



3.1 自动控制系统概述

3.1.1 自动控制的基本概念

随着科学技术的发展,自动控制技术的应用越来越广泛。从比较简单的家用电器设备(如冰箱、空调等)到复杂的飞机自动控制系统,都采用了自动控制技术。在控制过程中,被控量可能是电压或电流等电参量,也可能是温度、速度、压力等非电量。

所谓自动控制,是指在没有人直接干预的情况下,利用物理装置使工作机械或生产过程自动地按照预定的规律运行,或使被控量(工作机械或过程的某个物理参数)按预定的要求变化。

自动控制系统一般包括控制器和被控对象两大部分。被控对象是指生产设备或工艺过程;控制器指对被控对象实施控制作用的装置。自动控制的任务就是使系统克服各种扰动的影响,使系统按所要求的规律运行。

下面以水位控制系统为例,介绍自动控制的基本概念。

1. 人工控制与自动控制

图 3.1-1 所示为水箱的水位控制系统,实现水位控制有两种方法:人工控制和自动控制。通过人工控制阀门的开度可以达到控制水位的目的。

这种人工调节的过程可以归纳为:

- (1) 操作员将期望的液位值(即水位高度)记在大脑中;
- (2) 操作员用眼读取实际液位值;
- (3) 操作员将液位实际值与期望值(也称为给定值)进行比较,得出两者的偏差;
- (4) 操作员根据偏差的大小和性质(正负性)调节进水阀门的开度,当实际水位高于要求值时,关小进水阀门开度,否则加大阀门开度以改变进水量,从而改变水箱水位,使之与要求值保持一致。

由此可见,人工控制的过程就是测量、求偏差、进行控制以纠正偏差的过程。也就是检测偏差,并以此为依据纠正偏差的过程。

这样一个简单的控制系统,若能找到一个控制器代替人的大脑,就可以变为一个能自动进行控制的系统了。图 3.1-2 所示的就是一个能自动控制水位的系统。图中阀门的开度由浮子、连杆和杠杆控制。当用户用水量突然增加导致水池液位下降时,用于测量液位高度的

浮子将下降,浮子、连杆与杠杆机构测出液位期望值与实际值之间的偏差值,然后由杠杆机构带动进水阀,使阀门开度增大,通过增大进水量维持水位高度不变。

在图 3.1-2 所示的系统中,没有人的直接参与,而是利用自动控制装置使阀门的开度自动调整,以维持水箱水位按照预定的要求变化。这就是一个最简单的自动控制系统。

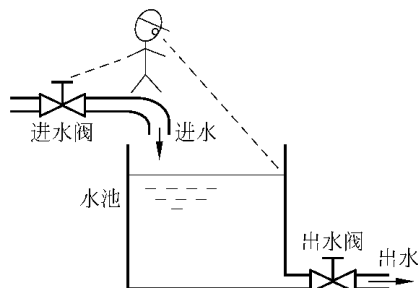


图 3.1-1 人工控制水箱水位

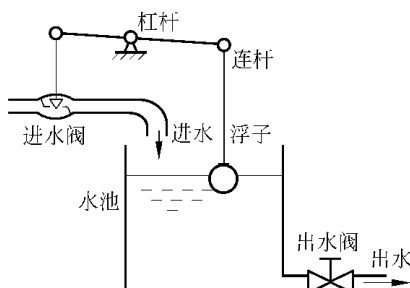


图 3.1-2 水位自动控制系统

图 3.1-2 所示的自动控制系统与图 3.1-1 所示人工控制系统的工作原理非常相似,自动控制装置与人的器官所对应的、能完成相应功能的元件有:

(1) 给定元件: 连杆的长度决定期望的液位高度,因此连杆长度就可以代替人的大脑记下液位的期望值;

(2) 测量元件: 浮子作为传感器,可以代替人的眼睛测取实际液位值;

(3) 比较元件: 浮子和连杆的组合代替人的大脑计算出液位的偏差值;

(4) 调整元件: 杠杆机构代替人的大脑对偏差的大小和性质做出判断;

(5) 执行元件: 杠杆机构代替人手调节进水阀的开度,以调节进水量的大小,使实际液位值达到期望值(给定值)。

由此可见,一个自动控制系统一般应包括以下环节: 给定元件、测量元件、比较元件、调整元件和执行元件,而上述液位自动控制系统就是由这些元件和被控对象(液位高度)组成的有机整体。

