的温度（给定量）进行比较，得出两变量差（偏差）的大小和方向；最后根据偏差的大小和方向再进行控制。当恒温箱温度高于所要求的给定温度值，就移动调压器滑动触头将电流减小，使箱温减小到正常范围内；若箱温低于给定温度，则移动调压器触头将电流增加，使箱温增大到正常范围。

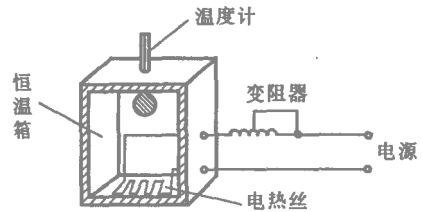


图 1-1 温度人工控制系统原理图

由此可见，人工控制过程的实质就是“检测偏差，纠正偏差”的过程。对电动机转速控制、水位控制以及位置控制等等，都可用类似的方法进行，以保证相应的物理量恒定。

虽然人工控制系统能克服某些干扰的影响，但它也有许多缺点，有时甚至无法实现。具体来讲，首先，人工控制系统的控制精度不高，或者说控制精度完全取决于操作者的经验；其次，由于有些控制过程反应极快，人的反应不能适应；第三，有些场合如高温、放射性、有毒气体等环境对人体有危害，人无法直接参与控制。因此，为了进一步改善控制系统性能，必须应用电气的、机械的、液压的等自动装置来代替人的职能，这样人工控制系统就发展成为自动控制系统。图 1-2 所示为温度自动控制系统原理图。

在这个控制系统中，恒温箱的温度由给定信号电压 u_1 控制。当干扰引起箱内温度变化后，作为测量元件的热电偶，其输出为与温度相对应的电压信号 u_2 ，并反馈回去与给定信号电压 u_1 相比较，所得结果即为温度的偏差信号电压 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。偏差电压经过电压、功率放大

后以控制电动机的旋转速度和方向 并通过机械减速传动装置拖动调压器触头滑动。当恒温箱内温度偏高时 使调压器减小加热电流 反之加大电流 直到温度达到给定值为止。此时偏差电压 $\Delta u = 0$ 电机停转。这样就完成了所要求的恒温控制任务，而所有这些装置便组成了一个温度自动控制系统。

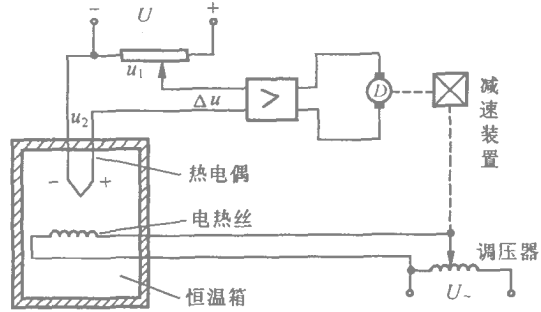


图 1-2 温度自动控制系统原理图

通过上面的分析可以看出：不论是人工控制还是自动控制，它们都有两个共同点 即一是要检测偏差 二是要利用检测到的偏差去纠正偏差。通常在自动控制系统中，这一偏差就是通过反馈建立起来的。给定量又称为控制系统的输入量，被控制量又称为系统的输出量。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号返回到输入端，使之与输入量进行比较的意思。比较的结果称为偏差。控制系统就是根据这一偏差信号的大小和方向进行工作，使偏差减小或消除，从而使输出量和输入量保持一致或基本保持一致。因此基于反馈基础上的偏差控制原理又称为反馈控制原理。利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。

这里要特别指出的是 反馈控制系统中的反馈，一般均是指负反馈。所谓负反馈 即偏差信号。它是输入量与输出量相减得到的。如上例中偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。 u_2 就是负反馈电压，否则系统不能正常工作。所以，通常所指的反馈控制系统或自动控制系统均是指负反馈控制系统。

现将温度自动控制系统绘制成方框图，如图 1-3 所示。图中方框代表系统各组成部分， \otimes 代表比较元件，方框两边直线及其标注代表该组成部分在控制过程中相互作用的物理量，箭头代表作用的方向。同时还可看出 被控量 温度 是系统的输出量 给定的电压信号是系统的输入量，偏差（电压）是通过测量元件热电偶将输出量反馈到输入端与输入量比较（相减）而得。控制对象是恒温箱。影响被控量的各种因素称为干扰或扰动，控制对象经常受到扰动的作用。

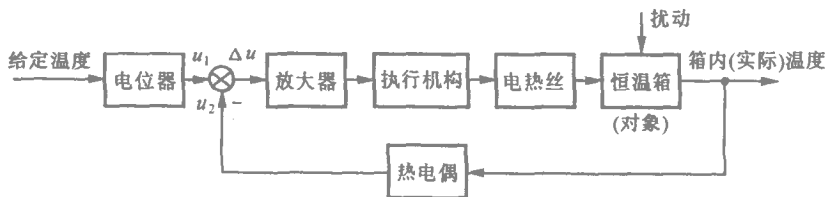


图 1-3 温度自动控制系统方框图

二、开环控制系统和闭环控制系统

控制系统根据有无反馈作用，一般可分为两类：一类是开环控制系统 另一类是闭环控制系统。

1 开环控制系统

如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路，输出量对系统的控制作用没有影响时，这样的系统就称为开环控制系统。图 1-4 为一直流电动机转速开环控制系统。

