第一章　轮机自动化基础知识

轮机自动化，是指用各种自动化仪表及控制元件和逻辑元件包括计算机在内所组成的各种控制和监视系统。它能部分地或绝大部分地代替轮机管理人员，对机舱中的运行参数进行自动控制、监视、显示、记录和报警以及对主要机器设备进行自动操作。自动化水平往往是衡量动力装置技术先进程度的重要标志。管好用好轮机自动化设备对提高动力装置运行的可靠性、安全性和经济性，对降低船舶营运成本、改善轮机管理人员的工作条件及提高船舶技术管理水平都具有十分重要意义。

轮机自动化包括:反馈控制系统、远距离操作(遥控)系统、集中监视与报警系统、自动开关与切换系统及安全保护系统。轮机自动化是从 50 年代发展起来的。以后随着科学技术的发展，轮机自动化水平提高得越来越快。60 年代初出现了只需 1 人在集中控制室值班的船舶;60 年代中期，发展到机舱可无人值班，即轮机管理人员可在 8h、12h、24h，甚至 36h 无需到机舱。进入 70 年代，引入计算机对船舶进行控制与管理。当时有 1 台计算机对全船进行集中控制与管理及用多台计算机进行分散控制与管理两种方案。以后随着微型计算机的发展和广泛的应用,到 70 年代末，不仅全船，就是机舱也采用微型计算机进行分散控制与监视。到 80 年代中期，轮机自动化发展到用微型计算机进行分布式控制的阶段。进入 90 年代，随着'驾机合一'船舶的出现,把轮机自动化又提高到一个崭新的水平,大大提高了其智能化的程度。应当指出,随着科学技术突飞猛进的发展,轮机自动化的更新换代是很快的,我们只有不断学习新的知识，更新管理观念，才能管好、用好自动化水平高的船舶。

第一节　反馈控制系统的基本概念

反馈控制系统的作用是,把机舱中各种运行参数如温度、压力、液位、粘度等控制在所希望的最佳值上。尽管这些参数的种类不同，其控制系统的结构形式也不相同，但是组成这些控制系统的基本单元及其工作过程大致是相同的。

一、反馈控制系统的组成

自动控制过程实际上是直接模拟手动操作过程，图 1-1-1 画出了手动控制和自动控制柴油机气缸冷却水温度的示意图。

柴油机在运行过程中需要保持一个最佳的冷却水温度，比如冷却水进口温度为 70℃。在手动控制时，管理人员要用眼睛观察温度表，并把观察到的冷却水实际温度报告给大脑，大脑对这一水温进行分析(温度的实际值是否偏离了最佳值)、判断(实际水温是高于最佳值还是低于最佳值)和计算(实际水温离开最佳值的数量),然后输出一个控制指令给双手,用双手来改变三通调节阀的开度，从而可改变对气缸冷却水的冷却强度，使冷却水的实际温度逐渐恢复到冷却水温度的最佳值上。在自动控制过程中，由于不需要人来干预控制过程，因此必须采用各种自动化仪表来代替人的感观。比如可用温度传感器和变送器来代替人的眼睛，随时测量冷却水的实际温度并把该值送给调节器。调节器相当人的大脑对冷却水温度进

行分析、判断和计算，然后输出控制信号给执行机构。执行机构相当于人的双手来改变三通调节阀的开度。通过这个实例，我们可以看到，对任何运行参数进行控制所组成的控制系统，必定要由最基本的四个单元组成，这就是：控制对象、测量单元、调节单元、执行机构。

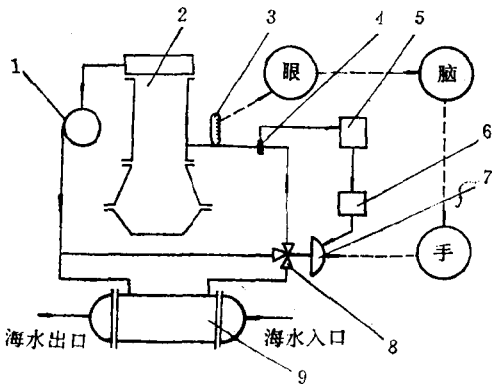


图 1-1-1　柴油机气缸冷却水温度控制过程示意图
1-淡水泵；2-柴油机；3-温度表；
4-感温元件；5-温度变送器；6-调节器；
7-执行机构；8-三通调节阀；9-淡水冷却泵

1. 控制对象　控制对象是指所要控制的机器、设备或装置。把所要控制的运行参数叫做被控制量。例如，在锅炉水位自动控制系统中，锅炉是控制对象，水位是被控量；在锅炉蒸汽压力控制系统中，锅炉是控制对象，蒸汽压力是被控量；在柴油机气缸冷却水温度自动控制系统中，淡水冷却器是控制对象，冷却水温度是被控量；在燃油粘度自动控制系统中，燃油加热器是控制对象，燃油粘度是被控量；在空气压力的自动控制系统中，空气瓶是控制对象，空气压力是被控量；在柴油机转速的控制系统中，柴油机是控制对象，转速是被控量，等等。

2. 测量单元　测量单元的作用是，检测被控量的实际值，并把它转换成标准的统一信号，该信号叫被控量的测量值。在气动控制系统中，对应被控量的满量程，其统一的标准气压信号是 0.02～0.1 MPa；在电动控制系统中，对应被控量的满量程，其统一的标准电流信号是 0～10 mA 或 4～20 mA，现用 4～20 mA 居多。在温度自动控制系统中，测量单元常采用温度传感器和温度变送器；在压力自动控制系统中，测量单元常采用压力传感器和压力变送器；在锅炉水位控制系统中，测量单元常采用水位发讯器(参考水位罐)和差压变送器，等等。

3. 调节单元　调节单元是指具有各种调节作用规律的调节器。把运行参数所希望控制的最佳值叫给定值，用 r 表示；被控量的测量值用 z 表示。把被控量的测量值离开给定值的数量叫偏差值，用 e 表示。显然 $e=r-z$。

$e>0$，说明测量值低于给定值，叫正偏差；

$e<0$，说明测量值大于给定值，叫负偏差；

$e=0$，说明测量值等于给定值，为无偏差。

调节器首先接收测量单元送来的被控量的测量信号，并与被控量的给定值相比较得到偏差信号，再根据偏差信号的大小和方向(正偏差还是负偏差)，依据某种调节作用规律输出一个控制信号。对被控量施加控制作用，直到偏差等于零或接近零为止。在实际应用中，调节单元有位式调节器、比例调节器、比例积分调节器、比例微分调节器、比例积分微分调节器五种，根据控制对象的特性不同及对被控量控制精度的要求，其控制系统可选用不同调节作用规律的调节器。

4. 执行机构　执行机构的输入量是调节单元输出的控制信号，执行机构的输出量是调节阀的开度。调节单元输出的控制信号经执行机构直接改变调节阀的开度，从而可改变流入控制对象物质或能量流量，使之能符合控制对象负荷的要求，被控量会逐渐回到给定值或给

定值附近，系统将会达到一个新的平衡。在气动控制系统中，执行机构一般是气动薄膜调节阀或气动活塞式调节阀；在电动控制系统中，一般采用可逆转伺服电机或三相交流伺服电机。

以上四个单元在组成反馈控制系统中是缺一不可的。但对一个完整的控制系统，一般都设有显示单元，用来指示被控量的给定值和测量值。同时，对气动控制系统来说，应设有气源装置和定值器；对电动控制系统尚需设稳压电源等辅助装置。

二、反馈控制系统传递方框图

为了分析反馈控制系统工作过程方便起见，可把组成反馈控制系统的四个基本单元分别用一个小方框来表示，并用带箭头的信号线来表示各单位之间的信号传递关系。这样就构成了如图 1-1-2所示的反馈控制系统传递方框图。通过传递方框图，要明确以下几个概念。

