

第一章 反馈控制系统的基本概念

§ 1-1 引言

自动控制作为一门工程科学已广泛地应用于工农业生产、交通运输以及国防建设中，从简单的家用电器到复杂的机器人，从船舶操纵到宇宙航行都离不开自动控制。特别是本世纪 80 年代以来，微计算机技术的迅猛发展使自动控制如虎添翼，在应用上得到飞跃。随着生产的发展，自动控制理论经历了从经典控制理论到现代控制理论这两个发展阶段。目前智能控制的各个分支，如适应式控制、模糊控制、神经网络控制以及遗传算法等，正逐步在新型的控制系统中得到应用。

经典控制理论从本世纪 30 年代的奈魁斯特稳定性理论开始，发展了 30 年已基本成熟。60 年代后至今的 30 多年是现代控制理论的形成和发展阶段。

经典控制理论以传递函数法为基础，研究单输入、单输出自动控制系统的性能和设计方法。现代控制理论则是以状态空间法为基础，研究多输入、多输出或变参数、非线性等复杂控制系统的性能和设计方法，它是在经典控制理论的基础上发展起来的。本书主要涉及经典控制理论，对现代控制理论的状态空间法仅作简单的介绍。

所谓自动控制，是指在没有人参与的情况下利用控制器使被控制对象（指生产设备或生产过程）自动地按预定的规律运行。例如使锅炉中水位和压力保持在一定的数值范围内；船舶的舵角按发出的舵令变化；柴油机的起动按设定的程序进行等，都是应用自动控制技术的结果。自动控制理论就是研究这些自动控制系统共同规律的一门技术科学。经典控制理论中最重要的部分是以反馈理论为基础的自动控制原理，这是本教材的主要内容，它为后续课程即轮机自动化奠定了必要的理论基础。

§ 1-2 自动控制的基本方式

对控制对象的工作状态能进行自动控制的系统称为自动控制系统，它一般由控制器和控制对象组成。控制对象是指要求加以自动控制的生产装备或生产过程，例如船舶、柴油机、发电机、锅炉或热力炉程、化工生产过程等，而控制器是指对控制对象的运行起控制作用的装置，这些控制器可以是机械式、液压式、气动式、电动式、电子式或者由一台或多台计算机构成，视控制对象的特点及对控制系统的性能要求而定。自动控制系统按结构可分成三类。

1. 开环控制系统

控制系统的输出量对系统的控制作用没有任何影响，也就是说控制端与控制对象之间只有单向作用而没有反向作用，这样的控制系统称为开环控制系统。

在图 1-1 所示的液位控制系统中， H 为液面高度（又称液位）控制的目的在于保持液面高度不变。但如果由于阀门 $V1$ 的开度变化而引起液体输出流量发生变化时，必然引起液位 H 的变化，

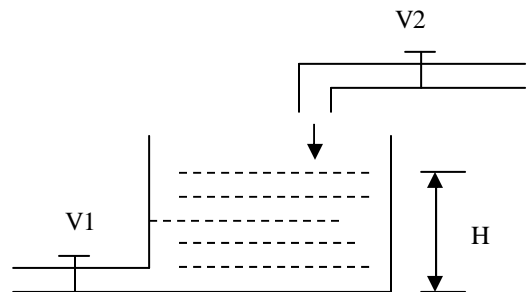


图 1-1 液位控制系统示意图

为了保持 H 不变必需人为地控制阀门 $V2$ 的开度来改变输入液体的流量，以维持液面高度 H 不变。但是液位 H 的变化却不会自动使阀门 $V2$ 开度发生变化，也就是说系统的输出量（液面高度）对系统的控制作用（输入液体流量）没有任何影响。在开环系统中，系统的输出量没有反馈回来与输入量进行比较。开环控制中对于被控制系统的每一个输入信号必有一个系统的固定的工作状态和输出量与之对应，如上述液位系统，如果输入流量一定，液位高度就有一个固定值与之对应。因此，开环系统就无法减小或消除由于扰动（上例中的液体输出流量）的变化而引起输出量（实际液位）与其希望值（设定液位）之间的误差。

开环系统控制方式也可分成两种：

(1) 按给定值控制

这种控制方式的原理是：需要控制的是控制对象的输出量，而测量的只是给定值，从给定值到输出量是单向传递，如上述的液位控制系统，这种控制方式显然有较大的缺陷：当控制对象或控制器受到扰动时，或工作过程中特性参数发生变化时，会导致被控制量（即系统的输出量）的变化，系统对此却无法自动补偿。

