

绪 论

随着科学技术的飞速发展,自动控制系统在工业和国防的科研、生产中起着越来越重要的作用,计算机的广泛应用给自动控制系统的发展提供了更广阔的前景。自动控制理论是研究自动控制系统共同规律的技术科学。自动控制技术的广泛应用,不仅将人们从繁重的体力劳动和大量重复性的操作中解放出来,而且也将极大地提高了劳动生产率和产品质量。本章将从自动控制理论的基本概念出发,介绍自动控制系统的基本结构、工作原理、控制方式及分类。在对自动控制系统进行深入分析之前,首先要明确自动控制理论研究的内容和对控制系统的基本要求。

1.1 自动控制的基本概念

下面通过一个实际生产过程的自动控制系统来给出控制和自动控制的定义。

图 1-1 所示的是恒温水箱液位控制系统。在生产过程中,常常需要维持被加热箱体的水位高度,以满足工业生产的需要。

1. 工艺过程

用户通过用户阀门 R_2 不定时、不定量地从加热的水箱中取走热水 Q_2 以满足工业生产的需要,即 $R_2 \rightarrow Q_2 \rightarrow H_{\text{实}}$ 。

2. 控制要求

图 1-1 中被加热箱体的水位:水位过高 $\rightarrow$ 溢出 $\rightarrow$ 不经济;水位过低 $\rightarrow$ 干箱 $\rightarrow$ 不安全。

因此,人需要控制进水阀门 R_1 来改变流入量 Q_1 ,即通过不断调节进入箱体内的流量,使得水箱中的实际水位 $H_{\text{实}}$ 等于规定的水位 H_0 。

在人工控制过程中,人要连续不断地观测箱体内的水位,并与要求水位比较,反映到大脑中,然后大脑根据水位差的大小和方向,产生控制指令,加大或减小进水阀门的开度,以减少差异,人通过连续不断的操作,使箱体水位维持在要求值附近。

通过研究上述人工控制恒温水箱水位的过程可以看到,所谓控制就是使某个对象中物理量按照一定的目标来动作。本例中,对象指箱体,其中的物理量指箱体水位,一定的目标就是事

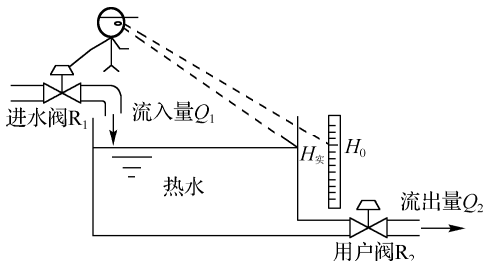


图 1-1 水箱液位人工控制系统

先要求水位的高度期望值 H_0 。

若液位控制要求精度较高,那么由人来控制就很难满足要求,这时就需要用控制设备代替人,形成液位自动控制系统。

采用杠杆机构作为控制设备来代替人进行操作的杠杆水箱液位自动控制系统,如图 1-2 所示。图 1-2 中用杠杆机构一端连接的浮子代替人的眼睛来测量液位的高低。用杠杆机构代替人的大脑来计算水箱中实际液位 $H_{\text{实}}$ 与规定液位 H_0 的偏差(调节杠杆中间支撑点的位置,可改变水箱液位期望值 H_0 的大小)。用杠杆机构另一端连接的阀门挡板代替人的手来调节阀门开度。当用户用水量增大时,水箱液位开始下降,浮子也随之降低,通过杠杆的作用,使阀门挡板上提,进水阀门开度增大,进水流量增大,使液位回升至期望值附近。反之,若用水量减小,水箱液位及浮子上升,则进水阀门开度减小,进水流量减小,使液位下降至期望值附近。其结果是无论用户用水量多还是少,实际液位的高度总是在期望值附近变化。

显然,图 1-2 是一种简单的自动控制系统,如果对液位控制精度要求很高,这时就必须采用其他高精度的控制设备,图 1-3 所示的就是采用电控仪表作为控制设备的水箱液位自动控制系统。图 1-3 中用压力变送器代替人的眼睛来测量液位的高低。用控制器代替人的大脑来计算水箱中实际液位 $H_{\text{实}}$ 与规定液位 H_0 的偏差(控制器内部可设置水箱液位期望值 H_0 的大小)。用电动调节阀代替人的手来调节进水阀门开度大小。

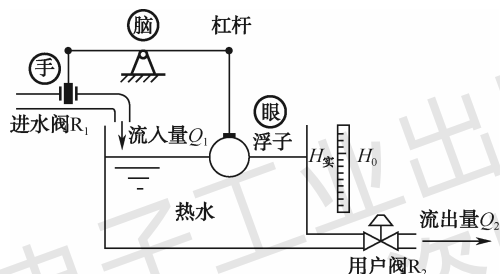


图 1-2 杠杆水箱液位自动控制系统

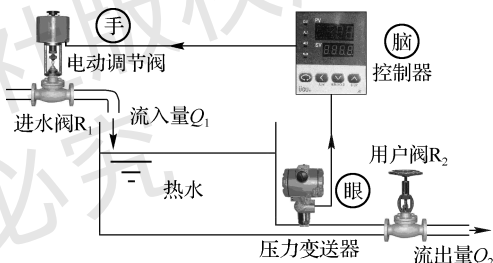


图 1-3 水箱液位自动控制系统

3. 控制设备

图 1-3 所示的水箱液位自动控制系统由压力变送器、控制器、电动调节阀和水箱等构成。压力变送器将水箱的实际液位测量出来,并将其信号变换及放大后传送给控制器。控制器将根据液位的给定信号与实际测量信号的偏差,产生相应的信号控制电动调节阀。电动调节阀根据控制器的要求调节进水阀门的开度 μ_1 ,以减少实际液位 $H_{\text{实}}$ 与要求的液位 H_0 差异,直到偏差为零。