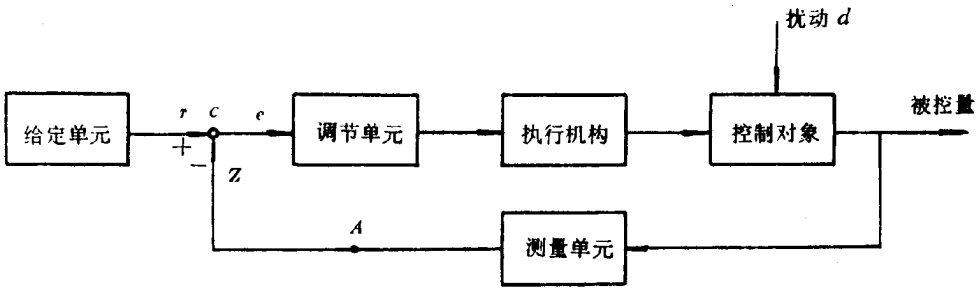


图 1-1-2　反馈控制系统传递方框图

1. 环节　　在传递方框图中，代表实际单元的每个小方框称为一个环节。作为一个环节必须满足两个条件 其一是，必定有输入量和输出量，并用带箭头的信号线来表示。其中箭头指向该环节的信号线为输入量，箭头离开该环节的信号线为输出量，在信号线上可标明输入和输出量的名称，也可以不写。其二是，任何环节输出量的变化均取决于输入量的变化及该环节的特性；而输出量的变化不会直接影响输入量，这就是信号传递的单向性。

2. 扰动　要把控制对象看作一个环节，它的输出量是被控量。引起被控量变化的一切因素统称为扰动或扰动量。显然，扰动量是控制对象的输入量。扰动量可分为两类，一类是轮机人员无法控制的扰动，称为外部扰动。例如，以锅炉为控制对象的水位控制系统，水位是被控量，锅炉负荷(外部用汽量)的变化会引起水位的变化，是扰动量 在柴油机气缸冷却水温度控制系统中，水温是被控量。柴油机负荷的变化，海水温度的变化，淡水冷却器中水管结水垢的多少等都会引起冷却水温度的变化，这些都是扰动量。这些扰动都是管理人员无法控制的，是属于外部扰动。另一类是轮机人员可以控制的扰动，称为基本扰动。例如，在水位控制系统中，给水调节阀开度的改变(会引起水位的变化，是输入量)，在冷却水温度控制系统中，改变三通调节阀的开度(会引起水温的变化，是输入量)，这些扰动是管理人员可以控制的，属于基本扰动。在图 1-1-2 中，有两个信号线的箭头指向控制对象，它们分别是基本扰动(执行机构的输出，即调节阀的开度)和外部扰动(用 d 表示的信号线，即控制对象负荷的变化)。

从控制对象这一环节可以看出，输入信号（包括基本扰动和外部扰动）的改变，会引起输出量（水位、水温等）的改变，而输出量的变化，不会直接影响调节阀的开度和控制对象负荷的改变，这就是信号传递的单向性。

对于基本扰动来说，改变调节阀的开度，会改变流入控制对象物质或能量流量，所谓物

质流量是指，调节阀开度改变后，流入控制对象的物质（水、空气等）流量直接影响被控量的变。例如，水位控制系统，流经给水阀水流量的改变，会影响水位的高低。所谓能量流量是指，调节阀开度改变后，被控量的变化不是取决于物质流量的改变，而是与其中所含能量的多少有关。例如，在燃油粘度控制系统中，燃油粘度的改变不是取决于流经蒸汽调节阀的蒸汽流量，而是蒸汽中所包含的热量。

3. 闭环系统　在反馈控制系统传递方框图中，前一环节的输出就是后一环节的输入。这样，控制系统就形成一个封闭控制回路，称为闭环系统，反馈控制系统必定是闭环系统。如果在某处把回路断开，比如在图 1-1-2 中的 A 处断开，这时系统就由闭环系统变为开环系统。开环系统不再是反馈控制系统，也就不能对被控量进行自动控制。

运行参数自动控制系统，必定是闭环系统。而逻辑控制系统，如主机遥控系统的起动、换向、制动等回路，均为开环系统。

4. 反馈　在控制系统传递方框图中，符号“◯”是比较环节(它不是一个独立环节,而是调节器中的一个组成部分，为清楚起见，单独画出）。它随时对被控量的给定值 r(旁标“+”号）与被控量的测量值 z(旁标“－”号)相比较,得到偏差值 e。e就是调节器的输入量，调节器的输出量经执行机构改变调节阀的开度，即改变流入控制对象的物质或能量流量，目的是控制被控量。而被控量的变化经测量单元又反送到调节器的输入端，这个过程叫反馈。只有反馈才能随时对被控量的给定值和测量值进行比较，只要存在偏差，调节器就会指挥调节阀改变开度，直到测量值回到给定值使偏差 $e=0$ 为止。这时调节器输出不再改变，调节阀的开度正好适应负荷的要求，控制系统达到一个新的平衡状态。可见对运行参数的自动控制必须要有反馈过程，这就是把运行参数的自动控制系统称为反馈控制系统的原因。

在反馈中，有正反馈和负反馈之分。正反馈是指经反馈能加强闭环系统输入效应，即使偏差 e 增大。负反馈是指经反馈能减弱闭环系统输入效应，即使偏差 e 减小。显然,按偏差控制运行参数的控制系统，必定是负反馈控制系统。但是，在自动化仪表中，特别是在调节器中，为实现某种作用规律和功能，常采用复杂的正、负反馈回路。

现在，可用前面介绍的名词和概念，来描述反馈控制系统的工作过程：

系统在初始平衡（受到扰动前，系统稳定运行）状态时，突然受到一个扰动（控制对象受到的扰动，也可以看做是系统受到的扰动），被控量将离开初始稳定值发生变化，测量单元将把被控量的实际值检测下来，并转变成统一的标准信号送至调节器的输入端，调节器随时对被控量的给定值与测量值进行比较，得到偏差值 e，并作为调节器的输入量，调节器依据某种调节作用规律输出一个控制信号，从而改变调节阀的开度，也就是改变流入控制对象的物质或能量流量，从而可以克服扰动，逐渐消除偏差，最终使被控量又回到给定值或给定值附近，系统达到一个新的平衡状态。

三、反馈控制系统的分类

反馈控制系统按其用途、形式和特点有多种分类方法，通常有以下几种分类：

1. 按所用能源分类

反馈控制系统分为气动控制系统和电动控制系统。在气动控制系统中，用压缩空气作为能源，气源压力是 0.14 MPa，各种气动仪表输入和输出信号为标准的气压信号 0.02～0.1 MPa 在电动控制系统中，用电能作为能源，各种电动仪表的输入和输出信号是标准的电流信号 0～10 mA 或 4～20 mA。

2. 按仪表的结构形式分类

按仪表结构形式可分为单元组合仪表和基地式仪表。若组成控制系统的各个单位都分别制成一台独立的仪表，各仪表之间用标准的统一信号联系起来，叫单元组合仪表。若把测量单元、调节单元和显示单元组装成一台仪表。在这台仪表中，虽然仍有测量、显示和调节等功能，但在结构上，它们已是不可分割的整体，因而它们之间也不用标准信号加以联系，这种仪表叫基地式仪表。

3. 按给定值的变化规律分类

按给定值变化规律控制系统可分为定值控制系统、程序控制系统和随动控制系统。在定值控制系统中，给定值是不变的。当系统受到扰动后，被控量的测量值会离开给定值出现偏差，控制系统的作用是逐渐消除偏差，使被控量最终回到原来的给定值上或给定值附近。机舱中大多数运行参数的自动控制系统均属于定值控制系统。一般在调节器上都有一个给定值调整旋钮，可以对给定值进行人工整定。当旋钮的位置固定以后，控制系统的给定值就不再改变。例如，在燃油粘度控制系统中，若把给定值设定在 80s(最佳喷射粘度)上,控制系统的任务就是在系统受到扰动后，最终要把燃油粘度控制在 80s 上。