该系统根据给定电压的大小和方向来控制电动机转速的大小和方向，图 1-4 是系统原理图。假设电动机励磁电压恒定，采用电枢控制方式，输入量是给定电压 u_r ，改变电位器位置可得到不同的 u_r 值， u_r 值经放大后得到不同的电枢电压 u ，从而控制电动机转速 n 。当负载力矩不变时， u_r 和 n 有一一对应关系，因此可由给定电压直接控制转速。由图 1-5 所示的系统方框图可以看出，该系统没有反馈，信号传输是单向的。系统中的输出量即被控制量只受控于输入量，即控制量，而不能对控制量反施任何作用。因此，开环控制系统的精度主要取决于系统“校准”的精度，取决于工作过程中校准值以及组成系统的元件特性和参数值的稳定程度。

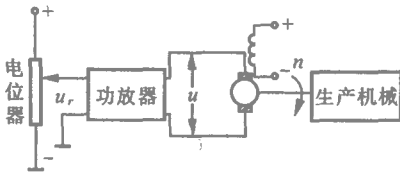


图 1-4 转速开环控制系统原理图

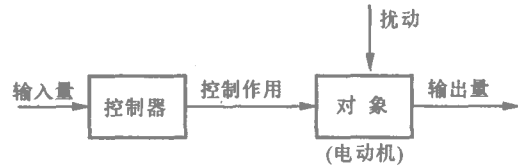
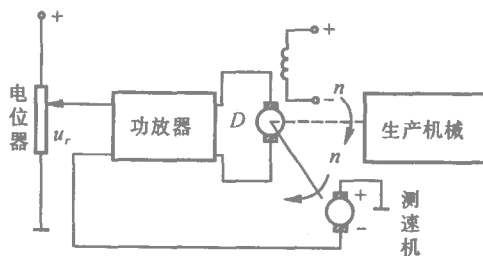


图 1-5 转速开环控制系统方框图

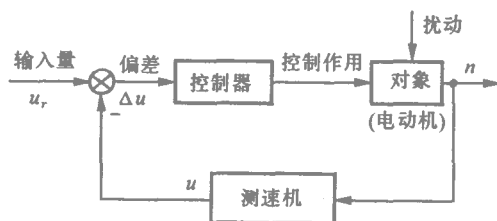
如果系统不存在干扰而且元件参数比较稳定的话，由于开环系统结构比较简单，故可以保证足够的精度。在系统存在扰动的情况下，因为没有反馈，就没有办法自动校正输出量使之达到给定值，因此使开环系统精度降低。为了对其进行补偿就必须借助人工改变输入量。前面介绍的人工控制恒温箱系统是一个典型的开环控制系统，其中反馈由人本身来完成。

2. 闭环控制系统

凡是系统的输出端与输入端存在反馈回路，即输出量对控制作用有直接影响的系统，叫做闭环系统。所以，反馈控制系统也是一个闭环控制系统。如果对图 1-4 所示的开环控制系统引入反馈回路，即用测速机直接检测被控量转速，然后反馈到输入端，就构成了闭环控制系统，如图 1-6(a) 所示，其方框图如图 1-6(b) 所示。



(a) 转速闭环控制系统原理图



(b) 转速闭环控制系统方框图

图 1-6 闭环控制系统

闭环控制系统突出的优点是精度高，不管任何干扰，只要被控量的实际值偏离给定值时，闭环控制系统中就会产生控制作用来减小这一偏差。

但是，闭环系统也有它的缺点，如使用元件多，线路复杂。另外，由于组成系统的元件的惯

性 传动链的间隙等因素存在 如配合不当 将会引起反馈控制系统的振荡 从而使系统不能稳定工作。

3. 闭环和开环控制系统比较

综上所述，可将开环控制与闭环控制的特点进行比较，归纳如下：

开环控制是一种无反馈控制方式。在开环控制系统中只存在控制器对被控对象的单方向控制作用，而被控制量不能对控制量反施任何作用。系统的精度取决于组成系统的元、部件自身的精度。开环系统对外部干扰及内部参数变化的影响缺乏自动修正的能力。但是开环系统结构简单 比较容易设计和调整 且无稳定性问题。可用于输出量与输入量关系为已知 内外扰动对系统影响不大并且控制精度要求不高的场合。

闭环控制采用了反馈控制方式。在控制过程中，被控制量受控制器的控制作用，同时还对被控量（输出量）不断测量、并将其反馈到输入端与给定输入值进行比较，产生的偏差信号被送到控制器的输入端产生控制作用。只要反馈信号与给定值存在偏差，系统就产生控制作用。因此 可以采用精度不高、成本较低的元、器件组成精度较高的闭环控制系统。闭环系统的稳定性始终是一个重要问题，如果参数选择不适当，反馈的引入可能会使本来稳定运行的开环系统产生强烈振荡甚至不稳定。

这里有一点需要注意的是：并不是开环控制的精度就一定不如闭环控制系统。要想提高开环控制系统的精度就要提高系统中所有元件的精度，这样会造成成本的上升。对于闭环控制系统来说，控制精度主要取决于测量元器件的精度，一般测量元件的精度较其它元件的精度高一个量级。由于反馈的加入 使系统的结构复杂了 元器件的增加 也增加了成本。应该说 开环控制与闭环控制各有其优点，要解决不同的任务，可以分别选用不同的系统。

4. 控制系统举例

[例 1-1] 船舶航向控制系统

在船舶控制中，船舶的航向控制是最基本的。不论何种船舶，为了完成各种任务必须进行航向控制。船舶的航向控制一般通过操纵舵的运动来完成。

船舶在航行过程中希望它既具有良好的航向保持能力又具有灵敏的机动性。最常用的航向控制装置就是船舶自动操舵仪，也叫船舶自动舵。

自动操舵仪操纵舵的运动，通过舵和船舶的一系列水动力作用，船舶即可改变航向。航向指令是给定船舶航向控制的输入信号而船舶的航向角为系统实际输出量。船舶航向控制的原理框图见图 1-7 所示。