1) 测量变送仪表

测量变送仪表又称为测量变送装置。常用测量液位的仪表为压力变送器,它将水箱液位位置的变化,转换及放大为仪表系统中的(电)信号。它的作用类似于人工控制中人的眼,将液位的变化输送到大脑或控制器中。

2) 控制器

控制器将液位变化的(电)信号(相应于实际液位的测量值 $H_{\text{测}}$)与控制器内部设定的(电)信号(相应于要求的液位 H_0)进行比较。它的作用类似于人工控制中人的脑。若 μ_1 为进水调节阀门的开度,则

当 $H_{\text{测}} > H_0$ 时, 要求 $\mu_1 \downarrow \rightarrow Q_1 \downarrow \rightarrow H_{\text{实}} \downarrow \rightarrow H_{\text{测}} \downarrow$;
 当 $H_{\text{测}} < H_0$ 时, 要求 $\mu_1 \uparrow \rightarrow Q_1 \uparrow \rightarrow H_{\text{实}} \uparrow \rightarrow H_{\text{测}} \uparrow$;
 当 $H_{\text{测}} = H_0$ 时, 要求 μ_1 不变。

3) 执行器

常用的执行器为电动调节阀或气动调节阀, 它包括执行机构和阀体两部分, 它根据控制器的命令, 改变进水调节阀门的开度 μ_1 。执行器的作用类似于人工控制中人的手, 去执行大脑或控制器的命令。

由此可见, 自动控制和人工控制的基本原理是相同的, 它们都是建立在“测量偏差, 修正偏差”的基础上, 并且为了测量偏差, 必须把系统的实际输出反馈到输入端。自动控制和人工控制的区别在于自动控制用控制设备代替人完成控制。

总之, 自动控制就是在没有人直接参与的情况下, 利用控制设备使被控对象中某一物理量或数个物理量准确地按照预定的要求规律变化。所谓自动控制系统就是由被控对象和控制设备按一定方式连接起来, 完成某种自动控制任务的有机整体。

为了方便技术人员讨论问题, 一般将控制系统表示成方框图的形式。方框图是由若干方框、有向信号线、信号的相加点与分支点所组成的框图。它是实际工艺设备图中控制系统信号传递的一种抽象简明的表示, 它可用在自动控制系统的分析中, 去表明每个重要设备在系统中的功能和各个重要设备之间的相互关系。例如, 可把图 1-3 所示的水箱液位自动控制系统表示成如图 1-4 所示的方框图。

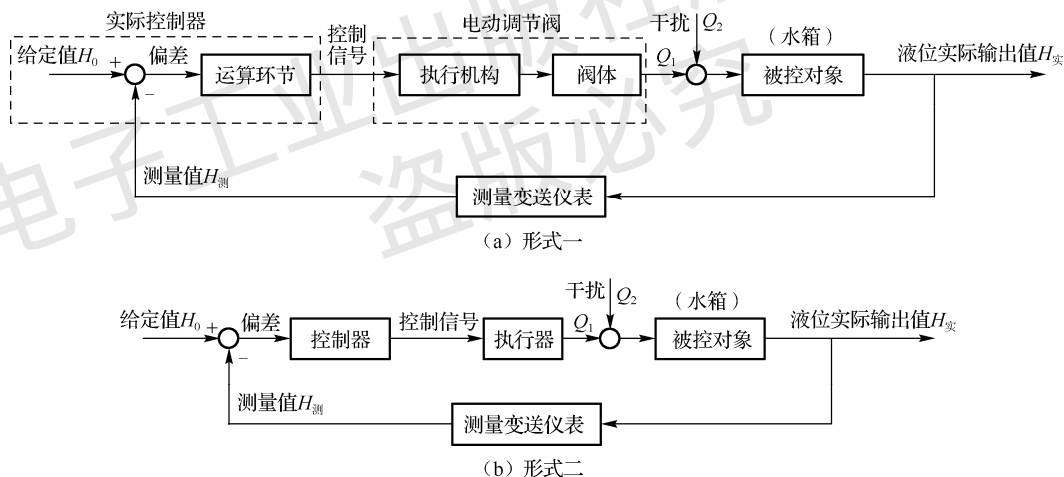


图 1-4 水箱液位自动控制系统的方框图

控制系统中的实际控制器是由信号比较机构和运算环节两部分组成的, 如图 1-4(a) 所示。但在控制系统的方框图表示中, 为了突出其比较机构, 通常将其简单表示成图 1-4(b) 所示的形式。

1.2 自动控制系统的组成

为了实现各种复杂的控制任务, 首先要将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来,

组成一个有机总体,即自动控制系统。虽然自动控制系统根据被控对象和具体用途的不同,可以有各种各样的结构形式。但是,就其工作原理来说,一个典型自动控制系统的基本组成可用如图 1-5 所示的方框图来表示。