(2) 按扰动补偿

在这种控制方式中，需要控制的是控制对象的被控量，而测量的是破坏系统正常运行的扰动。这种扰动大多数情况下是属于系统的负载，如上面液位控制系统、指的是输出液体的流量。本方式利用扰动信号产生控制作用，以补偿扰动对被控制量的影响。但是扰动经测量、运算至执行部件再到控制对象都是单向传递，所以也属开环控制。由于对扰动进行了补偿，因而扰动引起被控制量的变化可以减少甚至消除，但是对于那些不可测的扰动以及控制对象和各功能部件内部参数变化给被控量造成的影响，系统自身无法控制。在船舶轮机系统中最典型的扰动补偿控制是船舶电站中同步发电机的不可控相复励自动电压调整系统，该电压调整系统被控量是发电机的端电压，但测量的是发电机的负载（即负载电流的数值以及相位）。当负载电流增大时或者其功率因数（即相位）降低时，会使发电机的端电压降低。相复励自动调压系统通过对负载电流大小与相位的测量、运算以及变换，使发电机的励磁电流增大，从而使发电机的电压恢复到设定值。

2. 闭环控制系统

闭环控制是指控制器与控制对象之间既有顺向作用又有反向联系的控制过程，即控制系统的输出量对系统的控制作用有影响，这种影响称为“反馈”。闭环控制是自动控制系统工作的主要方式。用它可以实现准确的控制，例如在上述液位控制系统中如果加上一个液位 H 的自动测量与比较装置，如图 1-2 所示那样，那么，阀门 $V1$ 开度变化引起输出液体流量和液位变化时，通过对液位的测量和比较，可得到实际液位与给定值的偏差，这个偏差信号通过执行部件（图中的伺服电动机）反过来使控制输入液体流量的阀门 $V1$ 开度作相应的变化，从而把液位又调整到原来的高度。当然这种调整需要一个过程和一定的时间，一般这个时间不会太长。显然，这是一种利用偏差进行控制的系统。

按偏差控制的

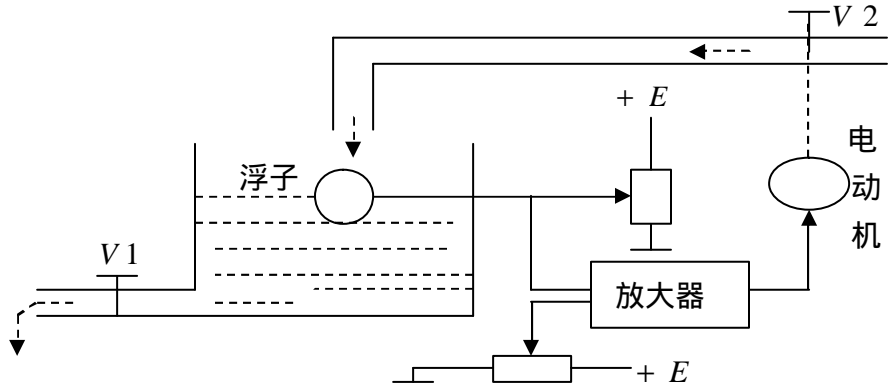


图 1-2 液位控制闭环系统示意图

闭环系统，需要控制的是控制对象中的被控量，而需要测量的是被控量与给定值之间的偏差。因此不论这种偏差是由扰动造成的还是由于结构参数的变化引起的，只要被控量出现偏差，系统便自行纠偏。显然，这种系统从原理上提供了实现高精度控制的可能性。在闭环控制系统中，控制信号往复循环，沿前向通道和反馈通道闭路不断传送，所以按偏差控制的系统又称反馈控制系统。这是自动控制系统中最基本的系统，在工程中包括在船舶及其机械上得到了最广泛的应用。例如船舶主机的冷却水和滑油的温度控制系统，船舶锅炉中蒸汽压力和液位控制系统，船舶发电机的频率控制系统和按偏差控制的自动电压调整系统等。

3. 复合控制系统

反馈控制只有在出现偏差后才能产生控制作用，因此系统在受到强烈扰动后，在控制过程中，被控量可能有较大的波动。为了提高系统的快速性与精度，除了主反馈回路外，宜采用设置在主回路以外前置滤波或扰动补偿装置，这种开环与闭环组合的系统称为复合控制系统，如图 1-3 所示。

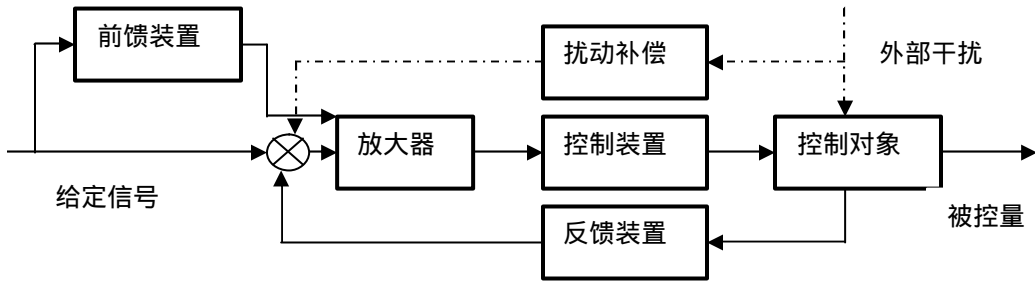


图 1-3 复合控制系统示意图

由上图可见，复合控制是开环控制与闭环控制相互配合的系统。系统按开环进行粗调，而以闭环进行细调（或称校正），兼有开环控制动作迅速、闭环控制精度高的优点，船舶发电机采用的可控相复励自动调压系统便是一种复合控制系统。再如锅炉水位的三冲量控制系统也属于复合控制系统。