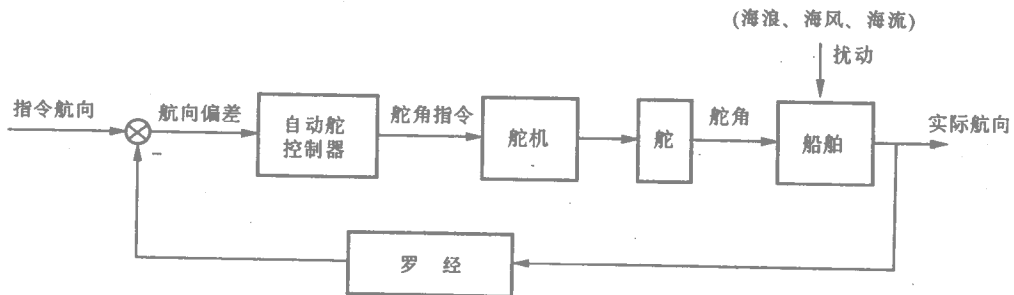


图 1-7 船舶航向控制原理框图

船舶的航向一般由罗经来测量。罗经的航向与指定航向比较后，产生一个航向偏差信号，送入自动舵控制器。自动舵控制器根据航向偏差计算出所需的舵角指令信号，舵机在舵角指令信号的作用下把舵转到所需的角度。在舵的作用下，船舶开始改变航向，当船舶的航向与指令航向一致时 航向偏差为零 于是自动舵控制器输出零舵角指令信号 舵机使舵回到零位 使船舶保持在指令航向上航行。因此 海浪、海风和海流等扰动使船舶航向偏离指令航向时 在自动舵系统的作用下，可使船舶回到指令航向上。

[例 1-2] 炮瞄雷达天线随动系统

炮瞄雷达天线随动系统主要有两项任务：一是非战斗状态时系统工作于自动搜索状态，即雷达天线未捕捉到目标时，控制雷达天线匀速旋转；第二项任务是当进入战斗状态后，即雷达天线捕捉到目标时，系统工作于自动跟踪状态，系统根据雷达接收机给出的位置信号来跟踪目标的运动。炮瞄雷达天线随动系统的原理图见图 1-8 所示。

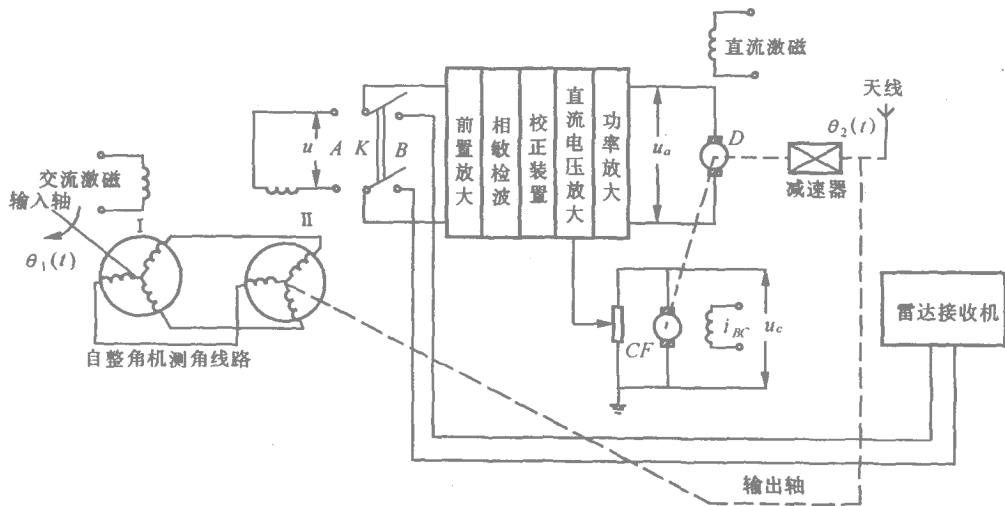


图 1-8 炮瞄雷达天线随动系统原理图

(1) 自动搜索状态

在自动搜索状态时 雷达天线按要求在空中旋转 这时可将开关 K 合至“ A ”位置。图 1-8 中“ I ”为自整角发送机，它的转子轴与系统输入轴相固联；“ II ”为自整角接收机，它的转子轴与天线输出轴相固联。这组自整机组成了测角线路，其作用就是输出一个与输入输出轴角差有关的电压信号 u 。

此系统的执行元件为一直流伺服电动机、由功率放大器的输出电压 u_a 来控制 电动机输出轴经变速箱带动被控对象雷达天线。

下面说明随动系统的工作原理：

假设随动系统已调好 处于平衡状态 输入轴转角 θ_1 与输出轴转角 θ_2 相同 即 $\theta_1 - \theta_2 = 0^\circ$ 故 $u = 0, u_a = 0$ 直流执行电动机不动 雷达天线亦不动。

若自整角发送机转子顺时针转过 θ 则角差 $\Delta\theta = \theta$ 使 $u \neq 0$ 此信号经相敏检波变换 并经功率放大使 u_a 具有足够的功率驱动直流伺服电动机转动， u 的极性决定电动机经减速器带

动天线顺时针旋转 当天线转过 θ 时 由于自整角接收机与天线同轴相联 接收机转子也顺时针转 θ , 使得 $\theta_2 = \theta_1 = \theta$ 即 $\Delta\theta = 0^\circ$, $u_a = 0$ 电动机及天线停止转动。

反之 若自整角发送机转子逆时针转 θ 角 则天线亦逆时针转 θ 角。

若自整角发送机转子连续转动, 则天线也跟着发送机转子按相同方向连续转动。这样天线轴就始终跟随自整角发送机的轴转动, 从而实现被控制量 $\theta_2(t)$ 始终自动跟踪控制量 $\theta_1(t)$ 的变化规律。