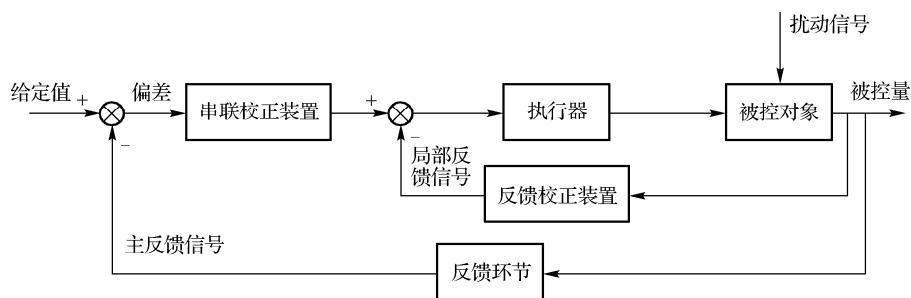


图 1-5 典型自动控制系统方框图

(1) 被控量:是指控制系统中被控制的物理量,也称为输出量,一般用 $y(t)$ 或 $c(t)$ 表示,如以上水位的实际值 $H_{\text{实}}$ 。

(2) 给定值:在控制系统中被控量 $y(t)$ 所希望的值,也称为参考输入,一般用 $r(t)$ 表示,如以上水位的设定值 H_0 。

(3) 扰动信号:使被控量偏移给定值的所有因素,它是系统要排除影响的量,一般用 $n(t)$ 或 $d(t)$ 表示。它包括内扰和外扰。内扰为调节阀不动作时,调节阀所在通道中物料的各种因素变化引起的干扰,如以上进水管道的压力波动引起进水量 Q_1 的变化;外扰为除内扰以外的一切干扰,如以上用户用水量 Q_2 的变化。

(4) 反馈信号:将系统(或环节)的输出信号经变换、处理送到系统(或环节)的输入端的信号,称为反馈信号。若此信号是从系统输出端取出送入系统输入端,这种反馈信号称主反馈信号,一般用 $y_m(t)$ 表示。而其他反馈信号称为局部反馈信号。

(5) 偏差:给定值 $r(t)$ 与主反馈信号 $y_m(t)$ 之差,一般用 $e(t)$ 表示,即 $e(t) = r(t) - y_m(t)$ 。

(6) 输入信号:泛指对系统的输出量有直接影响的外界输入信号,既包括参考输入 $r(t)$,又包括扰动信号 $n(t)$ 。

(7) 被控对象:它是控制系统所控制和操作的对象,如以上的恒温水箱。

(8) 校正装置:对系统的参数和结构进行调整,用于改善系统控制性能的仪表或装置,也称为控制器或调节器,如以上的水位控制器。

(9) 执行器:接收校正装置的输出信号,并将其转换为对被控对象进行操作的装置或设备,如以上的电动调节阀。

(10) 反馈环节:它用来测量被控量 $y(t)$ 的实际值,并经过信号处理,转换为与被控量有一定函数关系,且与输入信号同一物理量的信号。反馈环节一般也称为测量变送环节。

1.3 自动控制系统的基本控制方式

闭环控制是自动控制系统最基本的控制方式,也是应用最广泛的一种控制方式。除此之外,还有开环控制方式和复合控制方式,它们都有其各自的特点和不同的适用场合。

1. 开环控制系统

开环控制系统是指无被控量反馈的控制系统，即需要控制的是被控对象的某一量（被控量），而被控量对于控制作用没有任何影响的系统。信号由给定值至被控量单向传递。这种控制较简单，但有较大的缺陷，即对象或控制装置受到干扰或工作中特性参数发生变化时，会直接影响被控量，而无法自动补偿。因此，系统的控制精度难以保证。从另一种意义上理解，也意味着对被控对象和其他控制元件的技术要求较高，如数控线切割机进给系统、包装机等多为开环控制。开环控制系统原理方框图如图 1-6 所示。信号流动由输入端到输出端单向流动。

2. 闭环控制系统

若控制系统中信号除从输入端到输出端外，还有输出端到输入端的反馈信号，则构成闭环控制系统，也称反馈控制系统，方框图如图 1-7 所示。闭环控制的定义是有被控制量反馈的控制。从系统中信号流向看，系统的输出信号沿反馈通道又回到系统的输入端，构成闭合通道，故称闭环控制系统或反馈控制系统。这种控制方式，无论是由于干扰造成，还是由于结构参数的变化引起被控量出现偏差，系统就利用偏差去纠正偏差，故这种控制方式为按偏差调节。

闭环控制系统的突出优点是，利用偏差来纠正偏差，使系统达到较高的控制精度。但与开环控制系统比较，闭环系统的结构比较复杂，构造比较困难。需要指出的是，由于闭环控制存在反馈信号，利用偏差进行控制，如果设计得不好，将会使系统无法正常和稳定地工作。另外，控制系统的精度与系统的稳定性之间也常常存在矛盾。

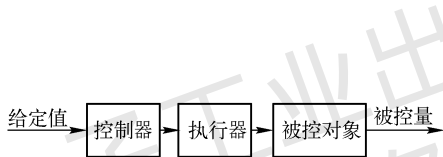


图 1-6 开环控制系统原理方框图

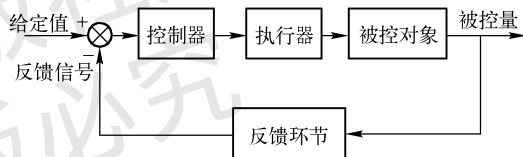


图 1-7 闭环控制系统方框图

3. 复合控制系统

开环控制和闭环控制方式各有优缺点，在实际工程中应根据工程要求及具体情况来决定采用何种控制方式。如果事先预知给定值的变化规律，又不存在外部和内部参数的变化，则采用开环控制较好。如果对系统外部干扰无法预测，系统内部参数又经常变化，为保证控制精度，采用闭环控制则更为合适。如果对系统的性能要求比较高，为了解决闭环控制精度与稳定性之间的矛盾，可以采用开环控制与闭环控制相结合的复合控制系统或其他复杂控制系统。

1.4 自动控制系统的分类

自动控制系统根据控制方式及其结构性能和完成的任务，有多种分类方法。除以上按控制方式分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统外，还可以根据系统输入信号分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统；按系统性能又可以分为线性控制系统和非线性控制系统、连续控制系统和离散控制系统、定常控制系统和时变控制系统、确定性控制系统和不确定性控制系统等。下面简单介绍几种常见的分类方法。