一个可消除误差的液位自动控制系统如图 3.1-3 所示。阀门的开度由电位器的电压控制,浮子为实际水位的测量装置,当实际水位低于要求水位时,电位器输出的电压值为正,且其大小反映了实际水位与给定值的差值。放大器将差值信号放大后驱动电动机带动减速器使阀门开度变化,直到实际水位重新与给定水位值相等时为止。可见,水位自动控制的目的是消除或减小偏差,使实际水位达到要求的值。

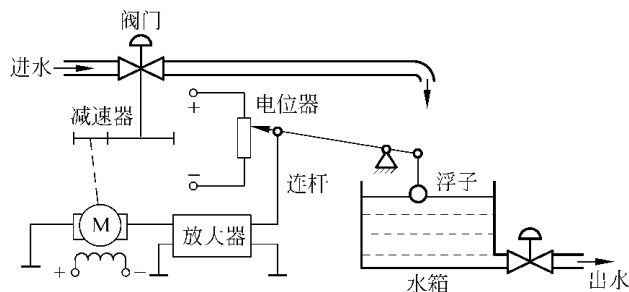


图 3.1-3 可消除误差的液位自动控制系统

实际的自动控制系统都很复杂,为了使控制系统容易理解,经常采用方框图的形式来表示控制系统的基本结构。上述的自动控制系统可以用图 3.1-4 所示的方框图表示。它由给定元件(电位器)、测量比较元件(浮子/连杆)、执行元件(电动机、减速器及阀门 V_1)、被控对象(水箱及液面高度)等组成,图中的 Q_1 表示进水量, Q_2 表示出水量,属于干扰信号。上述部件组成了一个闭合的环路。在闭环系统中,实际的液面高度与设定值进行比较,误差信号通过电动机去控制阀门的开度,对被控对象实施控制。

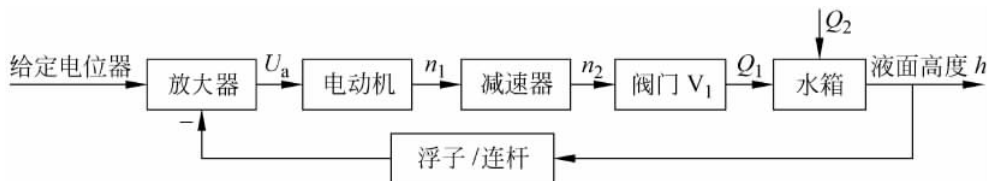


图 3.1-4 水位自动控制系统方框图

在控制系统方框图中,常用方框表示各个环节,用箭头代表信号的流动方向。从图中可以看到反馈控制的基本原理,也可以看到各职能环节的作用是单向的,每个环节的输出受输入信号的控制。

2. 自动控制系统的控制方式

自动控制有两种基本的控制方式：**开环控制**与**闭环控制**。与这两种控制方式对应的系统分别称为开环控制系统和闭环控制系统。

1) 开环控制系统

开环控制系统是指被控量对控制过程无影响的系统,控制信号的传递方向只有顺向没有反向。也就是说,控制作用的传递路径不是完全闭合的,故称为开环控制系统。这种控制方式需要控制的是被控量(如水位),而系统可以调节的只是给定值,系统的信号由给定值至被控量单向传递。图 3.1-5 所示的直流电动机转速控制系统就是一个开环控制系统的例子。

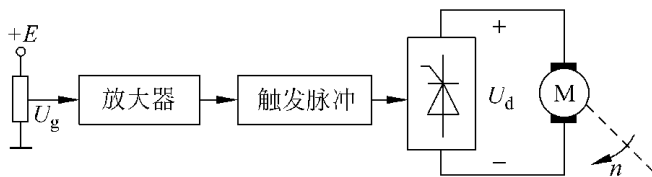


图 3.1-5 开环控制系统

在该系统中,电机的转速由设定电位计上的电压来控制。但当电机所带负载变化或电网电压波动时,电机的转速值 n 必将发生变化,从而偏离原来设定的值。因此,开环系统的抗干扰能力差,控制精度较低,一般只用在要求不高的场合,如家用电风扇的转速控制、自动洗衣机、灯光照明系统及各种顺序控制系统等。

2) 闭环控制系统

为了解决抗干扰问题,必须采用闭环控制。在闭环系统中,将输出量**反馈**到系统的输入端,使输出量对控制作用产生直接影响,其原理框图如图 3.1-6 所示。从系统的信号流向