自整角发送机的转子可以由雷达手摇动装在轴上的手柄使其转动, 亦可用其它电动机带动发送机转子转动。

随动系统工作在搜索状态的方框图如图 1-9 所示。

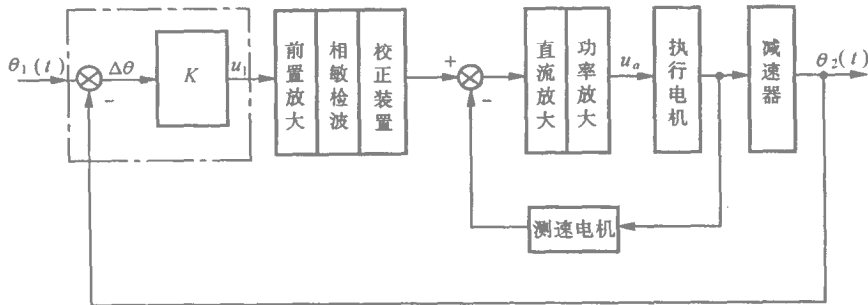


图 1-9 随动系统工作在搜索状态的方框图

(2) 炮瞄雷达天线控制系统的自动跟踪状态

当雷达手从示波器的荧光屏上看到雷达已经捕捉到目标之后, 马上把刀闸 K 合向位置“B”使控制系统进入自动跟踪状态。此时系统的任务是随时测量空中目标(如飞机)的方位角(或俯仰角)使目标始终在天线轴线上。因此系统的输入信号就是目标的方位角(俯仰角)而天线轴所指的方位角(或俯仰角)即为输出信号。在这里雷达接收机是测量元件, 它是根据接收雷达波束的回波以确定目标的方位角(或俯仰角); 当目标不在天线轴线位置上时, 回波波束就产生偏差信号, 此偏差信号经接收机转换成电压信号送入放大器, 经放大后去控制转动天线轴的直流电动机, 使雷达天线的方位角或俯仰角改变, 直到天线轴线指向目标为止, 达到自动跟踪的目的。需要说明, 这里需要两套相同的随动系统分别控制天线的方位角和俯仰角。

§ 1.3 自动控制系统的组成及对控制系统的要求

一、自动控制系统的组成

通过上面对闭环控制系统实例的分析可以看出, 对于一个控制系统, 不管其结构多么复杂用途尽管各种各样, 它们都是由一些具有不同职能的基本元件所组成。图 1-10 就是一个典型的自动控制系统的方框图, 它表示这些元件在系统中的位置及其相互间的联系。作为一个典型自动控制系统应该包括必需的测量元件、比较元件、放大元件、校正元件、执行元件和控制

对象等。

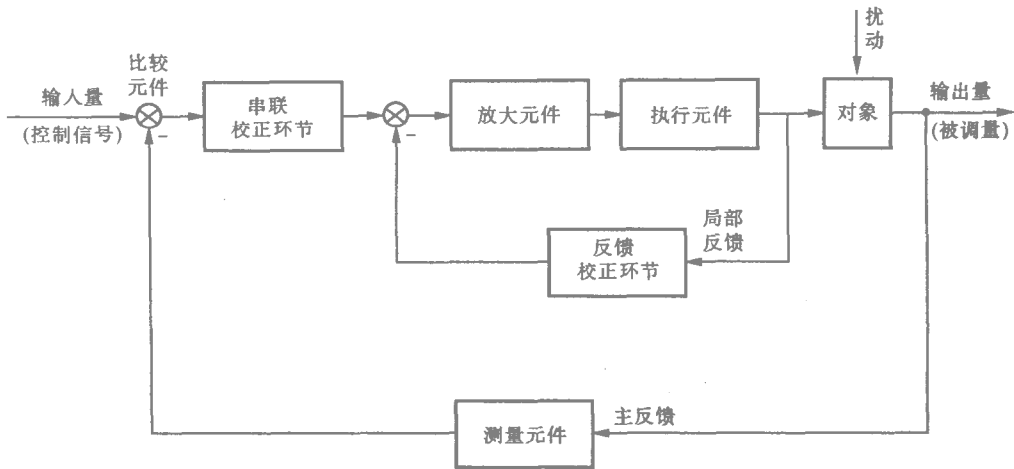


图 1-10 自动控制系统基本组成方框图

测量元件：它产生与被控量有一定函数关系的反馈信号。这种反馈信号可以是被控量本身，也可以是它的函数或导数。如图 1-6(a) 中测速发电机的输出就是系统输出量转角的导数。此外，电位器、自整角机、旋转变压器等元件都可以作为测量元件。

比较元件：它是实现两个或两个以上信号叠加的装置，通常用来比较控制信号和反馈信号，并产生反映两者差值的偏差信号。如电位器电桥、机械式差动装置、工作在变压器状态下的自整角机等都可作为比较元件。

放大元件：把信号放大或能量变换，使之达到足够的幅值和功率，如电压、功率放大器、电液伺服阀等。

执行元件：又称执行机构，它根据控制信号的运动规律直接对控制对象进行操作，如执行电机、液压缸、液压马达等。

控制对象：简称对象，即控制系统所要控制的对象。如电动机转速自动控制系统中，对象即为电动机，也就是与电动机同轴联接的负载（工作台、机床等生产机械）；又如房间温度控制系统，对象是房间；水箱水位自动控制系统，其对象是水箱。一般控制对象的输出量即为系统的被控量，简称被控量。

以上是构成自动控制系统最基本的一些元件。此外，还有：

校正环节：又称校正装置。它是为了改善系统的控制性能而加入到系统中的。一般可分为串联校正装置和反馈并联校正装置。串接在系统前向通路上的校正装置称为串联校正装置。连接成反馈形式的校正装置称为反馈校正装置（或称为并联校正）。