1. 按系统输入信号形式划分

1) 恒值控制系统（自动调节系统）

这种系统的特征是输入量为一恒值，通常称为系统的给定值。控制系统的任务是尽量排除各种干扰因素的影响，使输出量维持在给定值（期望值）。如工业过程中恒温、恒压和恒速等控制系统。

2) 随动控制系统（跟踪控制系统）

该系统的输入量是一个事先无法确定的任意变化的量，要求系统的输出量能迅速平稳地复现或跟踪输入信号的变化。如雷达天线的自动跟踪系统和高炮自动瞄准系统就是典型的随动控制系统。

3) 程序控制系统

系统的输入量不是常值，而是事先确定的运动规律，编成程序装在输入装置中，即输入量是事先确定的程序信号，控制的目的是使被控对象的被控量按照要求的程序动作。如数控车床就属此类系统。

2. 按系统微分方程形式划分

1) 线性控制系统

组成系统元器件的特性均为线性的，可用一个或一组线性微分方程来描述系统输入和输出之间的关系。线性控制系统的主要特征是具有齐次性和叠加性。

2) 非线性控制系统

在系统中只要有一个元器件的特性不能用线性微分方程描述其输入和输出关系，则称为非线性控制系统。非线性控制系统还没有一种完整、成熟、统一的分析法。通常对于非线性程度不很严重，或做近似分析时，均可用线性系统理论和方法来处理。非线性控制系统分析将在第7章专门讨论。

3. 按系统参数与时间有无关系划分

1) 定常控制系统

如果描述系统特性的微分方程中各项系数都是与时间无关的常数，则称为定常控制系统。该类系统只要输入信号的形式不变，在不同时间输入下的输出响应形式是相同的。

2) 时变控制系统

如果描述系统特性的微分方程中至少有一项系数是时间的函数，此系统称为时变控制系统。

4. 按系统传输信号形式划分

1) 连续控制系统

系统中所有元件的信号都是随时间连续变化的，信号的大小均是可任意取值的模拟量，称为连续控制系统。

2) 离散控制系统

离散控制系统是指系统中有一处或数处的信号是脉冲序列或数码。若系统中使用了采样开关，将连续信号转变为离散的脉冲形式的信号，此类系统也称为采样控制系统或脉冲控制系统。若采用数字计算机或数字控制器，其离散信号是以数码形式传递的，此类系统也称为数字控制系统。在这种控制系统中，一般被控对象的输入/输出是连续变化的信号，控制装置中的执行部



件也常常是模拟式的,但控制器是用数字计算机实现的,所以,系统中必须有信号变换装置,如模/数转换器(A/D转换器)和数/模转换器(D/A转换器)。离散控制系统将是今后控制系统的主要发展方向,它的分析和设计将在第8章专门讨论。

5. 按系统控制作用点个数划分

1) 单输入单输出控制系统

若系统的输入量和输出量各为一个,则称其为单输入单输出控制系统,简称为单变量控制系统。

2) 多输入多输出控制系统

若系统的输入量和输出量多于一个,称为多输入多输出控制系统,简称为多变量控制系统。对于线性多输入多输出控制系统,系统的任何一个输出等于每个输入单独作用下输出的叠加。

6. 按系统的稳态误差划分

自动控制系统按系统在给定值或扰动信号的作用下是否存在稳态误差,分为有差控制系统和无差控制系统。恒值控制系统的主要任务是,当存在扰动信号时,保证被控量维持在希望值上,也就是说,要在有扰动信号的情况下保持被控量不变。随动控制系统主要是确定系统对给定值有差还是无差。

1) 有差控制系统

在恒值控制系统中,如果某个系统经扰动信号作用经过一段时间后趋于某一恒定的稳态值,而被控量的实际值与期望值之差也逐渐趋于某一恒值,且这个值取决于扰动信号作用的大小,那么这个系统就称为对扰动有差的系统。在随动控制系统中,如果给定值经过一段时间之后趋于某一稳态值,系统的误差也趋于某一稳态值,则称此系统称为对给定值有差的系统。

2) 无差控制系统

在恒值控制系统中,如果一个系统的扰动信号作用经过一段时间而趋于某一恒定的稳态值,而被控量的实际值与期望值之差逐渐趋于零,且与扰动信号作用的大小无关,那么这个系统就称为对扰动无差的系统。在随动控制系统中,如果不论给定值的大小如何变化,系统的误差趋于零,则称这一系统称为对给定值无差的系统。

应该强调指出,同一系统可能对扰动输入信号是有差的,而对给定输入信号是无差的,或者相反。因此在研究一个控制系统是有差还是无差时,必须指出是对扰动信号而言,还是对给定值而言。

7. 按系统参数的空间分布特性划分

1) 集中参数控制系统

严格来讲,任何元器件的参数都具有分布性。例如,用电阻丝绕成的电阻器,它的电阻并不是集中于某一点,而是沿着电阻丝的全长分布的,无论多么小的一段,都含有电阻,这是绕线电阻器的电阻参数的分布性。应当指出,在一定条件下,这种分布性可以不予考虑,根据串联合并的概念,可将电阻器的电阻由一个集中的电阻表示。

如果组成系统的实际元器件允许用如电阻、电感和电容等参数中的一个或数个来集中表征时,则称为集中参数元器件或理想电路元器件。由集中参数元器件构成的控制系统称为集中参数控制系统。



2) 分布参数控制系统

但在某些情况下，对于本来是分布参数的元器件，如集中起来表示，则会使系统的计算极不准确，甚至发生严重错误。含有一个或多个分布参数元器件的控制系统称为分布参数控制系统。如均匀传输线就是一个十分重要的分布参数系统。