§ 1-3 反馈控制系统的概念

下面以船舶主机冷却水温度的自动控制为例说明反馈控制系统的一些基本概念。

船舶主机缸套与活塞需要冷却，冷却水温度必须控制在某个范围内（一般缸套冷却水温度为 50 ~ 60 ，活塞冷却水温度为 40 ~ 50 ），方能保证主机的正常运行。

图 1-4 是主机冷却水温度控制的示意图。系统由冷却器、蝶阀机构和温度计组成，循环冷却水由主机流出后，在冷却器内用海水冷却，其进入冷却器的流量由蝶阀控制。冷却水还有一个旁通管路，其流量由另一蝶阀控制。两个蝶阀联动，作用相反，当一个蝶阀开大时另一个关小。由于主机入口处冷却水的温度是通过冷却器和旁通管路混合的冷却水温度，故使蝶阀开度增大（即旁通蝶阀关小）时，便可使主机入口水温度下降，反之水温度上升。

如果轮机值班人员用肉眼通过观察主机入口处温度计上所指示的温度，不断地手操蝶阀的开度，使主机入口温度保持在规定范围内，那么这种控制方

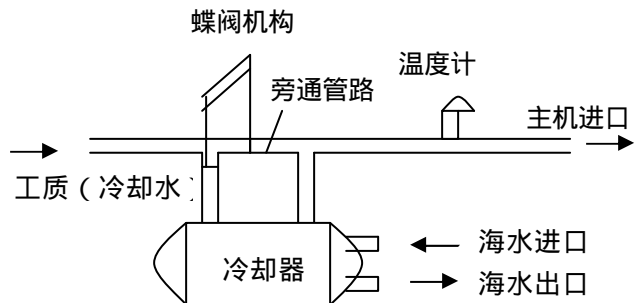


图 1-4 主机冷却水温度控制系统示意图

式，称为人工控制。在人工控制方式下不但轮机人员十分劳累，而且控制精度也不高。

如果把肉眼的观察、大脑的判断和手工的操作用自动化仪表与设备来代替，这样就构成了一个反馈自动控制系统。图 1-5 表示一个由电动仪表组成的主机冷却水温度自动控制系统。

在图 1-5 所示的系统中，当主机负载变化时，冷却水温度随着变化。为了测量冷却水温度，主机冷却水入口处装有热电阻，其电阻值与温度成比例变化。而温度变送器将热电阻阻值的变化转换成电流或电压信号。控制器接受温度变送器输入的电信号，将其与以电信号表示的给定值相比较，所得的偏差信号经放大、运算后转换成一个输出电信号输给电动执行器，使其输出轴的转角发生变化，从而改变蝶阀的开度，使主机冷却水入口处的水温逐渐恢复至接近原来的给定温度。蝶阀究竟开大还是关小，取决于冷却水的实际温度是高于还是低于给定温度。至于蝶阀按什么规律来纠正冷却水温度的偏差，这完全取决于控制器中设定的控制规律。

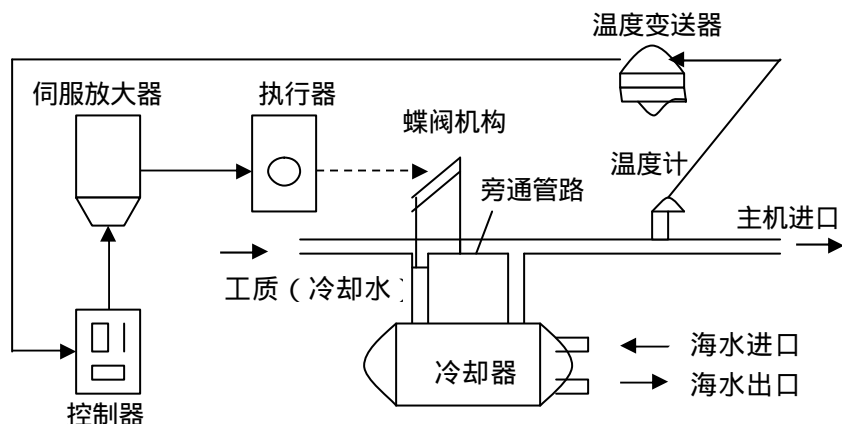


图 1-5 电动仪表控制的主机冷却水温度控制系统

从上述主机冷却水温度反馈控制系统实例，我们可以引出下列一些概念。

(1) 控制对象（或称调节对象）：指被控制的设备与机器，在上述系统中控制对象指的是淡水冷却器。控制对象的输出量就是控制系统的输出量（或称被控量）。在上述系统中冷却水的温度，便是输出量。