二、对控制系统的要求

虽然控制系统的类型及功能各不相同，但是其研究的内容及方法都是类似的。控制系统在没有受到外作用时，其处于一个平衡状态，系统的输出亦保持其原来状态不变。而当系统受到外作用时，其输出必将发生相应的改变。因为系统中总是包含具有惯性或贮能特性的元件，所

以输出量不能立即按希望的规律变化，而是有一个过渡过程。例如一个随动系统，当输入突然改变时，由于系统中存在惯性，输出端不可能马上跟踪上输入，而是要经过一个缓慢的或摆动式变化过程最后达到希望的数值。又例如水平飞行的飞机，当受到垂直上升气流扰动后，自动驾驶仪将控制舵面偏转，直到飞机恢复原来姿态。因为飞机有惯性，所以这种恢复有一个摆动过程。在这个过程中，如果飞机机身摆动次数过多或摆动幅度过大都会给机组人员及乘客以不适的感觉。每一个控制系统在不同的外作用下，都会表现出各不相同的过渡过程特性，它是衡量控制系统动态品质的重要标志。一旦过渡过程结束，系统将进入新的平衡状态。此时系统的输出量应准确地达到期望的输出值。实际上，由于环境及系统本身的结构参数和一些非线性等的影响，系统输出只能以一定准确度响应输入信号。

1. 典型输入信号

为了研究自动控制系统的性能，必须分析系统的响应即过渡过程。而系统的响应与系统的输入信号形式有关，输入信号不同，系统的响应也不同。但是，自动控制系统的实际输入信号往往具有随机性质，因为事先不知道，所以无法用确定的数学公式表达，这样给分析和设计系统带来很大困难。但是对大多数系统来说，在所有可能的输入信号中，可以选择最典型最不利的信号作为系统的输入信号。在此信号作用下，分析和试验系统的性能是否满足要求，从而可以估计系统在比较复杂的实际输入信号作用下的性能。这种处理，在很多场合是可行的，这会给设计自动控制系统比较不同方案带来很大方便。在控制系统的分析与设计过程中，为了对各种系统的性能进行统一的评价，通常选定几种外作用形式作为典型信号。因此对系统的性能要求，也就归结为系统在典型输入信号作用下应具有什么样的响应。

典型信号的选取应遵循以下原则：

- (1) 应反映系统工作过程中大部分时间的实际输入情况；
- (2) 其形式应尽可能地简单，易于实现；
- (3) 应使系统工作在最不利情况；

在控制系统中经常采用的典型信号有阶跃信号、脉冲信号、斜坡信号、加速度信号、正弦信号等。

(1) 阶跃信号

阶跃信号如图 1-11 所示。其数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} R & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad R \text{ 为常数}$$

$r(t)$ 的拉氏变换为

$$R(s) = \frac{R}{s}$$

当 $R = 1$ 时 $R(s) = \frac{1}{s}$

称为单位阶跃信号，记作 $1(t)$ 。

阶跃信号是自动控制系统在实际工作条件下经常遇到的一种信号。如：恒温调节系统和电动机恒速调节系统，这些工作状态突然改变或受恒定输入作用的其它系统，都可采用阶跃信号作为典型信号。

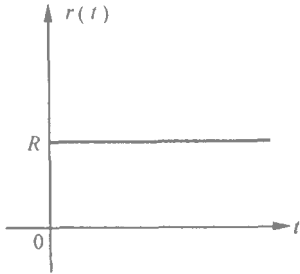


图 1-11 阶跃信号

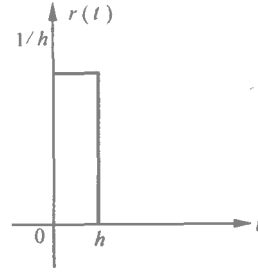


图 1-12 脉冲信号

(2) 单位脉冲信号

工程中经常使用的脉冲函数如图 1-12 所示。其数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 1/h & 0 < t \leq h \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

h 为脉冲宽度。

当 $h \rightarrow 0$ 时 脉冲宽度无穷小 则脉冲高度 $1/h$ 将趋于无穷大, 这时的脉冲称为理想单位脉冲信号 记作 $\delta(t)$ 。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot dt = 1$$

$\delta(t)$ 的拉氏变换为

$$R(s) = \mathcal{L}[\delta(t)] = 1$$

(3) 速度信号 斜坡函数)

斜坡函数如图 1-13 所示。其数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} Rt & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

其中 R 为常数, $r(t)$ 的拉氏变换为 $R(s) = \frac{R}{s^2}$

当 $R = 1$ 时, $R(s) = \frac{1}{s^2}$ 称为单位斜坡信号。在实际系统中, 这意味着一个随时间以恒定速率增长的外作用信号。对于火炮自动跟踪系统以及输入信号随时间逐渐变化的其它系统, 斜坡函数是比较合适的典型输入信号。

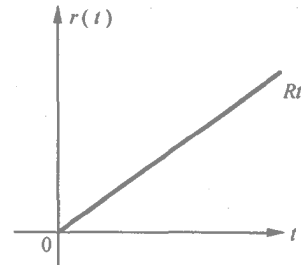


图 1-13 斜坡信号

(4) 加速度信号 抛物线函数)

加速度信号如图 1-14 所示。其数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} Rt^2 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

其中 R 为常数, $r(t)$ 的拉氏变换为 $R(s) = \frac{2R}{s^3}$

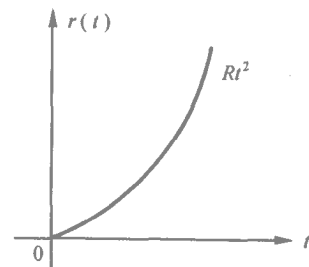


图 1-14 加速度信号

当 $R = \frac{1}{2}$ 时,称为单位加速度信号 这时 $R(s) = \frac{1}{s^3}$ 。

(5) 正弦信号

用正弦函数作为输入信号,可以求得系统在不同频率的正弦输入下的稳态响应,这种响应称为频率响应(或称频率特性)正弦函数可用下式来描述:

$$r(t) = A \sin \omega t$$

式中 A ——正弦信号的振幅;