看,系统的输出信号沿反馈通道又回到了系统的输入端,构成了闭合通道,故称为闭环控制或反馈控制。

在图 3.1-6 中,被控对象是电动机的转速,但因速度是非电量,它不能直接与给定的电压值进行比较,因此采用测速发电机将转速转换为电压信号 U_f ,并反送回给定端,与给定电压值 U_g 进行比较,只要两者不相等,就会产生偏差信号,控制器根据偏差信号控制电路的工作,进而使可控硅的导通状态改变,这样就可以使直流电动机的转速得到精确控制。

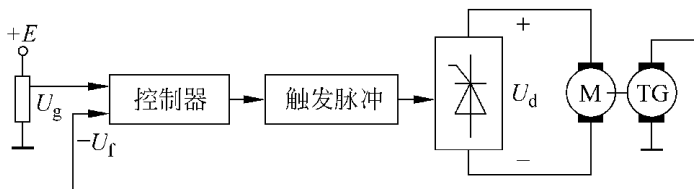


图 3.1-6 闭环控制系统原理图

上述的闭环系统可以用图 3.1-7 所示的方框图表示。它由控制对象(电动机)和控制器(放大器、触发器等)组成。反馈通道的反馈网络一般就是一个分压器。这些部件组成一个闭合的环路。在闭环系统中,输出信号(实际值)与设定值进行比较,误差信号通过控制器传送到控制对象的输入端。

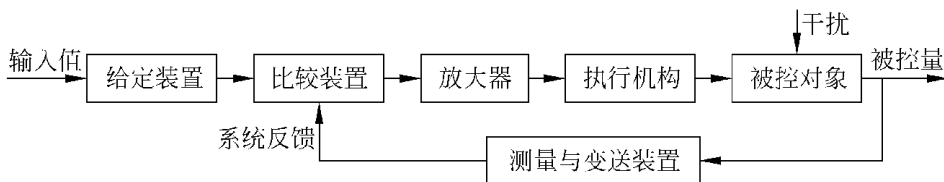


图 3.1-7 闭环控制系统方框图

闭环控制系统的优点是采用了反馈,因而使系统响应不受外界扰动的影响,具有精度高等优点;但闭环系统结构复杂,容易产生振荡,在设计控制器时需要着重考虑。

下面这个例子与飞行控制有关,我们可以结合专业进一步理解自动控制系统的基本概念。

飞机上的自动驾驶仪是一种能保持或改变飞机飞行状态的自动装置,它可以稳定飞行的姿态、高度和航迹,可以操纵飞机爬高、下滑和转弯。

如同飞行员操纵飞机一样,自动驾驶仪控制飞机飞行是通过控制飞机的 3 个操纵面——升降舵、方向舵和副翼的偏转,来改变舵面的空气动力特性,以形成围绕飞机质心的旋转转矩,从而改变飞机的飞行姿态和轨迹。现以比例式自动驾驶仪稳定飞机俯仰角为例,说明其控制原理。图 3.1-8 为自动驾驶仪稳定俯仰角的控制原理示意图。

图中的垂直陀螺仪作为测量元件,用以检测飞机的俯仰角,当飞机以给定俯仰角水平飞行时,陀螺仪电位器没有电压输出;如果飞机受到扰动,使俯仰角向下偏离期望值,陀螺仪电位器将输出与俯仰角偏差成正比的信号,经放大后驱动舵机,一方面推动升降舵面向上偏转,产生使飞机抬头的转矩,以减小俯仰角偏差;与此同时,带动反馈电位器滑臂,使其输出

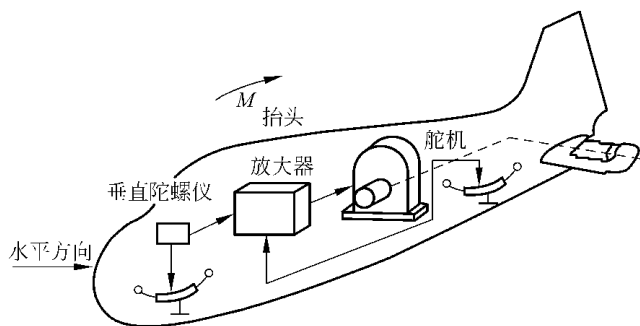


图 3.1-8 飞机自动驾驶仪原理示意图

与舵偏角成正比的电压，并反馈到输入端。随着俯仰角偏差的减小，陀螺仪电位器的输出信号越来越小，舵偏角也随之减小，直到俯仰角回到期望值，这时舵面也恢复到原来的状态。

图 3.1-9 是该系统的方框图。图中的飞机是控制对象，俯仰角 θ 是被控量，放大器、舵机、垂直陀螺仪、反馈电位器等都是控制装置，即自动驾驶仪。设定值是给定的常值俯仰角。控制系统的任务是在任何扰动（如气流冲击）作用下，始终保持飞机以给定的俯仰角飞行。