(2) 控制器（或称调节器）：具有比较、放大、判断决策与发出指令的功能。在上述系统中便是温度控制器。

控制器有两个输入量，其中一个称为给定值，给定值的信号种类应与测量变送器输出的信号种类相同（上述系统中均为电信号），以便与被控量进行比较。另一个输入量是来自测量变送器的信号，由于这个信号的传递方向对控制系统来说是从其输出端回到输入端，所以称为反馈信号。

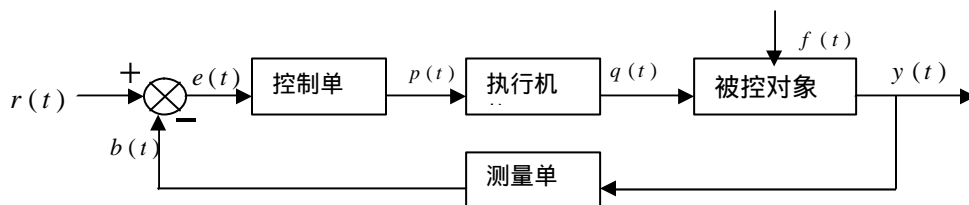
这两个信号在控制器中比较的结果得到被控量与给定值之间的一个偏差信号（正或负），控制器对该偏差信号按设定的控制规律进行运算（最简单的是比例控制规律），然后发出控制指令信号，送入执行器。

(3) 执行器：接受控制器来的控制信号，经过功率放大后产生控制作用，驱动调节机构，改变进入控制对象的物质流或能量流，使控制对象中的被控量向着给定值的方向发生变化，以满足控制要求。在上述系统中电动执行器与蝶阀机构便构成了执行器。

(4) 测量变送器：测量被控量的大小和变化，并把被控量大小与变化变成与给定值相同类型的输出信号送入控制器，如上述系统中的热电阻及温度变送器。测量变送器送出的信号

称为反馈信号，在一般情况下，为了能够实现控制，取反馈信号与给定值相反的符号，称为负反馈。所以自动控制系统也称为负反馈控制系统。反馈信号实际上反映了控制效果，防止被控量过调，使系统稳定。反馈控制实质上是通过对偏差来最后减少或消除偏差的。

如上所述，反馈控制系统除控制对象以外，还包括测量变送器、控制器和执行器三个部分，它们分别完成测量变送、运算放大及执行操作功能。在某些简单的自动化仪表装置中，这三个部分结合在一起，没有明显的界限，组成所谓基地或自动化仪表。但在一般的自动控制系统中，它们三个独立的部分，其功能结构图如图 1-6 所示。



$r(t)$ - 给定信号 $b(t)$ - 反馈信号 $e(t)$ - 偏差信号 $p(t)$ - 控制信号
 $q(t)$ - 控制作用信号 $y(t)$ - 被控量 $f(t)$ - 控制对象的外部扰动

图 1-6 自动控制系统功能结构图

从上述结构图看出，自动控制系统有下列特点：

(1) 信号在各个单元之间的传递是单向的，即各单元的输入信号可以影响输出信号，但输出信号对输入信号无反作用。

(2) 自动控制系统具有负反馈，即反馈信号与给定信号相减以获得偏差信号；

(3) 信号的传递在系统中形成一闭合回路，因此自动控制系统是闭环系统。

(4) 控制器发出的指令是由偏差信号产生的，所以自动控制系统是一个由偏差信号驱动的系统。

自动控制系统可以从不同角度进行分类。除了上节提到的以有元反馈作为标准分成开环系统、闭环系统和复合控制系统外，最常用的是按给定值的性质来分类：

(1) 定值控制系统

系统的给定值是某一确定值，希望系统的被控量保持在该值上。上述的主机冷却水温度控制便是一个典型的定值控制系统的例子。与船舶主、辅机相关的自动控制系统，如主机滑油温度控制，锅炉水位与蒸汽压力控制，发电机的频率与电压控制等都属于这一类控制系统。

(2) 程序控制系统

系统的给定值按某一预先确定的时间规律变化的系统。例如船舶主机自动遥控系统中的调速系统，柴油机增减负载的控制过程是按预先规定的增减负载的变化规律来改变转速的给定值（图 1-7），以防止主机气缸出现不允许的热应力变化。

(3) 随动控制系统

系统的给定值预先不能确定，它取决于系统外的某一进程。如随动操舵系统，其舵角给定值完全取决于当时的航行情况。其他如热工参数自动测量与自动记录仪也属于随动控制系统范畴。