ω ——振荡的角频率, $\omega = 2\pi/T$ 其中 T 为振荡周期。

并且

$$R(s) = \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2}$$

正弦信号除了理论研究被采用以外,在系统和元件作动态性能试验时也被广泛地采用。其原因是由于正弦信号容易实现,而且正弦输入的工况也是一种恶劣的工况。如果试验用的正弦信号的最大速度、最大加速度接近于系统实际工况,并且系统能令人满意地工作,系统在实际输入信号作用下也会满足系统性能指标。

从上面列举的典型信号可以看出,它们都具有形式比较简单的特点。应用这些信号作为典型输入,可以方便地对控制系统进行分析和实验研究。

这里特别需要指出的是:有些系统在实际工作时,输入信号是变化无常的随机信号,例如定位雷达天线控制系统,其输入信号中有运动目标的随机信号,还有随机噪音。这些随机信号不能用上述典型的信号代替实际输入信号,若它们具有统计特性时,则可应用概率统计理论加以研究。

2. 对控制系统的基本要求

生产过程对控制系统的性能都有一定的具体要求,由于控制对象不同,工作方式不同,完成的任务不同,故对系统的性能指标的要求也不尽相同。自动控制理论是研究各类控制共同规律的一门技术 对自动控制系统的基本要求,一般可归纳为 稳定性、准确性(稳态精度)和动态性能指标 简单地讲就是稳、好、准三个字。

(1) 稳

要使系统能正常工作系统首先必须是稳定的。一个控制系统,要想令人满意地工作,光有正确的原理图不行 还必须合理选择系统中各元件的参数。否则 由于系统存在惯性 即控制器的惯性不能及时使偏差信号转化为控制作用,对象的惯性不能及时纠正被控量的偏差,因此将会使系统引起振荡。振荡若是减幅的 系统最后能达到稳态值 这时的振荡是衰减振荡 称此系统是稳定的 见图 1-15。若振荡是增幅的 即是发散的,则此系统是不稳定的。

总之,稳定乃是控制系统正常工作的前提条件。

(2) 好

好即动态性能指标要符合要求。性能指标又称品质指标,它是衡量系统性能好坏的依据。性能指标的种类,随着研究方法的不同,通常可分为时域性能指标、频域性能指标和最优控制中的

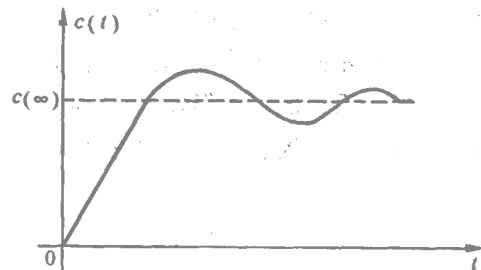


图 1-15 稳定系统的响应

性能指标泛函等等。在单输入—单输出控制系统中，最直观而又常用的是时域性能指标。

动态响应（即瞬态响应）又称为过渡过程。自动控制系统的动态响应是指被控量 $c(t)$ 在系统给定量或扰动量作用下，由原来的平衡状态（即稳态）变化到新的平衡状态的过程。例如，在电动机转速自动控制系统中，设电动机以恒定转速 n_1 转动，此时系统处于平衡状态。假若要求电动机以不同于 n_1 的新转速运转，可通过改变电动机的控制电压来实现，此时系统将在偏差信号作用下从原来平衡状态 n_1 逐渐过渡到新的平衡状态 n_2 。这个从 n_1 到 n_2 的变化过程就是转速控制的过渡过程。

在系统能稳定工作的条件下，系统的动态性能通常以对单位阶跃输入信号的响应——单位阶跃响应的特征量来衡量，如图 1-16 所示。

若取初始条件为零，即系统最初是平衡的、静止的。这时，衡量系统瞬态响应的性能指标通常有：

① 超调量 σ_p 响应曲线偏离稳态值的最大值即为超调量 σ_p 。它常以百分比表示，此时超调量的百分比值为

$$\sigma_p \% = \frac{c_{\max} - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

② 上升时间 t_r 对衰减振荡系统而言， t_r 是 $c(t)$ 从零上升至第一次到达稳定值所需的时间。

峰值时间 t_p 响应曲线到达第一个峰值所需的时间，定义为峰值时间 t_p 。

调节时间 t_s 调节时间又称过渡过程时间。 t_s 定义为满足下式的最短时间，即

$$|c(t) - c(\infty)| \leq \Delta c(\infty) \quad t \geq t_s$$

式中 Δ ——给定的某一允许值，一般常为 $0.02 \sim 0.05$ 。 $2\Delta c(\infty)$ 称为系统给定的误差带。上式表示响应曲线衰减到与稳态值之差不超过稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 时所需要的时间，即为调节时间。

振荡次数 N 在调节时间内，被调量振荡次数，一般以完整的一个振荡波形为振荡一次。

(3) 准

准即表示系统具有一定的稳态精度。系统的稳态精度即为系统的准确性。稳态精度是指在调节过程结束即系统进入稳态以后，系统被控量的期望输出与实际输出之差，称为稳态误差，它是衡量系统控制准确度的一项指标。不同的控制系统对稳态精度的要求不同，就是同一控制系统由于受到不同干扰信号，其稳态误差也会不同。