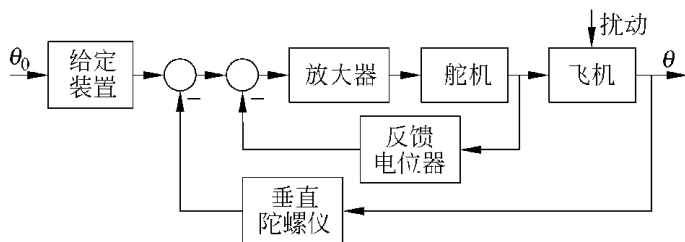


图 3.1-9 俯仰角控制系统方框图

3.1.2 自动控制系统的组成

1. 自动控制系统的组成

根据控制对象和使用元件的不同，自动控制系统有各种不同的形式，但大都可以用几个基本环节表示。下面以图 3.1-9 所示的飞机俯仰角控制系统为例来说明系统的组成和相关术语。

1) 给定机构

其功能是设定与被控量相对应的给定量，并要求给定量与反馈量在种类和量纲上保持一致。常见的给定装置有电位器、给定积分器及数字给定装置等。图示系统的给定装置是电位器。给定装置的精度直接影响着控制精度。

2) 检测及反馈环节

其功能是测量被控量，并将其转换为与给定量相同的物理量，再反馈到系统的输入端，与给定量进行比较。该环节的精度及特性直接影响控制系统的品质，是构成闭环控制系统的关键部件。在飞机自动驾驶仪中，检测及反馈元件是电位器和垂直陀螺仪。

3) 控制器

首先将反馈量与给定量进行比较，输出差值信号；再根据这个偏差信号的大小和变化

趋势,按预先设计的运算规律进行运算,并将结果输出到执行机构。根据控制要求,控制器可以是一个简单的电压或功率放大器,也可以对偏差信号进行微分或积分等运算,其目的是改善系统的稳态和动态性能。控制器是闭环控制系统中的重要环节。

4) 执行机构

其功能是接收来自控制器的信号,直接对被控对象作用,以改变被控量的值,从而减小或消除偏差,使被控制量达到所要求的数值。执行机构一般由传动装置和调节机构等组成,本系统中执行机构为舵机。

5) 被控对象及被控量

被控对象及被控量是指控制系统中所要控制的设备或变量。如上面的系统中,飞机就是被控制的对象,各舵面的偏转角就是被控量。

2. 典型环节及其特性

自动控制系统是由一个一个的环节组成的总体。在生产实际中存在着许多工程控制系统,这些系统有机械的、液压的、气动的、电气的或几种类型混合的,尽管它们的构造或功能不同,但有些环节的动态性能相同,因此可以用同一类环节表示。复杂的控制系统都是由一些典型环节组成的。以下是自动控制系统中常见的一些典型环节及其特性。在以下内容中,用 $x(t)$ 表示输入量, $y(t)$ 表示输出量,首先列出输出量和输入量之间的数学关系式,然后给出环节的阶跃响应。

1) 比例环节

比例环节又称为放大环节,它的输出量与输入量之间在任何时候都是一个固定的比例关系,其数学方程式为

$$y(t) = K_P x(t)$$

式中, K_P 为比例系数。

比例环节是自动控制系统中使用最多的一个环节,如比例运算放大器、齿轮减速器、杠杆、分压器等都是比例环节。图 3.1-10 是比例环节的阶跃响应曲线,图中的 $x(t)$ 表示阶跃输入信号, $y(t)$ 是比例环节的输出信号。从曲线可以看出,当输入量发生突变时,输出量成比例地变化。