在程序控制和随动控制系统中，给定值是变化的。控制系统的作用是，使被控量始终跟踪给定值，随给定值而变化。两者的区别在于，程序控制系统给定值的变化是按人们事先安排好的规律进行变化，一般给定值是一个时间的函数，如柴油机在高负荷区加速的转速控制。随动控制系统给定值是某个参数的函数，这个参数的变化是任意的，不可能按事先安排好的规律来描述。如在自动舵中，控制船舶航向的改变就属于随动控制系统。这里需注意的是，在自动舵中，既有随动控制又有定值控制，船舶的航向是可以任意改变的，设定一个航向就是改变航向的给定值，这是随动控制系统；当设定航向不变时，即给定值不变，这是定值控制系统。

四、反馈控制系统的动态过程

1. 动态过程特点

一个控制系统在运行过程中，若输出量（被控量）不随时间变化而是稳定在给定值上或给定值附近，系统的这种状态叫稳态。稳态是暂时的、相对的，因为系统经常会受到扰动，系统的平衡状态（稳态）就会遭到破坏。系统受到扰动后，由于控制对象有惯性，被控量不能突变。因此在受到扰动的短时间内，偏差不大，这样调节器输出的控制信号及经调节阀流入控制对象的物质或能量流量的改变量都不大，它不足以克服扰动，使偏差越来越大。随着偏差的增大，调节器输出的控制信号及由它所指挥的调节阀开度变化量都增大，克服扰动能力增强。控制系统在实际运行中，调节阀开度的变化量往往会过头，使被控量在向给定值恢复过程中，会出现反向偏差，即被控量会绕给定值产生波动。以后在调节器控制作用下，波动越来越小，最终被控量会稳定在新稳态值（给定值或给定值附近），系统达到一个新的平衡。

系统从受到扰动开始到被控量稳定在新稳态值，系统达到新的平衡状态的过程，也就是被控量随时间的变化规律，称为动态过程，也叫过渡过程。动态过程的特点是一个衰减振荡过程。

2. 评定控制系统动态过程品质的指标

控制系统之所以会出现动态过程,是因为对系统施加了输入(扰动)信号。其扰动形式是

随机的，很难用一个数学表达式来精确地描述它，但可以归纳为四种扰动形式，这就是：阶跃形式、线性形式、脉冲形式、正弦形式。其中阶跃扰动是最严重的扰动，控制系统能把阶跃扰动控制住，对其它扰动形式也就容易控制了。因此，在这里我们只取阶跃的输入形式来研究控制系统的动态过程。所谓阶跃扰动是取扰动的突变形式，即在 t＝0 时刻（在施加扰动瞬间），扰动量突变一个值，以后这个值保持不变。如果这个突变值是一个单位，就称为单位阶跃扰动。阶跃扰动是基本符合实际的扰动形式。

为评定控制系统动态过程品质，要在阶跃扰动(输入)下，画出系统输出量(被控量)随时间的变化曲线。为说明问题方便起见，我们总是把控制系统的初始平衡状态定为坐标的零点。

控制系统接受的扰动有两种情况，一种是外部扰动不变，改变给定值。这时在调节器控制作用下，被控量将绕新的给定值振荡，最终稳定在新的给定值或给定值附近。另一种情况是给定值不变，改变外部扰动（定值控制），在调节器控制作用下，被控量将绕原给定值振荡且最终稳定下来。由于调节器控制作用的强弱不同，以及仪表调校不当或参数不匹配，会使控制系统的动态过程出现各种形式。图 1-1-3 和图 1-1-4 分别画出了给定值不变而改变外部扰动和外部扰动不变而改变给定值的动态过程曲线。图中曲线 1 是等幅振荡，曲线 2 是发散振荡。控制系统这两种动态过程，被控量是不能稳定在新稳态值上的，称为不稳定系统。一个控制系统绝对不允许是一个不稳定系统。造成不稳定的动态过程原因，除仪表调校或参数匹配不当之外，主要是调节器控制作用太强。曲线 3 表示控制系统的动态过程最稳定，被控量没有波动地逐渐达到新稳态值。但是，它的动态精度和稳态精度都很低，且被控量达到新稳态值所需时间很长，这是不可取的，造成这种现象的主要原因是调节器控制作用太弱。符合要求的动态过程是衰减振荡，如曲线 4所示。当然不是所有衰减振荡都符合要求，为保证动态过程有一个良好的品质，可用一些指标来衡量它，在改变外部扰动和改变给定值两种情况下，其评定动态过程品质指标有些相同，有些不同。

对于定值控制系统来说，评定动态过程品质指标包括最大动态偏差 e_{max}、衰减率 φ 过渡过程时间 t_s、振荡次数 N 及静态偏差 ε 等(见图 1-1-3 曲线 4)。

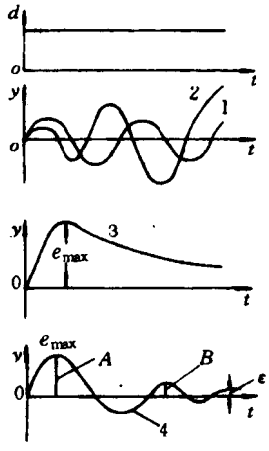


图 1-1-3 改变外部扰动控制系统的动态过程

最大动态偏差 e_{max} 是指在衰减振荡中第一个波峰的峰值，它是动态精度指标。e_{max} 大，说明动态精度低，要求 e_{max} 小些好。但不是越小越好，因为 e_{max} 大小与调节器比例作用强弱有关，比例作用越强，e_{max} 越小。比例作用太强，虽然 e_{max} 很小，但动态过程的振荡会加剧。

衰减率 φ，是指在衰减振荡中，第一个波峰值 $A = e_{max}$，减去第二个同相波峰值 B 除以第一个波峰值 A，即：

$$\varphi = \frac{A - B}{A}$$

φ 是衡量系统稳定性的指标，要求 $\varphi = 0.75 \sim 0.9$。当 $\varphi = 0.75$ 时，A 是 B 的 4 倍，称为衰减比为 4∶1。φ 不能小于 0.75，否则系统动态过程的振荡倾向增加，降低了系统稳定性，过渡过程时间也因振荡不息而加长。特别是当 $\varphi = 0$ 时，其动态过程是等幅振荡，系统变成不稳定系统，这

是不允许的。φ也不能太大，否则 e_{max} 会增大，过渡过程时间 t_s 也会拖得很长，当 $\varphi=1$ 时，其动态过程没有振荡，成为非周期过程。这时 e_{max} 很大，t_s 拖得很长，这是不可取的。

过渡过程时间 t_s，是指从控制系统受到扰动开始到被控量重新稳定下来所需的时间。理论上讲，这个时间是无穷大，这是没有意义的。因此，我们这样来定义过渡过程时间 t_s 当 $t \geqslant t_s$ 时，满足：

$$\frac{|y(t)-y(\infty)|}{|y(\infty)|} \leqslant \Delta$$

式中，$y(t)$ 是系统受到扰动后，在时间为 t 时的被控量值；$y(\infty)$ 是被控量的最终稳态值；Δ 是选定的任意小的值，一般取 $\Delta=0.02$，或 $\Delta=0.05$。上式的物理意义是，当 $t \geqslant t_s$ 的所有时间内，被控量 $y(t)$ 的波动值 $|y(t)-y(\infty)|$ 均小于或等于最终稳态 $y(\infty)$ 的 2% 或 5%，t_s 就是过渡过程时间。