定值控制系统的任务是保持被控量不变。而随动控

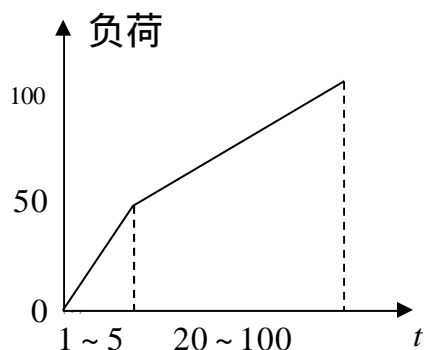


图 1-7 主机程序负荷控制曲线

制系统或程序控制系统的任务是力求被控量紧紧跟随给定值的变化或随设定的时间程序而变化。

自动控制系统还可按动作方式来分类。

(1) 连续控制系统

系统各个环节的输出量都是输入量的连续函数。上面所提到的一些例子均属于连续控制系统。

(2) 断续控制系统

船舶上普遍使用两位式（或多位式）控制器，如在辅锅炉或冷藏空调装置中的两位式压力控制器（或称压力开关）、两位式温度控制器（或称温度开关）和两位式液位控制器（或称液位开关）等，由这些开关构成的控制系统都属于断续控制系统。断续控制系统可以把系统的输出量保持在一定的范围内。

自动控制系统还可按其他方式分类。

如按被控量的稳态值是否受外界扰动影响分成有差系统（即受影响）和无差系统（即不受影响）两种；按被控量的数目分成单变量控制系统（一个被控量）和多变量控制系统（多个被控量）；按控制系统的性质又可分为线性控制系统（其数学模型可以用线性微分方程来描述）和非线性控制系统（其数学模型本质上是非线性的）两类。

以反馈原理为基础的经典控制理论已经成熟，并在工程中得到广泛应用；随着计算机的迅速发展，现代控制理论的应用已日益显示出强大的生命力，并在一些复杂生产过程中得以应用。其中用得最多的是最优控制、自适应控制和智能控制。

(1) 最优控制

最优控制是要求控制系统对某种性能指标实现最优的控制，这种性能指标又称目标函数，它通常要求优质、高产、低耗、高效，一般是与时间、燃料消耗、能源供给等的优化有关。如航路最优控制系统，船舶主机燃油最优控制系统，是以同样航线、同样航行时间为条件，达到燃油消耗量最小为目标的最优控制系统。

(2) 自适应控制

顾名思义，它有自适应的能力，即当被控对象特性、元件参数或环境有变化时，系统能自动测量这些变化并自动改变控制器的结构与参数，使系统自动适应这些变化并始终保持最优的性能指标。自适应功能主要是由过程结构和参数的自动辨识和控制器参数的自动调整两方面来实现的。

(3) 自学习控制

它除具有辨识、判断功能外，还有积累经验和学习功能。在控制系统的特性事先不能确切地知道，或者不能准确地用数学模型来描述时，采用自学习控制可以在工作过程中不断测量、估计系统的特性，并决定最优的控制方案，实现性能的最优控制，目前正在广泛研究的人工神经网络控制便是其中之一。

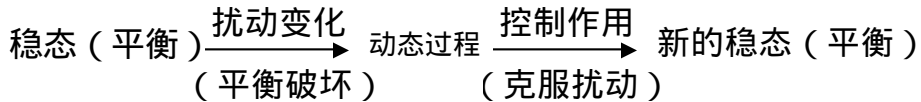
§ 1-4 自动控制系统的性能要求

1. 自动控制系统的稳态与动态

在自动控制系统中，被控量不随时间变化的平衡状态称为系统的稳态（也称为静态）；而被控量随时间而变化的不平衡状态称为系统的动态（也称为瞬态）。

当一个自动控制系统的输入量（包括给定值和扰动）恒定不变时，一般说整个系统最终将处于一种相对平衡状态，系统各个环节如测量变送器、控制器和执行器的输入量和输出量都无变化，这就是上面所述的稳态。例如主机冷却水温度自动控制系统，如果主机冷却水温度的给定值（即设定温度）不变，主机的负载恒定，则温度变送器的输出、电动执行器的输出转角以及蝶阀的开度都不会变化，系统处于稳态。一旦主机负载发生变化（即扰动变化），则系统平衡被破坏，被控量（冷却水温度）将发生变化，控制器输出量也跟着变化，

执行器动作，改变冷却水进入冷却器及旁通管路的流量，以克服扰动变化的影响，力图使冷却水温度恢复到给定值，系统重新又进入稳态，这样系统将进行下面所示的一个自动控制过程。



可见从扰动发生，经过自动控制，直到系统重新建立平衡，这一段时间内系统的各个环节的输入量和输出量都处于变化状态中，这种状态称为“动态”。系统的稳态是暂时的、相对的和有条件的；而动态才是普遍的、绝对的和无条件的，所以自动控制系统总是处于运动过程之中。研究自动控制系统应以受控的动态过程为主，即研究扰动（或给定）和控制这一对矛盾的相互作用而产生的被控量的变化过程，以评定一个自动控制系统的动态与稳态品质指标是否符合生产过程的要求。