另外，自动控制系统还可以按系统的其他特征来分类，如按元器件类型可分为机械控制系统、电气控制系统、机电控制系统、液压控制系统、气动控制系统和生物控制系统等；按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统和位置控制系统等，这里将不再一一讨论，有兴趣的读者可参阅有关文献。一般为了全面反映自动控制系统的特性，常常将上述各种方法组合应用。本书将从线性连续控制系统、非线性连续控制系统和线性离散控制系统三方面来研究自动控制系统的分析和设计问题。

1.5 自动控制系统的的基本要求

尽管自动控制系统有不同的类型，对每个系统也都有不同的特殊要求，但对于各类系统来说，在已知系统的结构和参数时，我们感兴趣的都是系统在某种典型输入信号作用下，其被控变量变化的全过程，即动态过程和稳态。例如，对于恒值控制系统是研究扰动作用引起被控量变化的全过程；对随动控制系统是研究被控量如何克服扰动影响并跟随输入量的变化全过程。但是，对每一类系统被控量变化全过程提出的基本要求都是一样的，且可以归结为稳定性、快速性和准确性，即稳、快、准的要求。

1. 稳定性

稳定性是系统重新恢复平衡状态的能力。任何一个能够正常工作的控制系统，首先必须是稳定的，稳定是对自动控制系统的最低要求。

当系统受到扰动的作用或者输入量发生变化时，被控量会发生变化偏离给定值。由于控制系统中一般都含有储能元件或惯性元件，而这些元件的能量不可能突变，因此，被控量不可能马上恢复到期望值，或者达到一个新的平衡状态，而总是要经过一定的过渡过程。通常把这个过程称为动态过程，而把被控量达到的平衡状态称为稳态。对于一个稳定的系统，其被控量偏离期望值的偏差应随时间的增长逐渐减小并趋近零。具体来讲，对于稳定的恒值控制系统，被控量因扰动而偏离期望值后，经过一个过渡过程时间，被控量应恢复到原来的期望值状态；对于稳定的随动控制系统，被控量应能始终跟踪输入量的变化。反之，不稳定的控制系统，其被控量偏离期望值的初始偏差将随时间的增加而发散。因此，不稳定的系统无法正常工作，也无法完成控制任务，甚至会毁坏设备，造成重大损失。

考虑到实际系统工作环境或参数的变动，可能导致系统不稳定，因此，除要求系统稳定外，还要求其具有一定的稳定裕量。

2. 快速性

为了很好完成控制任务，控制系统仅仅满足稳定性的要求是不够的，还必须对其动态过程的形式和快慢提出要求。例如，对于稳定的高射炮射角随动系统，虽然炮身最终能跟踪目标，但如果目标变动迅速，而炮身跟踪目标所需过渡过程时间过长，就不可能击中目标；对于稳定的自动驾驶仪系统，当飞机受阵风扰动而偏离预定航线时，具有自动使飞机恢复预定航线的能



力,但在恢复过程中,如果机身摇晃幅度过大,或恢复速度过快,乘员就会感到不适。因此,对控制系统动态过程的最大振荡幅度和快速性一般都有具体要求。

快速性是对系统动态过程的要求。动态过程是指控制系统的被控量在输入信号作用下随时间变化的过程,衡量系统最大振荡幅度和快速性的品质好坏常采用单位阶跃信号作用下动态过程中的最大超调量、上升时间和过渡过程时间等性能指标。描述系统动态过程的动态性能也可以用平稳性和快速性加以衡量。平稳性是指系统由初始状态过渡到新的平衡状态时,具有较小的超调量和振荡性;快速性是指系统过渡到平衡状态所需要的过渡过程时间较短。

3. 准确性

准确性是对系统稳态的要求,它是用稳态误差来衡量的。对一个稳定的系统而言,当过渡过程结束后,系统输出量的实际值与期望值之差称为稳态误差,它是衡量系统稳态性能即控制精度的重要指标。稳态误差越小,表示系统的准确度越好,控制精度越高。

由于被控对象的具体情况不同,各种系统对稳、快、准的要求应有所侧重。例如,恒值控制系统一般对稳态性能限制比较严格,随动控制系统一般对动态性能要求较高。同一系统稳、快、准是相互制约的。过分提高响应动作的快速性,可能会导致系统的强烈振荡;而过分追求系统的平稳性,又可能使系统反应迟钝,控制过程拖长,最终导致控制精度也变差。如何分析与解决这些矛盾,是自动控制理论研究的重要内容。

自动控制理论研究的主要内容是阐述对自动控制系统进行分析和设计的基本理论。在自动控制理论中,对实际控制系统进行分析和设计时,首先要建立研究问题的数学模型,进而利用所建立的数学模型来讨论对自动控制系统进行分析和设计的基本理论和方法。在已知系统数学模型下,计算和研究自动控制系统的性能并寻找系统性能与系统结构、参数之间的关系,称为控制系统的分析。如果已知对工程系统性能指标的要求,寻找合理的控制方案,这类问题称为控制系统的设计或校正。

1.6 自动控制理论的产生和发展

自动控制理论由经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论组成,它是研究自动控制共同规律的技术科学,它的诞生与发展源于自动控制技术的应用。

1. 自动控制技术的发展

人类发明具有“自动”功能的装置的历史,可以追溯到公元前 14 到公元前 11 世纪,在中国、埃及和巴比伦出现的自动计时漏壶。我国汉朝科学家张衡发明了浑天仪和地动仪,把自动控制思想应用到了天文观测仪器和地震观测仪器。公元 235 年,我国发明了按开环控制的自动指示方向的指南车,它是确定方位仪器中利用自动控制思想的成功事例。公元 1086 年左右,我国苏颂等人发明了按闭环控制工作的具有“天衡”自动调节机构和报时机构的水运仪象台,它是将用于天文观测的浑天仪和用于天文演示的浑象仪及自动计时装置结为一体的仪器。古埃及和古希腊出现了半自动的简单机器,如教堂庙门自动开启装置、自动洒圣水的铜祭司、投币式圣水箱和在教堂门口自动鸣叫的青铜小鸟等自动装置,这些都是一些互不相关的原始的自动装置,是一些个别的发明。17 世纪以后,随着生产的发展和科学的进步,在欧洲出现了多种自动装置,其中包括,1642 年法国物理学家帕斯卡发明了能自动进位的加法器;1657 年荷兰机