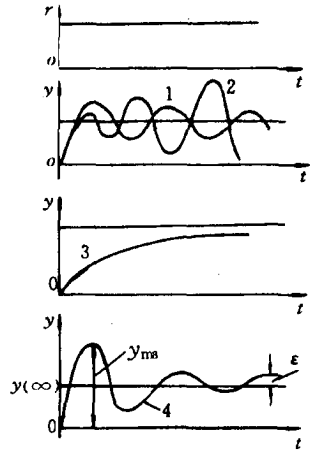


图 1-1-4　改变给定值控制系统的动态过程

振荡次数，是指在衰减振荡过程中，被控量的振荡次数。一般要求被控量振荡 2 ～ 3 次就应稳定下来。

静态偏差 ε，是指动态过程结束后，被控量新稳态值与给定值之间的差值。ε 越小说明控制系统的静态精度越高。在实际控制系统中，由于所使用不同作用规律调节器，其存在静态偏差的情况也不相同。有的控制系统受到扰动后，在调节器控制作用下，被控量最终不能稳定在给定值上，只能稳定在给定值附近，存在一个数值较小的静态偏差，这是有差调节。有的控制系统受到扰动后，在调节器的控制作用下，被控量能最终稳定在给定值上，$\varepsilon=0$，这是无差调节。

在外部扰动不变而改变给定值的控制系统中，评定动态过程品质的一些指标，如过渡过程时间 t_s、振荡次数 N，静态偏差 ε 等与定值控制系统是一样的。只是评定稳定性指标不用衰减率，而是用超调量 σ_p 同时增加了反映控制系统响应速度的两个指标：上升时间、峰值时间（见图 1-1-4 曲线 4）。

上升时间 t_r，是指在衰减振荡中，被控量从初始平衡状态第一次达到新稳态值 $y(\infty)$ 所需时间。

峰值时间 t_p，是指在衰减振荡中，被控量从初始平衡状态达到第一个波峰峰值所需要的时间 t_p。t_r 和 t_p 都是反映动态过程进行快慢的指标。t_r、t_p 越小，说明系统惯性越小，动态过程进行得越快。

超调量 σ_p，是指在衰减振荡中，第一个波峰值 y_{max} 减去新稳态值 $y(\infty)$ 与新稳态值之比的百分数，即：

$$\sigma_p=\frac{|y_{max}-y(\infty)|}{|y(\infty)|}\times 100\%$$

超调量是评定控制系统稳定性的指标。超调量越小，控制系统动态过程波动越小，稳定性越好。但若 σ_p 太小，甚至 $\sigma_p=0$ 时，被控量无波动地逐渐靠近给定值，成为非周期过程，系统稳定性虽然最好，但 t_s 拖得太长，这是不可取的。若 σ_p 太大，控制系统动态过程的振荡明显加剧，使系统稳定性变差。由于振荡不息，t_s 也必定拖得很长。在实际过程中，要求 $\sigma_p<20\%$。

第二节　控制对象的特性

在机舱中，控制对象种类是很多的，如柴油机、锅炉、加热器、冷却器、空气瓶、水柜、油柜等。这些控制对象的结构复杂程度不同，工作过程所遵循的物理学定律不同，因而它们的工作原理也各不相同。但是，从影响被控量变化的基本因素来看，各种控制对象又有共同之处，这就是，所有的控制对象都有储存物质或能量的能力，且当控制系统受到扰动后，会伴随有物质或能量流入或（和）流出；物质或能量在流动过程中会受到阻力；物质或能量在流动过程中或信号在传递过程中，会存在着时间上的迟延。由于控制对象有这些共同特点，可能使内部物理过程完全不同的控制对象，受到相同形式的扰动后，其被控量的变化规律是相同的。这就能使我们从简单、直观、容易理解的控制对象入手，分析其动态和静态特性，所得结论具有普遍意义。

一、单容控制对象的动态特性

所谓单容控制对象是指只有一个储存物质或能量容积的控制对象。在机舱中，凡是水柜、油柜以及以水位为被控量的锅炉都属于单容控制对象。所谓控制对象的动态特性，是指控制对象受到扰动后，被控量随时间的变化规律。显然，被控量的变化量是控制对象的输出量；扰动量（基本扰动和外部扰动）是控制对象的输入量。

图 1-2-1 画出了一个简单的水柜，它只有一个储存水的容器，是单容控制对象最简单的例子。水位是被控量(输出量)，给水阀 A 开度的变化是基本扰动，出水阀 B 开度的变化是外部扰动。

1. 容量系数

水柜储存水的容积 $V = F \cdot h$ 叫容量，式中，F 是水柜的底面积，h 是被控量，也就是水位的高度。显然，容量是随被控量变化的，它不能准确表示出流入和流出控制对象的水流量的变化量对水位的影响。为此要引入容量系数 C 这个概念。

容量系数 C 是指，被控量变化一个单位其容量的变化量，也就是 C 等于容量的变化量 $\mathrm{d}v$ 与水位变化量 $\mathrm{d}h$ 的比值，即：

$$C = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}h} = \frac{\mathrm{d}(F \cdot h)}{\mathrm{d}h} = F \cdot \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}h} = F$$

可见，单容水柜的容量系数就等于水柜的底面积。水柜底面积越大，也就是容量系数越大，为使水位升高一个单位，就要求流入控制对象更多的水量。

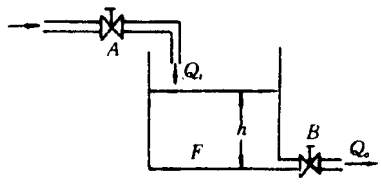


图 1-2-1　单容水柜控制对象

现假定保持给水阀 A 和出水阀 B 的开度不变，且给水流量 Q_i 与出水流量 Q_o 相等 $Q_i = Q_o$，水位 h 保持不变，这就是控制对象的初始平衡状态，并把这个初始平衡状态定为坐标零点。现对水柜施加一个阶跃的基本扰动，即保持出水阀 B 开度不变，突然开大给水阀 A，Q_i 就会阶跃增加，因 $Q_i > Q_o$，水位 h 就会升高，容量 V 就会增大，而容量的变化速度（单位时间容量的变化量）为：

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = Q_i - Q_o = \frac{\mathrm{d}(F \cdot h)}{\mathrm{d}t} = F \cdot \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}$$

或 $$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{C}(Q_i - Q_o)$$

该式说明，在扰动($Q_i - Q_o$)相同的情况下，容量系数越大，被控量变化越慢（变化速度 $d\mathrm{h}/\mathrm{d}t$ 小），我们就说控制对象惯性越大。反之，C 越小，在相同扰动下，被控量变化越快，控制对象惯性也就越小。

2. 阻力系数

如果保持出水阀 B 开度不变，突然开大给水阀 A，由于存在流量差 Q_i Q_o，水位 h 会升高。由于水位 h 升高，它对水柜底部的静压头增大。则在出水阀 B 开度不变的情况下，出水流量 Q_o 会增加，使流量差 Q_i Q_o 逐渐减少，水位 h 上升会越来越慢。当出水流量增加到 Q_i $Q_o = 0$ 时，水位不再上升而达到一个新的平衡状态。可见，水经出水阀 B 流动是会受到阻力的，用 R 表示阀 B 的阻力系数。若水经阀 B 是作层流运动，那么：

$$Q_o = \frac{h}{R}$$

式中，出水流量 Q_o、阻力系数 R 和水位 h 之间是线性关系。如果水流经阀 B 是紊流，则阻力系数不再是常数，Q_o 与 h 之间不是线性关系。这样要通过线性化把 R 变成为常数，其方法从略。

3. 单容控制对象的阶跃响应

控制对象在初始平衡状态下，把给水阀 A 突然开大 $\Delta\mu$（阶跃变化），若阀 A 的流量系数为 K_μ，则流入水柜的给水流量 Q_i 也会阶跃增大，且 $Q_i = K_\mu \cdot \Delta\mu$。这时水位 h 会升高，随之出水流量 Q_o 也会逐渐增大。把前面给出的水位变化速度表达式中的 Q_i 用 $K_\mu \cdot \Delta\mu$ 代入，Q_o 用 h/R 代入，则有：

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{C}(K_\mu \cdot \Delta\mu - \frac{h}{R} \text{ 或 } CR\frac{dh}{dt}) = K_\mu \cdot R \cdot \Delta\mu - h$$