2. 自动控制系统的过渡过程

自动控制系统在动态中被控量随时间的变化过程称为过渡过程。在过渡过程中，被控量随时间变化的曲线称为过渡过程曲线，图 1-8 是一条典型的过渡过程曲线。

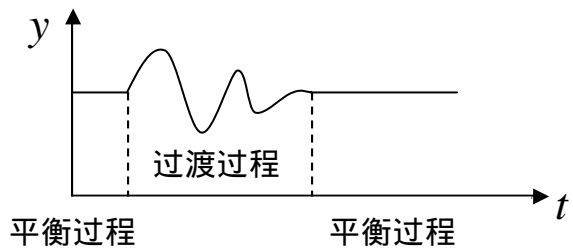


图 1-8 过渡过程曲线

过渡过程曲线是分析自动控制系统动态特性与品质指标的重要依据。

自动控制系统的动态品质是系统固有的，由组成系统的各个环节的动态品质所决定，但是反映系统动态品质的过渡过程却受到系统输入量形式的影响。而在生产过程中，系统的输入量（特别是扰动）多半为随机的，没有固定形式。为了便于分析，也为了便于对不同系统的动态品质进行比较，通常假定一些典型的系统输入，其中最常用的有：

(1) 阶跃输入（图 1-9），其数学表达式为：

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

(2) 速度输入或称斜坡函数（图 1-10），其数学表达式为：

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

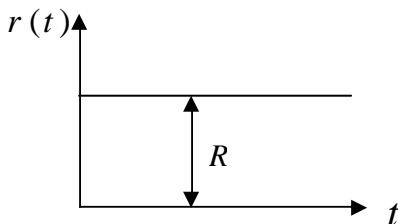


图 1-9 阶跃输入信号

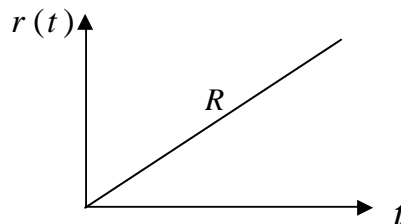


图 1-10 速度输入信号

如果 $R=1$ ，称为单位速度输入（或单位斜坡函数）。

(3) 加速度输入或称抛物线函数（图 1-11），其数学表达式为：

$$r(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} R t^2 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$

(4) 脉冲输入 (图 1-12), 其数学表达式为:

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

如 $h=1$, 称为单位脉冲输入。

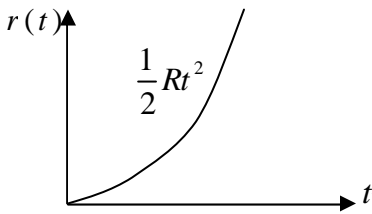


图 1-11 加速度输入信号

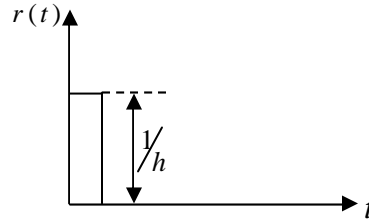


图 1-12 脉冲输入信号

(5) 正弦输入 (图 1-13), 其数学表达式为

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

式中, A 为幅值, ω 为角频率。

在上述几种输入形式中最典型的是阶跃输入, 这是一种最常见的输入, 而且也是对系统的控制最不利的一种扰动形式。如果一个自动控制系统能克服阶跃扰动对被控量的影响, 那么其他形式的扰动影响也就不难克服了。

所以评价不同控制系统控制过程, 通常都在相同的阶跃输入信号作用下, 比较它们的输出信号 (即被控量) 的变化过程。控制系统受阶跃扰动后其过渡过程曲线有如图 1-14 所示的四种基本形式。被控量如能始终稳定在给定值所要求的数值上, 这是最理想的, 但实际上办不到, 人们希望的是在控制系统受扰动后, 被控量发生变化后能较快速地、较准确地趋于稳定状态。

如果自动控制系统受到扰动后, 经过过渡过程, 被控量能够达到新的稳态值, 如图 1-14(c)、(d) 所示, 那么这称为稳定的控制过程, 该自动控制系统具有稳定性。其中图 1-14(c) 则称为衰减振荡过程, 而图 1-14(d) 则称为非周期过程 (有时称单调过程)。如果自动控制系统受扰动后, 控制量呈发散振荡 (图 1-14(a)) 或等幅振荡 (图 1-14(b)) 这种形式, 就叫做不稳定的控制过程, 这种系统不具稳定性, 这在生产过程中是不允许的。所以稳定性是判定自动控制系统动态品质的第一要素。