械师惠更斯发明了钟表；1745 年英国机械师 E.李发明了带有风向控制的风磨，这种风磨可以利用尾翼的调向作用使主翼对准风向；1765 年俄国机械师波尔祖诺夫发明了浮子阀门式水位调节器，可以自动控制蒸汽锅炉的水位。这一时期，自动控制技术都是由于生产发展的需求而产生的。但比较自觉运用反馈原理设计出来并得到成功应用的是英国人瓦特（J.Watt）于 1788 年发明的离心式节速器（也叫做飞球调速器），瓦特用它来控制蒸汽机的蒸汽阀门，构成蒸汽机转速的闭环自动控制系统，从而实现了离心式节速器对蒸汽机转速的控制。瓦特的这项发明促进了近代自动调节装置的广泛应用，对由蒸汽机带来的第一次工业革命及以后的控制理论的发展都有重要的影响。在其他国家的各种发明还有 1854 年俄国机械学家和电工学家康斯坦丁诺夫发明的电磁调速器。1868 年法国工程师法尔科发明了反馈调节器，通过它来调节蒸汽阀，操纵蒸汽船的舵，这就是后来得到广泛应用的伺服机构。在 1868 年以前，自动化技术只是一些个别的发明和简单的应用，所以把它叫做第一阶段。在 1868 年之后，逐渐开始了对自动控制系统的理论分析和大规模的广泛应用，所以把它叫做第二阶段。

2. 自动控制理论的发展和形成

虽然各种简单自动控制装置的发明在 18 世纪以前经历了漫长的历史过程，但是它们对自动化技术的形成起到了先导作用；它们都是从实际经验中总结出来的，但是还没有理论分析和数学描述。17—18 世纪是自动化技术的逐渐形成时期，接下来是近代自动化技术的发展时期，数学描述和理论分析起到了至关重要的作用。人们最初遇到的是自动调节器的稳定性问题，由于瓦特发明的离心式调速器有时会造成系统的不稳定，使蒸汽机产生剧烈的振荡；到 19 世纪又发现了船舶上自动操舵机的稳定性问题。这些问题引起了人们的广泛关注，一些数学家尝试用微分方程来描述和分析系统的稳定性问题。对自动控制系统最初的数学描述是英国物理学家麦克斯韦（J.C.Maxwell），他在 1868 年发表了题为“论调速器”的论文，该文章总结了无静差调速器的理论。1876 年在法国科学院院报上，俄国机械学家 H.A.维什涅格拉茨基发表了题为“论调节器的一般理论”的论文，进一步总结了调节器的理论。维什涅格拉茨基用摄动理论使调节问题大为简化。他用线性微分方程描述了整个系统，包括控制器也包括被控对象，把稳定性问题简化成对齐次微分方程的通解的研究，使控制系统的动态特性仅取决于两个参量。由此推得系统的稳定条件，把参量平面划分成稳定区域和不稳定区域，这种划分又称为维什涅格拉茨基图。1875 年英国数学家劳斯（E.J.Routh）提出了著名的劳斯稳定判据，它是一种代数稳定判据，可以根据微分方程的系数来判定控制系统的稳定性。1895 年德国数学家赫尔维茨（A.Hurwitz）提出著名的赫尔维茨稳定判据，它是另一种形式的代数稳定判据。劳斯-赫尔维茨稳定判据是能预先根据传递函数或微分方程判定调节器稳定性的重要判据。1892 年俄国数学家李雅普诺夫（A.M.Lyapunov）发表了题为《论运动稳定性的一般问题》的专著，以数学语言形式给运动稳定性的概念下了严格的定义，给出了判别系统稳定的两种方法。李雅普诺夫第一法又称为一次近似法，明确了用线性微分方程分析稳定性的确切适用范围。李雅普诺夫第二法又称为直接法，不仅可以用来研究无穷小偏移时的稳定性，即小范围内的稳定性，而且可以用来研究一定限度偏移下的稳定性，即大范围内的稳定性。李雅普诺夫稳定性理论至今仍是分析自动控制系统稳定性的重要方法。

进入 20 世纪以后，由于工业革命的需要，人们开始采用自动控制装置来解决工业生产中提出的控制问题。自动控制器的应用标志着自动化技术进入新的历史时期。在这一时期，这些