2) 惯性环节

惯性环节的特点是:当输入量突变时,输出量不会突变,而是按指数规律逐渐变化,即具有惯性,上升的快慢由时间常数 T 决定。惯性环节的输入输出信号变化曲线如图 3.1-11 所示。由图可见,惯性环节都存在一定的延迟,这是由于这类环节中一般都有储能元件,当输入突然改变时,它们的物理状态不能突变,即输出量不能立即反映输入量的变化。

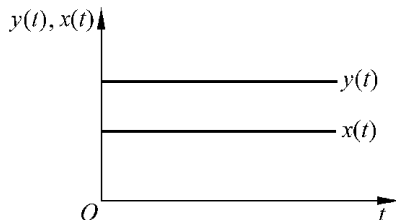


图 3.1-10 比例环节的阶跃响应

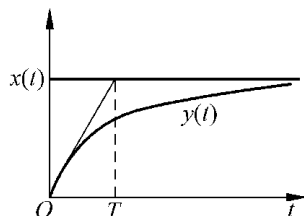


图 3.1-11 惯性环节的阶跃响应

在实际系统中,惯性环节经常用到,如储存磁场能的电感、储存电场能的电容、储存弹簧势能的弹簧、储存动能的机械负载等,都可以用惯性环节表示。

3) 积分环节

积分就是随时间积累的意思,在日常生活中属于积分过程的例子很多。

为了说明积分环节的概念,先看一个例子。图 3.1-12 是一个充液体的容器,其输入量是液体流量,输出量是液面高度,因此输入量随时间积累起来就是输出量,输出量和输入量之间的这种关系就叫积分关系,具有这种特性的环节统称为积分环节。

积分环节输出量和输入量之间的关系可以表示为

$$y(t) = \frac{1}{T} \int x(t) dt \quad t \geq 0$$

式中, T 为积分常数,其大小决定积分的快慢。 T 越大,积分越慢。

当输入量发生阶跃变化时,输出量以一定的斜率线性上升,如图 3.1-13 所示。

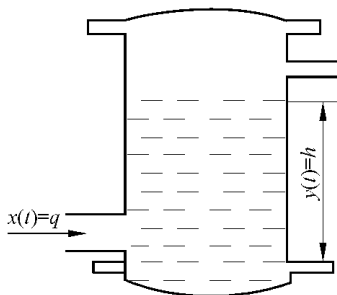


图 3.1-12 积分环节

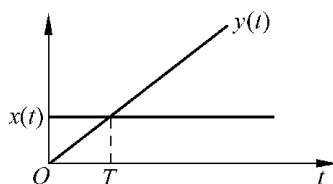


图 3.1-13 积分环节的阶跃响应

对积分环节来说,只要有输入信号存在,不管多大,输出总是上升的。这一特点可以用来改善控制系统的稳态性能。

积分环节也是自动控制系统中最常见的环节之一,凡是输出量对输入量具有储存和积累特点的元件一般都含有积分环节,例如机械运动系统中的位移与转速、转速与转角、阻容电路中的电压与电流等。

4) 微分环节

微分环节被广泛应用于自动控制系统中,用来改善系统的动态特性。微分环节的特点是:输出量与输入量的微分成正比,即输出量与输入量无关而与输入量的变化率成正比。

理想微分环节的输出 $y(t)$ 与输入 $x(t)$ 的关系为

$$y(t) = T \frac{dx}{dt}$$

若输入信号为阶跃函数,则其输出信号是一个脉冲函数,当 $t > 0$ 时,输出即为零,如图 3.1-14 所示。可见,微分环节只在输入信号发生跃变时起作用,即只在系统的动态过程中起作用,当系统进入稳态运行时,微分环节就不再有输出。这一特性可用来改善系统的动态品质。

5) 振荡环节

这种类型的系统常含有两个不同形式的储能元件,若

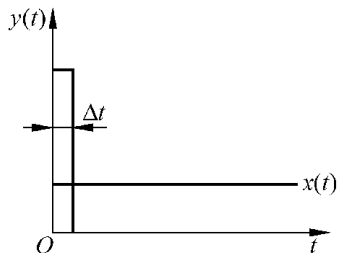


图 3.1-14 微分环节的阶跃响应

两种元件中的能量有相互交换,就可能在交换和储能过程中产生振荡。在机械元件中,储能元件一般指弹簧和惯性元件;在电子领域,储能元件有电容器和电感线圈。图 3.1-15 所示是由电阻 R 、电感 L 和电容 C 组成的电路。当电路的参数满足 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时,电路的阶跃响应曲线是振荡的,如图 3.1-16 所示。电路的这种状态称为欠阻尼状态。在实际系统中,为了提高系统的快速性,常常将系统设计成欠阻尼状态。