虽然控制系统的种类很多，但从对系统的基本要求——稳定性、动态品质和稳态精度出发，便不难建立关于自动控制的普遍理论，所以这些基本要求是控制理论研究的核心内容。

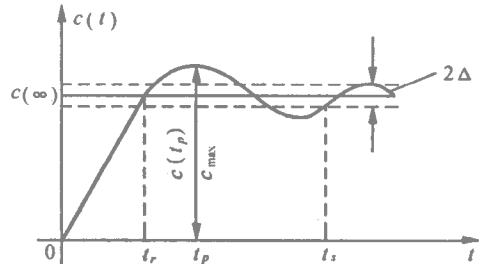


图 1-16 表示性能指标的单位阶跃响应曲线

§ 1.4 控制系统的分类

自动控制系统的种类繁多，应用的范围也很广。从不同角度出发有不同分类法，但按自动

控制系统共性来分类, 一般有以下几种分类方法。

一、按控制系统给定量的运动规律来分 可分为恒值控制系统、程序控制系统和随动系统

1. 恒值控制系统 (又称自动镇定系统或自动调整系统)

这种系统的特点是给定量是一个常量, 而控制系统的任务是尽量消除干扰的影响, 以一定的准确度使被控量保持在希望的数值上。一般像温度、压力、流量、湿度、速度等一类参数的控制多用恒值控制系统。

2. 程序控制系统

当给定量是时间的已知函数时, 此系统称为程序控制系统。例如, 机械加工中的程序控制和近年来发展起来的数字程序控制机床以及化学、食品工业的过程控制中, 广泛应用着程序控制系统。

3. 随动系统

系统给定量随时间变化, 且是时间的未知函数, 也就是给定量的变化规律是事先不确定的, 而控制系统的任务是在各种情况下保证输出量以一定的精度跟随给定量的变化。所以随动系统又称为自动跟踪系统。如图 1-4 所示的转速自动控制系统实际上就是一个位置随动系统的实例。另外, 如雷达自动跟踪系统、火炮自动瞄准系统, 各种电信号记录仪等等也都属于随动系统的范围。

二、按系统中是否含有非线性元件来分类, 可分为线性系统和非线性系统

1. 线性系统

当系统中各元件的输入、输出特性都是线性的 (系统的动态特性可以用线性微分 或差分) 方程来描述 称这种系统为线性控制系统。简单地讲 由线性元件组成的系统称为线性系统。线性系统的特点是可以运用叠加原理, 这就是说, 当系统有几个输入时, 系统的输出等于单个输入时系统输出之和; 当系统输入增大或缩小多少倍时, 系统输出也增大或缩小多少倍。

若线性微分 (或差分) 方程的系数是时间的函数, 这种方程称为线性变系数方程, 由线性变系数方程描述的系统, 称为线性时变系统。

2. 非线性系统

只要系统中有一个具有非线性特性的元件, 系统就由非线性方程来描述, 则此系统称为非线性系统。叠加原理对这种系统不适用。

严格意义上的线性系统是不存在的, 一般实际的物理系统总是不同程度地具有非线性。但当系统的信号或变量变化范围不大 或者非线性不严重时 为了研究方便 就理想化为线性系统。

三、按系统的输入、输出是否是时间 t 的连续函数, 可分为连续系统和离散系统

1. 连续系统

当系统各元件的输入信号是时间 t 的连续函数, 各元件相应的输出信号也是时间的连续函数时 这种系统称为连续系统。连续系统的状态和性能一般是用微分方程来描述 如图 1-4 所示的转速自动控制系统即为连续系统。

2. 离散系统

离散控制系统又称为采样控制系统。只要系统中有些信号是脉冲序列或数码时, 则此系统

称为离散控制系统，简称离散系统。离散系统的特性可用差分方程来描述。例如计算机控制系统就是离散控制系统的实例。

四、按被控量的稳态值是否存在误差，可分为有差系统和无差系统

1. 有差系统

有差系统即为有稳态误差的系统。这种系统，控制器不能使被控量准确地达到给定值。图 1-17 所示为一个控制液面高度的有差系统。这里容器、液体是控制对象，浮球及相关的传动杠杆、阀门组成了控制器。容器的输入流量是输入量，输出流量是扰动量。

当输出流量增加时，液面就要下降，浮球下落，因此带动阀门增加它的开启度。于是流入容器的液量也就增加，液面开始回升。直到输入流量等于输出流量，才达到稳定状态。如输出的流量越大，阀门的开启度也越大，因而稳态时液面越低，造成液位高度的误差。

2. 无差系统

无差系统即无稳态误差的系统。图 1-18 表示的是控制液面高度的无差系统。

当输出流量增加（或减少）时，浮球下落（或上升），系统即出现偏差，于是接通上（或下）触点。这时电机开始向开大（或关小）阀门的方向旋转，以增加（或减少）输入流量。直到被控量达到给定量，偏差为零时，电机停转，系统便工作在稳定状态。不难看出，只要有偏差存在，电动机便不断旋转，调节动作就不会终止，直到液面高度和给定量相等为止。

五、其它分类方法

根据系统的输入和输出信号的数量来分，则有单输入单输出系统和多输入—多输出系统。按控制系统主要组成元件的物理性质来分，又可分为电气控制系统、液压控制系统、机械控制系统等等。以及按设计方法来区分的最优控制系统、自适应控制系统等等。