控制器都是一些跟踪给定值的装置,使一些物理量保持在给定值附近。工业生产中广泛应用各种自动控制装置,促进了对调节系统进行分析 and 综合的研究工作。到了 20 世纪 20 年代以后,美国开始采用比例、积分、微分调节器,简称 PID 调节器。PID 调节器是一种模拟式调节器,现在还有许多工厂采用这种调节器。在 20 世纪最初的 20 年里,在自动控制器中已广泛应用反馈控制的结构。从 20 世纪 20 年代开始,越来越多的人开始致力于从理论上研究反馈控制系统。1922 年 N.米诺尔斯基发表了“关于船舶自动操舵的稳定性”论文。1925 年英国电气工程师 O.亥维赛把拉普拉斯变换应用到求解电网络的问题上,提出了运算微积分,求得瞬态过程。之后,拉普拉斯变换就被应用到分析自动调节系统,并取得了显著成效。把拉普拉斯变换引入到描述线性定常系统或线性元件的输入/输出关系,人们建立了传递函数,为分析自动控制系统提供了重要工具。在传递函数基础上,发展起来的是频率响应法即频率特性法,这种方法已成为经典控制理论中分析和综合自动控制系统的重要方法。再接下来发展的是反馈控制,1927 年美国贝尔电话实验室在解决电子管放大器失真问题时,电气工程师 H.S.布莱克从电信号的角度引入了反馈的概念。1932 年美国电信工程师奈奎斯特(H.Nyquist)提出了著名的奈奎斯特稳定判据,可以直接根据系统的开环传递函数画出奈奎斯特图,所以可以判定反馈系统的稳定性,从而被认为是控制学科发展的开端。他还研究了 PID 控制器并提出了确定 PID 参数的方法。1934 年,苏联科学家 H.H.沃兹涅先斯基发表了“自动调节理论”。1934 年美国科学家 H.L.黑发表了“关于伺服机构理论”。1938 年,苏联电气工程师 A.B.米哈伊洛夫应用频率法研究自动控制系统的稳定性,提出著名的米哈伊洛夫稳定判据。通过理论的发展和积累,经典控制理论逐渐形成,这些论文的发表标志着经典控制理论的诞生。经典控制理论主要是研究单变量单回路控制系统,它包括了对单变量单回路控制系统的一系列分析方法。1939 年美国麻省理工学院建立了伺服机构实验室,同年苏联科学院成立了自动学和运动学研究所。这是世界上第一批系统与控制的专业研究机构,它们为 20 世纪 40 年代形成经典控制理论和发展局部自动化积累了理论和人才,也做了理论上和组织上的准备。

随着自动控制理论的发展,程序控制、逻辑控制和自动机的思想得到了发展。1833 年英国数学家 C.巴贝奇在设计分析机时首先提出程序控制的概念,他尝试用法国发明家 J.M.雅卡尔设计的编织地毯花样用的穿孔卡方法实现分析机的程序控制。1936 年英国数学家图灵研制了著名的图灵机,成为现代数字电子计算机的雏形。他用图灵机定义可计算函数类,并建立了算法理论和自动机理论。1938 年美国电气工程师香农和日本数学家中岛,以及 1941 年苏联科学家 B.H.舍斯塔科夫,分别独立地建立了逻辑自动机理论,用仅有两种工作状态的继电器组成了逻辑自动机,实现了逻辑控制。

自动化技术的发展历史是一部人类以自己的聪明才智延伸和扩展器官功能的历史。自动化是现代科学技术和现代工业的结晶,它的发展充分体现了科学技术的综合应用。自动化技术是随着社会的需要而发展起来的,尤其是随着生产设备和军事设备的控制,以及航空航天工业的需要而发展起来的。在第二次世界大战期间,德国的空军优势和英国的防御地位,迫使美国、英国和西欧各国科学家集中精力设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达定位系统、雷达跟踪系统,以及其他基于反馈原理的军用装备。在解决这些问题的过程中,进一步促进并完善了自动控制理论的发展。第二次世界大战后,已形成完整的自动控制理论体系,这就是以传递函数为基础的经典控制理论,它主要研究单输入单输出、线性定常系统的分析和设计问题。



经典控制理论是在 20 世纪 40—50 年代完善的。在这一时期，伯德（H.W.Bode）于 1945 年出版了《网络分析和反馈放大器设计》一书，提出了基于频率响应的分析与综合反馈控制系统的理论和方法，即伯德图法。美国电信工程师埃文斯（W.R.Evans）于 1948 年提出了根轨迹法，以为复变量理论为基础的控制系统的分析和设计理论及方法开辟了新的途径。经典控制理论这一新的学科当时在美国称为伺服机构理论，在苏联称为自动调节理论，主要是解决单变量的控制问题。经典控制理论这个名称是 1960 年在第一届全美联合自动控制会议上提出的。在此次会议上，把系统与控制领域中研究单变量控制问题的学科称为经典控制理论，把研究多变量控制问题的学科称为现代控制理论。从某种角度来说，经典控制理论是现代控制理论的特例，现代控制理论则是经典控制理论的扩充。当时在分析和设计反馈伺服系统时广泛采用了传递函数和频率响应的概念。最常用的方法是奈奎斯特法（1932 年）、伯德法（1945 年）和根轨迹法（1948 年）。在 20 世纪 30—40 年代为适应单变量调节和随动系统的设计而发展起来的频率法奠定了经典控制理论的基础，后来频率法成为分析和设计线性自动控制系统的主要方法。这种方法不仅能定性地判明设计方向，而且它本身也具有近似计算的性质。因此，对于在很大程度上仍然需要依靠经验和尝试的控制系统的工程设计问题来说，频率法是特别有效和特别受欢迎的。从 20 世纪 40 年代末开始在美国和西欧的一些大学给工科专业的大学生和研究生开设伺服机构理论的课程，在苏联的工科大学里则开设自动调节理论的课程。到了 20 世纪 50 年代在世界上一些主要工科大学的电气工程系里都设有自动化方面的专业，专门培养系统与控制方面的人才。1945 年美国数学家维纳，把反馈的概念推广到一切控制系统。1948 年维纳出版《控制论》一书，为控制理论奠定了基础。同年，美国电信工程师香农发表了《通信的数学理论》，为信息论奠定了基础。维纳和香农从控制和信息这两个侧面研究系统的运动，维纳还从信息的观点研究反馈控制的本质，从此人们对反馈和信息有了较为深刻的理解。

自动控制理论和社会生产及科学技术的发展密切相关，在近代得到极为迅速的发展。它不仅已经成功地运用并渗透到工农业生产、科学技术、军事、生物医学、社会经济及人类生活等诸多领域，而且在此过程中自动控制理论也发展成为一门内涵极为丰富的新兴学科。进入 21 世纪，随着经济和科学技术的迅猛发展，自动控制理论与许多学科相互交叉、渗透融合的趋势在进一步加强，自动控制理论的应用范围在不断扩大，自动控制理论在认识事物运动的客观规律和改造世界中将得到进一步的发展和完善。