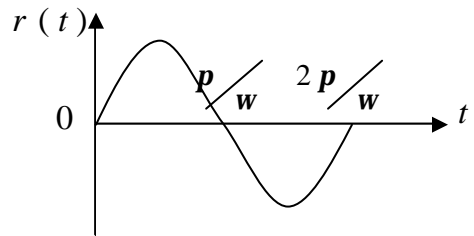


图 1-13 正弦输入信号

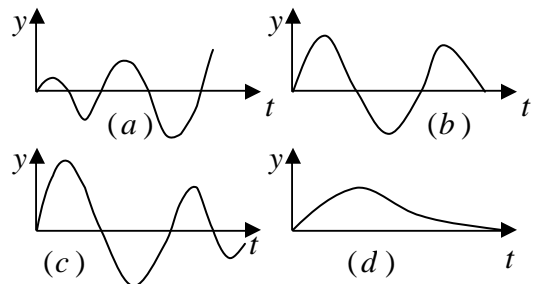


图 1-14 过渡过程曲线类型

3. 自动控制系统过渡过程的性能要求

为了评定一个自动控制系统的性能，可以在系统上加上阶跃扰动输入，从而得到被控制量的过渡过程曲线，然后对过渡过程曲线加以分析。人们习惯于取阶跃扰动作为典型的系统输入信号，其原因有三：

它反映了实际生产过程中最常见的扰动。

数学分析过程较简单。

这类扰动对系统来讲是最不利的情况，考虑最坏的情况来设计系统，可以增强系统工作的可靠性。

系统受阶跃扰动后，对被控量过渡过程性能的要求主要集中在稳定性、准确性、快速性三个方面。

(1) 稳定性

如上所述，要系统正常工作，首先要求该自动控制系统是稳定的。即当系统受到外界作用（即输入信号）时，系统的输出量（即被控量）的过渡过程是随时间增长而衰减并趋向一个稳定值，输出量最终能与希望值一致。而不稳定的系统其输出量的过渡过程随着时间的增长不衰减或表现为持续振荡。从系统受扰动后被控量过渡过程的几种形式来看，发散振荡和等幅振荡都属于不稳定的控制过程，而衰减振荡和非周期过程属于稳定的控制过程，是正常的控制过程。对控制系统来说稳定是首要要求但不是惟一要求，对其过渡过程的其他品质还有所规定，才能满足生产过程的要求。

为了能定量地说明控制过程的稳定性，下面就定值控制系统与随动控制系统来说明有关稳定的品质指标。

定值控制系统

图 1-15 所示的曲线表示了定值控制系统受到阶跃扰动时，被控量 $y(t)$ 的过渡过程。

受扰动后不存在静态误差的系统称为无差系统，即在图 1-15 上 $y_{\infty} = y_0$ 对于受扰动后存在静态误差的系统称为有差系统，即 $y_{\infty} \neq y_0$ 。

一般用衰减率这个概念来定量地表示控制系统的稳定程度。衰减率是指经过一个周期被控量波动幅值衰减的百分数，用符号 j 来表示，有

$$j = \frac{y_1 - y_3}{y_1} = 1 - \frac{y_3}{y_1}$$

式中， y_1 ：被控量第一个波峰的幅值；

y_3 ：被控量第二个波峰的幅值。

根据 j 的大小，便可容易地判别过渡过程的性质。

若 $j < 0$ ，为发散振荡过程；

$j = 0$ ，为等幅振荡过程；

$0 < j < 1$ ，为衰减振荡过程；

$j = 1$ ，为非周期过程，又称单调过程；

$j > 0$ ，表示系统是稳定的。但也不是一越大越好，如 $j = 1$ ，这变成了非周期过程，过渡过程持续时间长，动态偏差大。实践表明，对于以热工参数为控量（如温度、压力、流量等）的自动控制系统，最佳的过渡过程是衰减率 $j = 0.75 \sim 0.9$ 的衰减振荡过程。

此外，衰减比 N ，也可用来表示振荡过程的衰减程度。

N 的定义是

$$N = Y_1 / Y_3$$

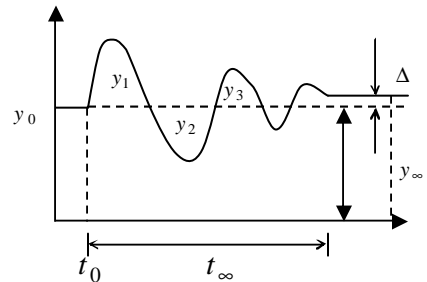


图 1-15 定值控制系统受阶跃扰动时的过渡过程曲线

所以

$$j = 1 - \frac{1}{N}$$

最佳衰减比 N 一般处于 4:1 到 10:1 这个范围内。

随动控制系统

对随动控制系统，其品质指标评定是以该系统受阶跃的给定输入信号 y_g （而不是扰动作用）后被控量的过渡过程，当然稳定的过渡过程可以是非周期的，也可以是振荡的（图 1-16）。