令 $T = CR; K = K_\mu R$ 。把上式略加整理得：

$$T\frac{dh}{dt} + h = K \cdot \Delta\mu$$

式中，把 T 称为控制对象的时间常数，K 称为控制对象的放大系数。

任何单容控制对象，都具有与上式相同的数学表达式，即为线性一阶非齐次微分方程。只不过不同的控制对象，其输入与输出量不同。在单容水柜中，给水阀 A 开度的变化量 $\Delta\mu$ 是输入量，水位 h 是输出量。为了求出在阶跃扰动下，被控量随时间的变化规律，必须求解前面所导出的微分方程，求解的结果是(求解步骤从略)：

$$h(t) = K \cdot \Delta\mu(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

可见，单容控制对象的阶跃响应是按指数规律变化的，被控量不能突变。图 1-2-2 画出了单容控制对象阶跃响应的指数曲线。我们常把控制对象的阶跃响应曲线称为飞升曲线。

4. 放大系数 K

放大系数 K，是指控制对象受到阶跃扰动后，被控量从初始平衡状态达到新稳态值的变化量，把扰动量所放大的倍数。在对控制对象施加扰动的瞬间 $t = 0$ 时：

$$h(t)/_{t=0} = K \cdot \Delta\mu(1 - e^{-\frac{0}{T}})$$

因 $e^0 = 1$，故 $h(t)/_{t=0} = 0$。即水位没有变化。以后随着时间 t 的增长，$e^{-\frac{t}{T}}$ 不断减小，$h(t)$ 就会不断增大。当 $t \to \infty$ 时，被控量达到一个新的稳态值不再变化。这时，$e^{-\infty} = 0$。故；

$$h(\infty) = K \cdot \Delta\mu(1 - e^{-\infty}) = K \cdot \Delta\mu$$

可见，控制对象达到新的平衡状态时，被控量水位 h 的变化量，把扰动量 $\Delta\mu$ 放大了 K 倍。实际上，放大系数 K 是控制对象的静态参数，是反映控制对象对扰动的敏感程度的，K 大，控制对象受到相同阶跃扰动后，被控量要变化一个很大范围才能稳定下来，说明控制对象对扰动敏感。若 K 很小，控制对象对扰动很不敏感，即对它施加很大扰动，被控量变化一个很小的值就会稳定下来。但是，船上所有的控制对象放大系数 K 都比较大，因此，都必须组成一个控制系统，使其受到扰动后达到新稳态时，被控量的变化量尽量小，或不变化。

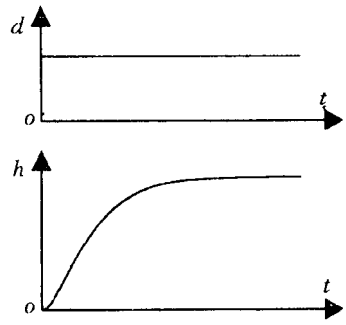


图 1 2 2　单容水柜阶响应的飞升曲线

5．时间常数 T

在对控制对象施加扰动的瞬间 $(t=0)$，被控量的变化量等于零。但是，由于此时流量差 (Q_i-Q_o) 最大，所以被控量的变化速度 $\mathrm{d}h/\mathrm{d}t$ 最大。以后随着水位的升高，Q_o 增大，使流量差 (Q_i-Q_o) 越来越小，被控量变化速度也越来越小。可见，被控量的变化总是落后于扰动的变化，这就是控制对象的惯性，在相同扰动下，若被控量变化快（$\mathrm{d}h/\mathrm{d}t$ 大），则飞升曲线陡，被控量达到新稳态值所需时间短。我们就说控制对象惯性小。反之，在相同扰动下，被控量变化慢（$\mathrm{d}h/\mathrm{d}t$ 小），则飞升曲线平坦，被控量达到新稳态值所需时间长，我们就说控制对象惯性大。时间常数 T 就是反映控制对象惯性大小的一个重要的动态参数。

求时间常数 T 有两种方法。其一是根据在 $t=0$ 时刻，被控量变化最快，即 $\dfrac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}/t=0$ 最大。

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}\Big/_{t=0}=\frac{\mathrm{d}[K\cdot\Delta\mu(1-e^{-\frac{t}{T}})}{dt}=K\cdot\Delta\mu\,\frac{1}{T}e^{-\frac{t}{T}}\Big/_{t=0}=\frac{K\cdot\Delta\mu}{T}$$

可见，在 $t=0$ 时，水位的最大变化速度为 $K\cdot\Delta\mu/T$。实际上它就是过坐标零点作飞升曲线切线的斜率。我们把这条切线让它交于被控量新稳态值上。如图 1-2-3 所示。图中 AB 就是被控量的新稳态值 $K\cdot\Delta\mu$。其切线斜率就是被控量的最大变化速度，故：

$$\frac{AB}{OB}=\frac{K\cdot\Delta\mu}{T}$$

因 $AB=K\cdot\Delta\mu$，则 $OB=T$。可见，时间常数的物理意义是，从对控制对象施加阶跃扰动的瞬间开始，被控量以最大的变化速度变化到新稳态值所需时间就是时间常数 T。T 大，控制对象的惯性大，其飞升曲线比较平坦，如图 1-2-3 中的虚线所表示的飞升曲线。

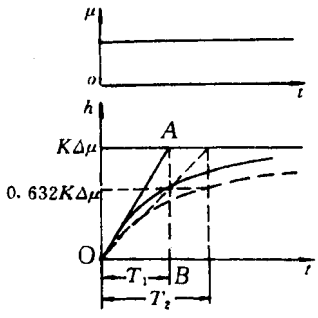


图 1-2-3　确定单容控制对象时间常数的方法

另一种求时间常数的方法是，看当 $t=T$ 时，被控量变化了多少。当 $t=T$ 时：

$$h(T)=K\cdot\Delta\mu(1-e^{-1})=K\cdot\Delta\mu(1-0.368)=0.632K\cdot\Delta\mu$$

这样就可得到对时间常数 T 的另一种物理意义的描述：控制对象受到阶跃扰动后，被控量变化到新稳态值的 63.2%，所需要的时间就是时间常数 T。用这种求时间常数 T 的方法，也能

明显的看出，T 大，控制对象的惯性大。

理论上讲，只有当 $t \to \infty$ 时，被控量才能达到新稳态值。实际上 $t = 2T$ 时，$h(2T) = 0.86K \cdot \Delta\mu$；$t = 3T$ 时，$h(3T) = 0.95K \cdot \Delta\mu$；$t = 4T$ 时，$h(4T) = 0.982K \cdot \Delta\mu$。这时就可以认为被控量的变化基本结束。所以，控制对象受到阶跃扰动后，被控量变化到新稳态所需时间 $t = 4T$。

6. 纯迟延 τ_0

控制对象迟延包括纯迟延和容积迟延。容积迟延将在多容控制对象中讲述。迟延是控制对象重要的动态特性参数，对控制系统的动态过程品质具有重大影响。

纯迟延 τ_0，又叫传输迟延。由于执行机构（调节阀、挡板等，如图 1-2-1 给水阀 A）距控制对象有一定的距离，物质或能量经执行机构流到控制对象需要一定的时间 τ_0，就把 τ_0 称为控制对象的纯迟延。图 1-2-4 画出了控制对象具有纯迟延的飞升曲线。

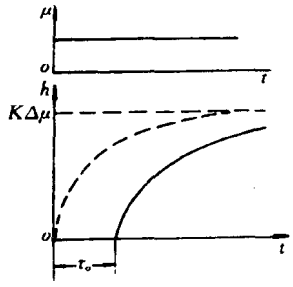


图 1-2-4 具有纯迟延的单容控制对象的飞升曲线

控制对象存在迟延（包括纯迟延和容积迟延）对控制系统的工作是很不利的。因为控制对象受到扰动后，被控量将离开给定值出现偏差，调节器根据偏差的大小和方向输出控制信号来改变调节阀的开度，也就是要改变流入控制对象的物质或能量流量，从而可以克服扰动，逐渐消除偏差。但由于控制对象存在迟延，在迟延时间内，调节器无法对被控量加以控制，使偏差越来越大。迟延时间一过，调节器指挥调节阀开度会大大过头，造成控制系统动态过程振荡倾向倾显增大，降低了系统的稳定性。迟延时间越长，这种影响越甚。迟延是不可能消除的，我们只能在控制系统的布置上尽量减少迟延。