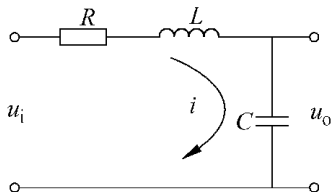


图 3.1-15 RLC 串联电路

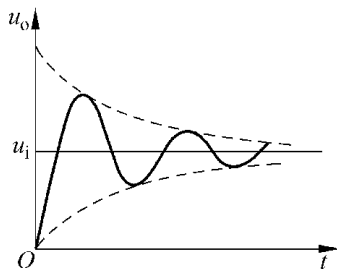


图 3.1-16 振荡环节的阶跃响应

3.1.3 典型输入信号和控制系统的性能指标

1. 典型输入信号

系统的响应与输入信号的形式有关。自动控制系统的实际输入信号往往具有随机性,无法事先知道,也不使用确定的数学表达式表示,这就给系统的设计和研究带来困难。为此,常把实际的输入信号用几种有代表性的函数来表示。系统的响应指的也是在这些典型输入信号下的响应。

常用的典型输入信号有以下几种。

1) 阶跃函数(见图 3.1-17)

阶跃函数的数学表达式为

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

式中, R 为常数。当 $R=1$ 时,为单位阶跃函数,记为 $\epsilon(t)$ 。

突然改变参考输入值,或电动机突加载及突卸载,都可以用阶跃函数表示。

2) 斜坡函数(见图 3.1-18)

斜坡函数的数学表达式为

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

式中, R 为常数。当 $R=1$ 时,为单位斜坡函数。

斜坡函数又叫一次函数,它是阶跃函数对时间的积分,而它的导数就是阶跃函数。斜坡函数信号是伺服系统中常见的输入信号。

3) 脉冲函数

图 3.1-19 所示的矩形脉冲的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{R}{\epsilon} & 0 \leq t \leq \epsilon \\ 0 & t > \epsilon \end{cases}$$

脉冲函数的面积等于 R 。当 $R=1, \epsilon \rightarrow 0$ 时, 就得到单位脉冲函数即 δ 函数。

脉冲函数用于表示幅值特别大、持续时间非常短的信号。

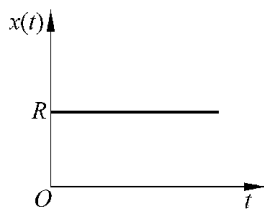


图 3.1-17 阶跃函数

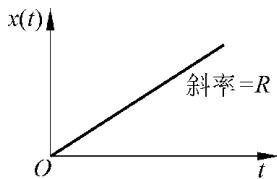


图 3.1-18 斜坡函数

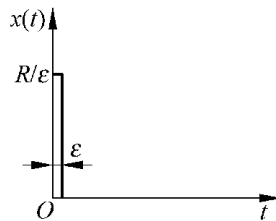


图 3.1-19 脉冲函数

2. 控制系统的性能指标

当自动控制系统的给定量改变或受到各种扰动时, 被控制量就会偏离原来的值而产生偏差。通过系统的自动调节作用, 并经过短暂的过渡过程, 被控制量又恢复到原来的状态, 或按照新的给定量稳定在新的值上, 这时系统就从原来的平衡状态过渡到新的平衡状态。这一过渡过程又称为动态过程或暂态过程, 新的平衡状态称为稳态或静态。自动控制系统的动态品质或稳态性能可以用相应的技术指标来衡量。

1) 系统的稳定性

当给定量发生变化或有扰动时, 输出量将偏离原来的稳定值。这时若系统通过自动调节作用, 其输出量跟随给定量变化, 或又恢复到原来的稳定值, 就说系统是稳定的, 如图 3.1-20(a) 所示; 但若系统的输出量发散, 处于不稳定状态, 如图 3.1-20(b) 所示, 则系统将无法正常工作, 这种系统就称为不稳定系统。可见, 一个自动控制系统首先必须是稳定的, 才能正常工作。