3. 自动控制理论的研究内容

自动控制理论学科的发展经历了经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三个时期，各时期的研究内容如下。

1) “经典控制理论”时期

经典控制理论形成于 20 世纪 20—50 年代，它以拉普拉斯变换或 z 变换为数学工具，以传递函数或 z 传递函数为基础，主要研究单输入、单输出自动控制系统的分析与设计问题。基本内容包括时域分析法、根轨迹分析法（复域分析法）、频域分析法、相平面分析法和描述函数分析法等。经典控制理论虽然能够较好地解决单输入单输出反馈控制系统的问题，但它具有明显的局限性，突出的是难以有效地应用于时变系统和多变量系统，也难以揭示系统更为深刻的特性。

2) “现代控制理论”时期

现代控制理论形成于 20 世纪 50—70 年代。这个时期由于计算机技术、航空航天技术的迅



速发展,控制理论有了重大的突破和创新。它所研究的对象不再局限于单变量的、线性的、定常的、连续的系统,而扩展为多变量的、非线性的、时变的、离散的系统。现代控制理论以线性代数和微分方程为主要数学工具,以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、时变、非线性等自动控制系统的分析和设计问题。基本内容包括线性系统基本理论、系统辨识、最优控制理论、自适应控制理论和最佳滤波理论等。所谓状态空间法,本质上是一种时域分析方法,它不仅描述了系统的外部特性,而且揭示了系统的内部状态和性能。现代控制理论分析和综合系统的目标是在揭示其内在规律的基础上,实现系统在某种意义上的最优化,同时使控制系统的结构不再限于单纯的闭环形式。

3) “智能控制理论”时期

智能控制理论的发展始于20世纪60年代,它是一种能更好地模仿人类智能,能适应不断变化的环境,能处理多种信息以减少不确定性,能以安全可靠的方式进行规划、产生和执行控制作用,获得系统全局最优的性能指标的非传统的控制方法。智能控制理论是自动控制理论发展的高级阶段。它突破了传统控制中对象有明确的数学描述和控制目标是可以数量化的限制。它的基本内容包括专家控制理论、模糊控制理论、神经网络控制理论和进化控制理论等。

自动控制理论经过经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三个阶段的发展,产生了PID控制、自适应控制、最优控制、预测控制、模糊控制、神经网络控制、多变量控制、智能控制等适用于不同对象环境的控制算法,而控制系统的结构也从单一对象闭环控制系统,逐步发展到单一对象多环控制系统、多变量控制系统、分级控制系统、集散控制系统及综合自动化系统和复杂控制系统。

小 结

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中某一物理量或数个物理量准确地按照预定的要求规律变化。

闭环控制是自动控制系统最基本的控制方式,一般由被控对象、控制器、执行器和反馈环节(测量变送装置)等构成。

自动控制系统根据控制方式及其结构性能和完成的任务,有多种分类方法。本书将从线性连续控制系统、非线性连续控制系统和线性离散控制系统三方面来研究自动控制系统的分析和设计问题。

自动控制系统的基本要求是在系统稳定的前提下,稳态精度要高,动态响应要快,这些要求可以归结为稳、快、准三个字。

自动控制理论研究的主要内容是阐述对自动控制系统进行分析和设计的基本理论和基本方法。在已知系统数学模型下,计算和研究自动控制系统的性能,称为系统的分析。如果已知对工程系统性能指标的要求,寻找合理的控制方案,这类问题称为系统的设计或校正。

自动控制理论由经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论组成。其中经典控制理论以传递函数为基础,主要研究单输入单输出自动控制系统的分析与设计问题。

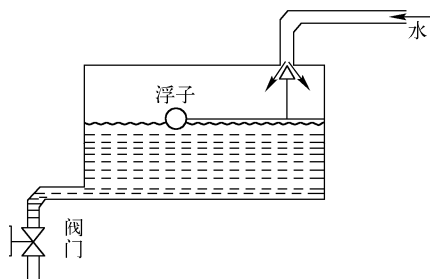
习 题

1-1 什么是自动控制？它对于人类活动有什么意义？

1-2 自动控制系统由哪几大部分组成？各部分都有哪些功能？

1-3 试叙述人在伸手时的运动与控制过程。

1-4 什么是开环控制？什么是闭环控制？试比较开环控制系统和闭环控制系统的区别及其优缺点。



题 1-8 图

1-5 试列举几个日常生活中的开环控制系统及闭环控制系统，并说明其工作原理。

1-6 家用电器中，洗衣机是开环控制还是闭环控制？一般的电冰箱是何种控制？

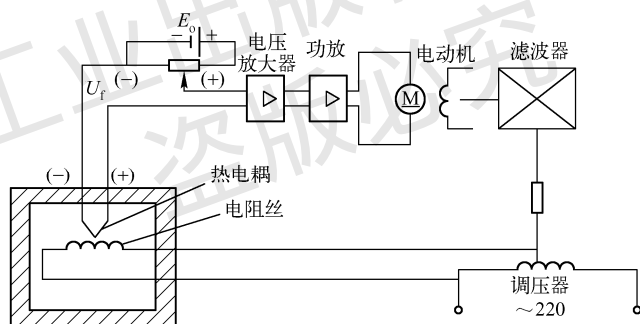
1-7 题 1-8 图表示一个水位自动控制系统，试说明其作用原理。

1-8 题 1-9 图是恒温箱的温度自动控制系统，要求：

(1) 画出控制系统的原理框图。

(2) 当恒温箱的温度发生变化时，试叙述控制系统的调节过程。

(3) 指出控制系统属于哪一类型？



题 1-9 图