7. 阻力系数和容量系数对控制对象特性的影响

从上面分析可知，影响控制对象特性的参数是 K、T、τ_0。其中 K 是表征控制对象静态特性的参数，而 T 和 τ_0 则是控制对象动态特性参数。$K = K_\mu \cdot R$；$T = C \cdot R$。若其它条件相同，只改变容量系数，那么时间常数 T，即控制对象的惯性要改变，但 K 值不变，即被控量达到新稳态值不变。若只改变阻力系数 R，则 T 和 K 都要发生变化。

假如有两个单容水柜，底面积分别为 F_1 和 F_2，且 $F_2 > F_1$。若两个水柜初始条件相同，即 $Q_{i1} = Q_{i2}$，$Q_{01} = Q_{02}$（$R_1 = R_2$），$h_1 = h_2$。对两个水柜施加的阶跃扰动量相同，即 $\Delta\mu_1 = \Delta\mu_2$，这时，$T_1 = F_1 \cdot R_1$，$T_2 = F_2 \cdot R_2$，故 $T_2 > T_1$。显然底面积为 F_2 水柜的惯性要比底面积为 F_1 水柜的大，过零所做曲线的斜率小，飞升曲线较平坦，如图 1-2-5(a) 所示。但是，由于 $K_1 = K_2$（$K_1 = K_\mu \cdot R_1$，$K_2 = K_\mu \cdot R_2$），则被控量达到新稳值是相等的，即 $K_1 \cdot \Delta\mu_1 = K_2 \cdot \Delta\mu_2$。

假如有两个底面积相同（$F_1 = F_2$）的单容水柜，且初始条件相同。若给水阀开度不变，在 $t = 0$ 时间突然关小两个水柜的出水阀，增大阻力系，且 $R_1 > R_2$。这时，$K_1 = K_\mu \cdot R_1$，$K_2 = K_\mu \cdot R_2$，显然 $K_1 > K_2$。那么，阻力系数大的控制对象比阻力系数小的控制对象被控量达到新稳态值变化量大，如图 1-2-5(b) 所示。又因 $T_1 = F_1 R_1$，$T_2 = F_2 R_2$，则 $T_1 > T_2$，故阻力系数大的控制对象其惯性也大。但是，从 $t = 0$ 时刻，被控量最大变化速度表达式可以看出

$$\left.\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}\right|_{t=0} = \frac{K \cdot \Delta\mu}{T} = \frac{K_\mu \cdot R \cdot \Delta\mu}{CR} = \frac{K_\mu \Delta\mu}{C}$$

即最大变化速度与阻力系数 R 无关。在扰动相同的情况下，仅与容量系数 C 有关。由于两个

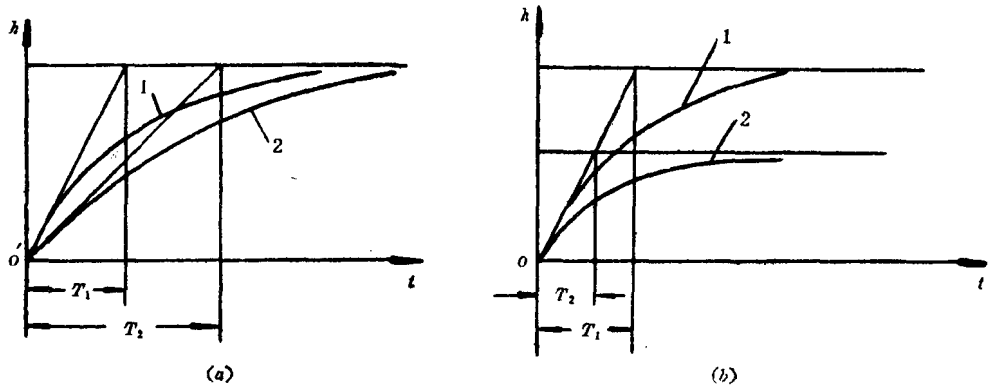


图 1-2-5　阻力系数和容量系数对控制对象特性的影响

水柜的容量系数相同，它们的最大变化速度也必然相同，即过两个控制对象阶跃响应曲线的零点，做切线的斜率是相同的。但是，由于两个控制对象被控量变化到新稳态值不同，所以两个控制对象的时间常数 T 不同。于是可得出结论，控制对象在不同负荷下，它的动态特性是不一样的。

二、多容控制对象的动态特性

多容控制对象是指具有两个或两个以上储蓄容积的控制对象。在机舱中，多数控制对象是属于多容控制对象。我们可把多容控制对象看成是若干单容控制对象按不同方式组合而成的。因此，分析单容控制对象的方法也适用于多容控制对象。只是多容控制对象增加了储蓄容积及阻力因素，其被控量的变化规律与单容控制对象不同。

图 1-2-6 画出了由两个水柜所组成的多容控制对象。其中，h_2 是被控量，改变出水阀 B 的开度是外部扰动，改变给水阀 A 的开度是基本扰动。在初始平衡状态下，$Q_i = Q_1 = Q_0$，两个水柜的水位分别稳定在 h_1 和 h_2 上。这时突然开大给水阀 A，以底面积为 F_1 的水柜就是单容水柜，h_1 按指数曲线规律变化。在 $t = 0$ 时刻，$h_1(0) = 0$，但水位变化速度 dh_1/dt 是最大的。对以底面积为 F_2 的水柜来说，在 $t = 0$ 时刻，由于 $h_1(0) = 0$，Q_1 没有变，$(Q_1 - Q_0) = 0$，故对以 F_2 为底面积的水柜来说，在 $t = 0$ 时刻，h_2 不仅绝对值没有变化，其变化速度 $\frac{dh_2}{dt}\Big/_{t=0} = 0$。以后随着 h_1 的升高，Q_1 逐渐增大，h_2 才开始变化，Q_0 也随之增大。由于 $(Q_1 - Q_2)$ 值不断增大，h_2 的变化速度也越来越大，而 h_1 的变化速度越来越小。当时间 t 进行到某一时刻时 $(Q_1 - Q_0)$ 达到最大值，h_2 的变化速度最大，以后由于 $(Q_1 - Q_0)$ 不断减小，h_2 的变化速度越来越小。最后当 h_1 和 h_2 上升到使 $Q_i = Q_1 = Q_0$ 时，控制对象达到新的平衡，h_2 就会稳定在新的稳态值上。可见，多容控制对象受到阶跃扰动后，其动态过程特点是，被控量的变化由慢到快，再由快到慢，最后稳定在新的稳态值上，其阶跃响应的飞升曲线如图 1-2-7 所示，它不再是指数曲线，而是一条‘S’形曲线。图中 A 点是变化速度最大的一点，叫曲线的拐点，过拐点做曲线的切线，这样就可得到三个物理意义各不相同的时间。

τ_0 是纯迟延，是从扰动开始到物质或能量流量达到控制对象所需时间。

τ_c 叫容积迟延，容积迟延，是指物质或能量流量达到控制对象起始到被控量开始变化这段时间。单容控制对象不存在容积迟延，只有纯迟延。多容控制对象除存在纯迟延外，还存在