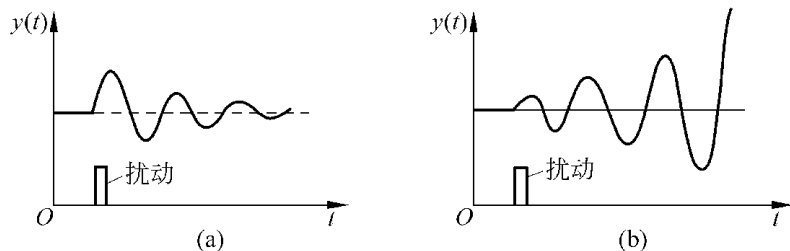


图 3.1-20 稳定与不稳定系统

2) 稳态性能指标

当系统从一个稳态过渡到一个新的稳态, 或系统受到扰动作用又重新平衡后, 系统可能会出现偏差, 这种偏差称为稳态误差 (e_{ss})。控制系统的稳态性能通常用稳态误差来表示, 其大小反映了系统的稳态精度, 也表明了系统控制的准确度。稳态误差越小, 系统的稳态精度就越高。若稳态误差为零, 则系统称为无静差系统, 如图 3.1-21(a) 所示; 若稳态误差不为

零,则系统称为有静差系统,如图 3.1-21(b)所示。

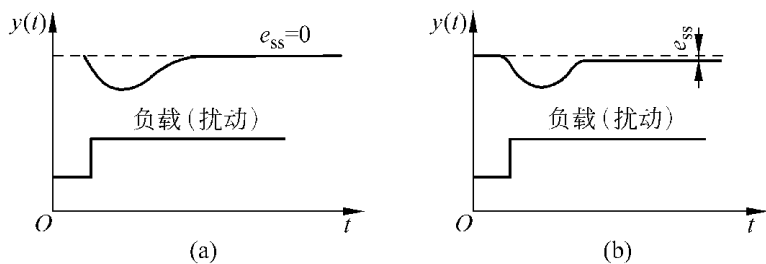


图 3.1-21 有静差与无静差系统

3) 动态性能指标

在自动控制系统中,组成系统的元件、被控对象等通常都有一定的惯性,如机械惯性、电磁惯性、热惯性等,系统中的各种变量(如速度、位移、电压、温度等)一般都不能突变。因此,系统从一个稳态到新的稳态都要经历一段时间,这段时间称为过渡过程。表征这个过渡过程的性能指标称为动态性能指标。对于一般的控制系统,在给定量变化时,输出量的动态变化过程有以下几种情况。

(1) 单调过程。输出量近似按指数规律变化,缓慢达到新的稳态值。这种系统的反应速度较慢,过渡过程较长,如图 3.1-22(a)所示。

(2) 衰减振荡过程。输出量变化较快,经过几次振荡后,达到新的稳态值,如图 3.1-22(b)所示。

(3) 等幅振荡过程。输出量持续振荡,始终达不到新的稳态,如图 3.1-22(c)所示。这种系统是不稳定的。

(4) 发散振荡过程。输出量发散振荡,且振荡越来越严重,如图 3.1-22(d)所示。这是一种严重的不稳定状态,应避免系统出现这种状况。

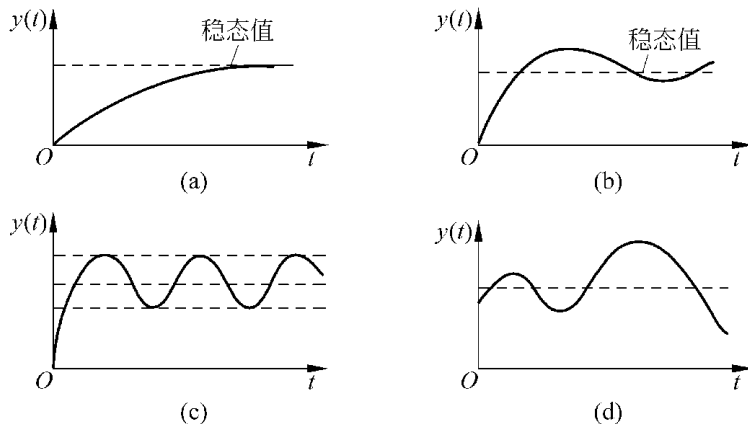


图 3.1-22 自动控制系统的动态过程

系统通过校正后,一般都可以得到图 3.1-22(b)所示的动态过程,这样才能兼顾快速性和稳定性的要求。下面以这种典型响应为例,说明描述系统动态品质的参数。系统的阶跃响应曲线如图 3.1-23 所示。图(a)是衰减振荡的响应曲线,图(b)是单调上升的响应曲线。