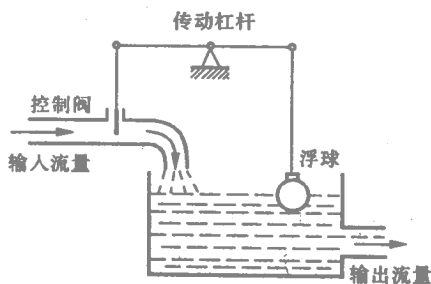


图 1-17 有差系统

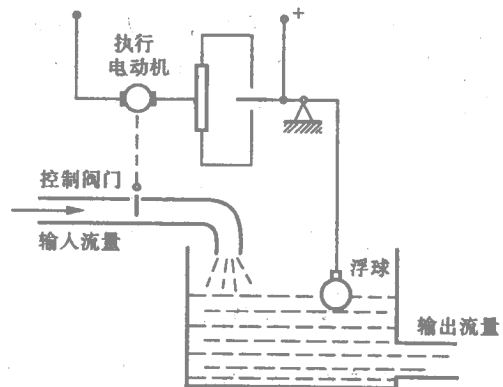


图 1-18 无差系统

习 题

1-1 在日常生活中常见到许多开环控制系统和闭环控制系统，举几个例子，说明其工作原理。

1-2 试比较开环控制与闭环控制的优缺点。

1-3 反馈控制系统由哪些元件组成？试用方框图说明其工作原理及各元件在系统中所起的作用。

1-4 仓库大门自动控制系统原理如图 T1-4 所示。试说明自动控制大门开关的工作原理 并画出系统方框图。

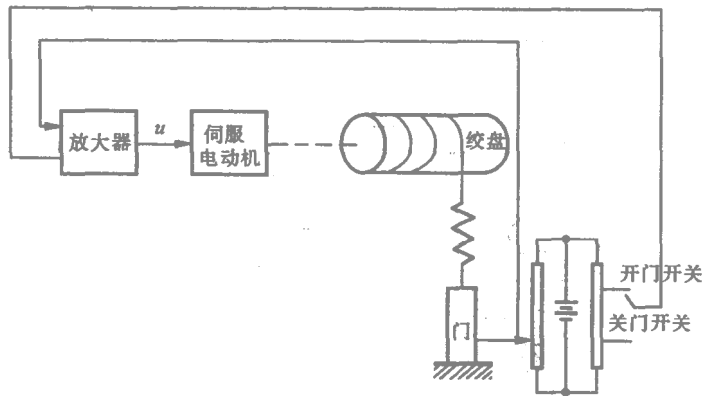


图 T1-4 习题 1-4 原理示意图

1-5 设有一位置随动系统如图 T1-5 所示。试分析系统的功能及工作原理 指出系统的控制装置及被控对象，画出系统的方框图。

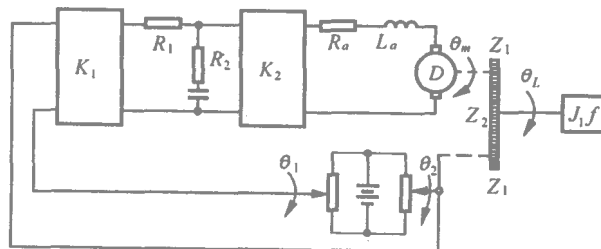


图 T1-5 习题 1-5 原理图

1-6 自动调压系统如图 T1-6 所示。假设空载时 (a) 与 (b) 的发电机端电压相同 均为

第二章控制系统的数学模型

在定性地介绍了控制系统的工作原理及基本概念之后，本章研究控制系统数学模型的建立问题。

自动控制系统的种类很多，它可以是物理的，也可以是非物理的，如生物的、社会经济的等，本书只涉及物理系统的研究。对控制系统的研究，就是要实现以一定的元部件组成的系统去完成某种特定任务。在控制系统的分析和设计过程中，首先要建立系统的数学模型。控制系统的组成可以是多种多样的，它可以是电气的、机械的、液压的或气动的等等，但描述这些系统的数学模型却可以是相同的。因此通过数学模型来研究自动控制系统可以摆脱各种不同类型系统的外部特征，研究它们内在的共性的运动规律。

控制系统的数学模型就是描述系统内部各变量之间关系的数学表达式。数学模型也可以采用不同的数学描述方法。在古典控制理论中着重研究单输入—单输出系统的输入量与输出量之间的对应关系，一般用输入输出描述。本书主要介绍这一类系统的建模问题，它有三种表现形式。其一是以微分方程的形式列写的又称运动方程式，另一种则是以拉氏变换为基础的传递函数以及用付氏变换为基础的频率响应。在现代控制理论中，往往不但研究输入与输出间的关系，而且还研究系统内部各个状态变量间的关系，因此采用状态空间法描述，这部分内容将在本书第九章中介绍。

数学模型的建立主要有两种方法，即解析法和实验法两大类。用解析法确定控制系统的数学模型时，要根据系统及元件各变量间所遵循的物理、化学定律，列写各变量之间的数学关系式，最后得到有关输入与输出间关系的方程式；用实验法确定控制系统的数学模型时，要求对系统施加典型测试信号（脉冲、阶跃或是正弦信号），获得系统的时间响应曲线或频率响应曲线，从而求得系统的数学模型（传递函数或频率特性）。本章只介绍解析法建模。

对于一个复杂的物理系统，建立一个合理的、恰当的数学模型是十分重要的，因为它直接关系到控制系统能否完成给定的任务。所谓合理的、恰当的模型是指既能准确地描述系统而形式又比较简单。为了便于研究，往往在选择模型时提出一些理想化的假设。对于精度的要求愈高，假设的局限性愈大，模型也愈复杂。一般在数学模型的建立过程中，应根据系统的实际结构参数和计算精度的要求，略去一些次要因素，使模型既能准确反映系统的动态品质，又简化了分析计算工作。本章只限于讨论线性定常系统的数学模型。

§ 2.1 控制系统的运动方程式

控制系统的运动方程式是以微分方程的形式描述控制系统输入量与输出量之间关系的数学模型。绝大多数的控制系统可以在一定的假定限制条件下用线性微分方程描述。线性系统的研究具有重要的实用价值。线性系统分析的主要特点是可以运用叠加原理，从而方便地求解