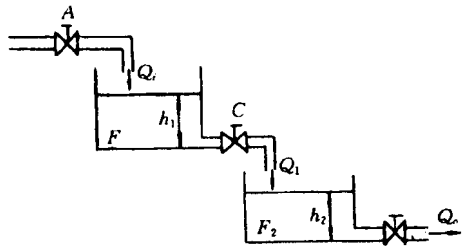


图 1-2-6　由两个单容水柜组成的多容控制对象

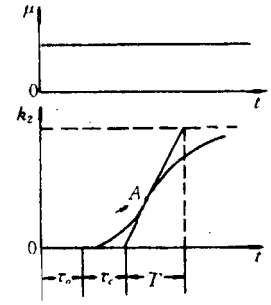


图 1-2-7　多容控制对象的飞升曲线

容积迟延，且储蓄容积越多，容积迟延 τ_C 越大。我们往往把纯迟延 τ_0 和容积迟延 τ_C 加在一起称为迟延 τ，故 $\tau = \tau_0 + \tau_C$。前面介绍过，控制对象存在迟延 τ 对控制系统工作是不利的，τ 越大，系统对被控量的控制越困难。

T 是多容控制对象的时间常数，与单容控制对象一样，它是反映控制对象惯性大小的参数。

关于多容控制对象的放大系数 K 与单容控制对象的物理意义完全相同，不再多述。总之，任何控制对象的特性，都可用 K、T、τ 三个参数来描述 放大系数 K 反映了控制对象对扰动的敏感程度；时间常数反映了控制对象惯性的大小；迟延反映了被控量变化的延迟时间，只要掌握这三个参数的物理意义，就基本掌握了控制对象的特性。

三、控制对象的自平衡能力

控制对象分为有自平衡能力和无自平衡能力的控制对象。图 1-2-1 和图 1-2-6 所画出的单容和多容控制对象都是有自平衡能力的。这样的控制对象受到扰动后，不必加以控制，被控量能最终稳定下来。换言之，凡被控量变化能影响物质或能量流入和（或）流出控制对象的，都有自平衡能力。机舱中，大多数控制对象是有自平衡能力的。有自平衡能力的控制对象还有一个自平衡能力大小的问题。自平衡能力的大小，可用自平衡率 ρ 来表示。自平衡率，是指被控量变化一个单位，其需要扰动量的变化量。如果外部扰动不变(出水阀开度不变)，改变基本扰动(给水阀阶跃开大 $\Delta\mu$)，则 ρ 为：

$$\rho = \frac{\Delta\mu}{h(\infty) - h(0)} = \frac{\Delta\mu}{K \cdot \Delta\mu} = \frac{1}{K}$$

式中，$h(\infty)$ 是被控量的最终稳态值；$h(0)$ 是 $t = 0$ 时刻水位变化量，显然 $h(0) = 0$，故 $h(\infty) - h(0)$ 就是控制对象受到扰动后，被控量达到新稳态值的变化量。可见，ρ 是与 K 成倒数关系。ρ 大，即放大系数 K 小，控制对象受到相同的扰动，被控量变化较小的范围就能稳定下来，我们说该控制对象自平衡能力强。反之，ρ 小，控制对象的自平衡能力弱。ρ 与 K 一样，均是反映控制对象静态特性的参数。

控制对象惯性大小，还可用反应速度 ε 来表示。反应速度 ε，是指控制对象受到阶跃扰动后，被控量的最大变化速度与扰动量之比，对单容控制对象来说，ε 为：

$$\varepsilon = \frac{(\frac{dh}{dt})_{max}}{\Delta\mu} = \frac{\frac{K \cdot \Delta\mu}{T}}{\Delta\mu} = \frac{K}{T}$$

可见,反应速度 ε 与时间常数 T 成反比,即 ε 大,T 就小,控制对象的惯性就小。反之,ε 小,T 就大，控制对象的惯性就大。

对有自平衡能力的控制对象，既可用 K、T、τ;也可以用 ρ、ε、τ 来描述控制对象的特性。

有些控制对象是没有自平衡能力的，当控制对象受到扰动后，被控量是不会自行稳定下来的，如图 1-2-8 所示。其中泵浦打出水的流量 Q_0 是恒定的，当控制对象受到一个基本阶跃扰动后，其流量差($Q_i - Q_0$) 一直存在，h就会一直变化而不能稳定下来。凡是被控量变化不影响物质或能量流量流入和（或）流出控制对象的都是没有自平衡能力的。没有自平衡能力的控制对象，其 $\rho = 0$。在机舱中，以水位为被控量的锅炉是没有自平衡能力的。锅炉是由给水泵供水的，水位的变化既不会影响流出的蒸汽流量，也不会直接影响给水泵的工作。

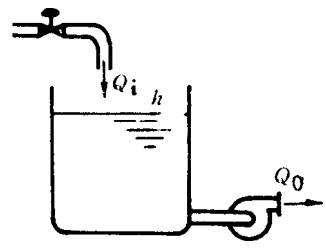


图 1-2-8　无自平衡能力的单容水柜

在有自平衡能力的控制对象中，控制对象受到扰动后，被控量虽然能自行稳定下来，但被控量的变化范围很大，这在实际工作中是不允许的。因此，对有自平衡能力的控制对象，也需组成一个控制系统，对其进行控制，使被控量能最终稳定在给定值上或给定值附近。不要有大的变化。

第三节　　调节器的作用规律

调节器是组成反馈控制系统的主要单元。当控制对象选定后，由于描述控制对象特性参数的 K、T、τ 均不能改变，因此调节器就对控制系统的动态过程品质起着决定性的影响。调节器的输入是被控量的偏差值 e,调节器的输出是调节阀的开度 P,也就是执行机构的位置。调节器的作用规律是指，给调节器施加一个输入信号后，其输出量是按何种方式变化。也就是调节器的输出量 P 与输入量 e 之间保持怎样的函数关系，即 $P = f(e)$。现广泛应用的调节器的作用规律有：双位式作用规律、比例作用规律、比例积分作用规律、比例微分作用规律、比例积分微分作用规律等五种。

一、位式作用规律

位式作用规律的特点是，调节器只有两个输出状态，它不能使被控量稳定在某个值上。当被控量下降到下限值时，调节器的输出接通电机电源使电机转动，或令电磁阀通电使阀门全开。当被控量达到上限值时，调节器动作使电机断电停转，或电磁阀断电阀门全关。当被控量在上、下限之间变化时，调节器输出状态不变。

1. 辅锅炉浮子式水位双位控制系统

图 1-3-1 画出了采用浮子式对锅炉水位进行双位控制的原理图。在锅炉外面的浮子室有汽管和水管分别与锅炉的汽空间和水空间相通，故浮子室内水位与锅炉水位一致。浮子与水位同步变化，浮子杆绕枢轴 4 转动,通过上、下锁钉 5 带动调节板 3 转动，调节板右边磁铁也跟着转动，当水位达到上限值时，浮子杆与上面的销钉相接触，并带动调节扳及永久磁铁 12 绕枢轴 4 顺时针转动，使磁铁 12 转至与它同极性的永久磁铁 6 在同一直线上时，由于同极性互相排斥，永久磁铁 6 立即被向上弹开,动触头 11 立即与静触头 7 断开,切断电机电源,给