这时，同样可以用衰减率 $j = 1 - y_3/y_1$ 来表示稳定性的好坏，不过这里的 y_1 和 y_3 是代表给定值与被控量之间的偏差。

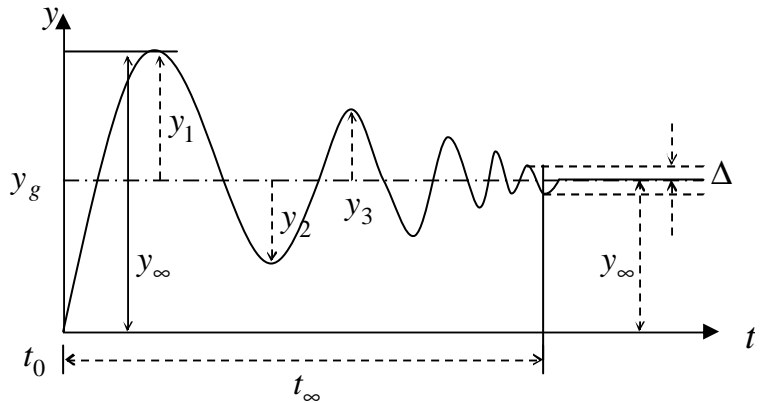


图 1-16 随动控制系统给定输入阶跃变化时的过渡过程

(2) 准确性

控制过程的准确性可以用被控量的动态偏差和静态偏差表示。动态偏差是指整个过渡过程中被控量偏离给定值的程度。在定值控制系统中是被控量偏离它原始稳态值的大小。而在随动控制系统中是指被控量偏离给定值的大小。在整个过渡过程中始终存在动态偏差，但总有一个最大的动态偏差 y_{max} 。 y_{max} 越大，说明系统偏离规定的生产状态越远，动态准确性也越差。对于某些自动控制系统，要求被控量的最大动态偏差不应超过正常生产的允许范围。

在随动控制系统中，有时也用最大超调量 d_{max} (%) 这个概念来表示系统的动态准确性。

$$d_{max} (\%) = \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 y_{max} 为被控量第一次达到的最大值； $y(\infty)$ 是被控量的稳态值，即 $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y(\infty)$ 。

除了动态偏差外，准确性还体现在静态偏差（又称稳态偏差）上，这是指过渡过程结束后的残余偏差，对定值控制系统而言就是 $y(\infty)$ ，即过渡过程结束后被控量新的稳态值与原始稳态值（在图 1-15 上原始稳态值为零）之间的差值。对随动控制系统而言则是新的稳态值 y_{∞} 与给定值 y_0 之间的偏差 Δy_s 。一般自动控制系统要求稳态偏差越小越好，但要看具体情况，不能一概而论，例如，当执行机构在死区时，如过分要求控制精度，可能会造成系统不稳定。

(3) 快速性

快速性可用过渡过程时间、自然振荡频率或自然振荡周期来表示。

过渡过程时间：从扰动发生到被控量又重新趋于稳定而建立新的平衡状态为止这一段时间叫做过渡过程时间。一般希望过渡过程时间尽可能短。从理论上讲被控量完全到达新的平衡状态需要无限长的时间，但实际上由于仪表灵敏度的限制，被控量接近稳定值时，仪表指示值就不再改变了。所以可以在稳态值附近规定一个范围，如图 1-15 所示的 Δ ，当控制量

进入这一范围而不再越出时，就可以认为被控量已达到稳态值。而进入这一范围的时间 t_{∞} 称为过渡过程时间，实际上一般 Δ 取为 y_{∞} 的 $\pm 5\%$ 或 y_{∞} 的 $\pm 20\%$ ，这相应于稳态误差小于 5% 或 20% 。而真正达到稳定时的静态偏差为 D ，它是反映系统静态准确度的一个重要指标，它与 Δ 是有差别的，一般 $D > \Delta y_s$ 。

还有一个可以反映快速性的指标是振荡频率（或周期），过渡过程曲线上第一个波峰到第二个波峰之间的时间叫做周期，其倒数为频率，在保证一定衰减率的条件下，一般希望周期越短越好，这意味着过渡过程时间短，快速性好。

另外也需注意 $y(t)$ 穿越 $y(\infty)$ 的次数，穿越次数越少，说明过渡过程越平稳，能比较平滑地接近稳态，这能减轻活动部件（如阀门、可逆电机、电动执行机构等）的磨损。

总的来说，对定值控制系统过渡过程品质要求是：

- (1) 过渡过程的动态偏差 y_{\max} 及静态偏差 $D y_s$ 要小。
- (2) 过渡过程衰减率最好在 $0.75 \sim 0.9$ 之间；
- (3) 过渡过程时间 t_{∞} 要短。

而对随动控制系统，则要求：

- (1) 过渡过程的最大超调量 s_{\max} 要小；
- (2) 过渡过程时间 t_{∞} 要短；
- (3) 过渡过程振荡次数要少。

上面对稳定性、准确性和快速性等品质指标分别作了说明，其实这三者是互相制约的，如从稳定性上看，非周期过程最好，但它的快速性与准确性均较差。所以必须根据实际控制系统的要求，在这三个方面作出合理的折衷选择。一般在热工参数的控制过程中，首先要求稳定，在满足 $\gamma = 0.75 \sim 0.9$ 的前提下，尽量减少被控量的动态偏差和缩短过渡过程的时间，以达到最佳的控制过程。