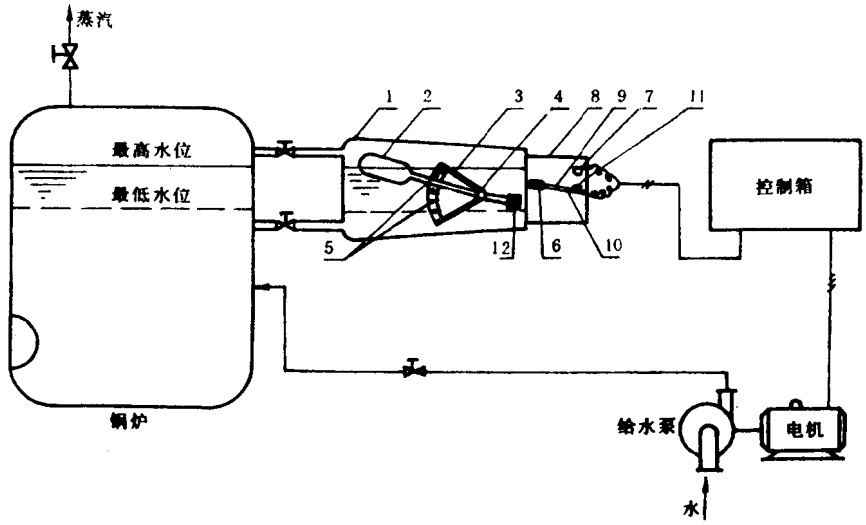


图 1-3-1　浮子式水位双位调节器

1-浮子室；2-浮子；3-调节扳框架 4-枢轴；5-上、下限销钉；6、12-同极性永久磁铁；7-静触点；8-开关箱；9-转轴；10-转杆；11-动触点

水泵停转，停止向锅炉供水。由于外界负荷不断消耗蒸汽，水位会不断降低，浮子连同浮子杆绕枢轴 4 逆时针转动，但调节板暂时不动。当水位下降到接近下限水位时，浮子杆与下面的销钉相碰，并带动调节板一起转动。当水位下降到下限值时，两同板性的永久磁铁 12 和 6 正好相遇并互相排斥，动触头 11 立即与静触头 7 相接触，接通电机电源，并带动给水泵向锅炉供水。随着水位的上升，浮子连同浮子杆绕枢轴 4 顺时针转动，调节扳暂时不动，只有水位接近上限水位时，浮子杆才与上面的销钉相碰，并带动调节扳转动，当水位上升到上限值时，两同极性的永久磁铁又相遇，动触点 11 又与静触点断开，切断电机电源，停止给水泵向锅炉供水。可见，只有水位处在上、下限值时，调节器输出状态才改变，水位在上、下限之间变化时，调节器输出状态不变，例如水位从上限值下降时，电机保持断电，水位从下限值上升时，电机保持通电。

在调节板上对应浮子杆上、下各有三个销钉孔，调整上、下销钉 5 的位置，可调整水位的上、下限值，若把上、下销钉之间的距离调整得很小，此时水位波动范围较小，但电机起停频繁，这是不利的。

2. YT-1226 型压力调节器

YT-1226 型压力调节器也叫压力开关，属于位式作用规律，可用于辅锅炉蒸汽压力的双位控制。图 1-3-2 画出了 YT-1226 型压力调节器的结构原理图。在比较杠杆 9 上，对支点 8 作用三个力矩并互相平衡。它们是，由测量波纹管 11 产生的测量力矩；由给定弹簧 16 产生的给定力矩，由幅差弹簧 13 产生的幅差力矩。当输入信号 P_{λ} 达到压力下限值时，比较杠杆 9 处于水平位置。这时动触点 2 离开静触点 1 而紧压在静触点 3 上。同时，螺钉 15 离开幅差弹簧盘一段距离，幅差弹簧对杠杆 9 不起作用，当 P_{λ} 增大时，杠杆 9 绕支点 8 逆时针转动，通过拨臂使舌簧 5 的下边框左移，跳簧 4 被压缩，贮存弹性能。同时，螺钉 15 逐渐与幅差弹簧盘接

触,杠杆 9 再转动时,不仅要克服给定力矩,还要克服幅差力矩。当杠杆 9 转过 α 角,即 P_λ 达到压力上限值时,舌簧 5 的下边框正好与跳簧 4 在同一平面,跳簧 4 有了释放所贮存弹性能的机会，迅速把舌簧 5 弹开,使动触点 2 离开触点 3 而与触点 1 闭合。当 P_λ 降低时，杠杆 9 绕支点 8 顺时针转动，只有杠杆 9 转到水平位置，舌簧 5 下边框又转过 α 角,与跳簧 4 处于同一平面，跳簧再次把舌簧弹开，使动触点 2 离开触点 1 而与触点 3 闭合。P_λ 在上、下值之间变化时，跳簧保持原状态不变，也就是调节器输出状态不变。

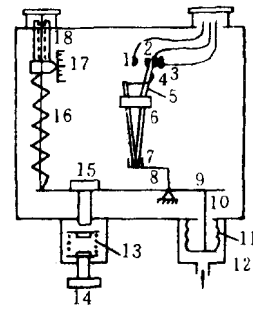


图 1-3-2 YT-1226 型压力调节器结构原理图

1、3- 静触点；2- 动触点；4- 跳簧；5- 舌簧片；6- 跳簧支点；7- 拨臂；8- 支点；9- 比较杠杆；10- 顶杆；11- 波纹管；12- 测量室；13- 幅差弹簧；14- 幅差调整螺钉；15- 作用螺钉；16- 给定弹簧；17- 给定值指示器；18- 给定值调整螺钉

调整给定弹簧的预紧力，可调整触点动作的下限压力值，用 P_X 表示,其值大小由指示器 17 来指示。调整螺钉 14 可调整幅差弹簧的预紧力。即可调整触点动作的压力上限值，用 P_Z 表示。$\Delta P = P_Z - P_X$ 称为幅差。输入压力信号 P_λ 的下限值是通过人工扭动螺钉 18 来调整的,要确定压力的上限值,只需求出幅差即可。螺钉 14 有一红色标记，在它旁边的圆柱面上有 0 ～ 10 档刻度。红色标记对准 0 档,其 $\Delta P = 0.07$MPa；红色标记对准 10 档,其 $\Delta P = 0.25$MPa。红色标记对准不同档时,其 ΔP 的计算公式为：

$$\Delta P = P_Z - P_X = 0.07 + (0.25 - 0.07) \times \frac{X}{10}$$

式中,X 是设定的档数，各数值的单位均为 MPa。这样,在压力的上限值、压力的下限值及所设定的档数 X 这三个变量中，知道任意中的两个，就可以求出第三个。

二、比例作用规律(P)

比例作用规律是指调节器的输出量 P（调节阀开度的变化量）与输入量 e(被控量的偏差值）成比例变化，其输出与输入之间的函数关系是 $P(t) = K \cdot e(t)$。其中,K 是比例调节器的放大倍数。K 大,在输入相同偏差 $e(t)$ 信号时,调节器输出量 $P(t)$ 大，也就是调节器指挥调节阀开度的变化量大，我们就说它的比例作用强。反之，K 小，其比例作用弱。用比例作用规律制成的调节器，称为比例调节器。

1. 比例作用的控制过程

图 1-3-3 示出了一个水柜水位按比例作用规律进行自动控制的一个最简单的例子。它虽然不能直接用于实际的控制系统，但它所揭示的比例作用规律和特点却具有普遍意义。

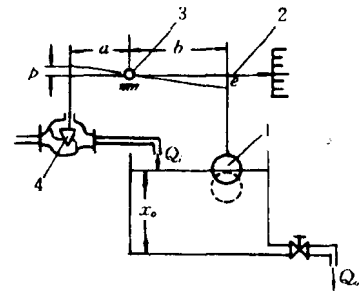


图 1-3-3 浮子式水位比例控制系统

1- 浮子；2- 杠杆；3- 可调支点；4- 调节阀阀芯

在图 1-3-3 中,水柜中的实际水位 X 是被控量,其给定值是 X_0。给水阀开度是 P。在初始平衡状态下,给水流量 Q_i 与出水流量 Q_0 相等,水位稳定在 X_0 上,偏差 $e = 0$。在初始平衡状态，水柜的出水流量 Q_0 应是额定负荷,其调节阀开度 P 应是全开的一半左右。这样,不论负荷怎样变化，调节阀开度都有变化的余地，都能对给水流量加以

控制。如果在初始平衡状态下,突然开大出水阀,出水流量阶跃增大(增大水柜的负荷)。由于给水流量 Q_i 暂时未变，水位会连同浮子和浮子杆一起下移，杠杆 2 绕支点 3 顺时针转动,开大给水调节阀，增加对水柜的给水流量 Q_i,直到 $Q_i = Q_0$ 为止，水位才会稳定在比给定水位 X_0 略低的值上。相反，若突然关小出水阀，出水流量阶跃减少（降低水柜负荷），水位连同浮子和浮子杆一起上移，通过杠杆作用使调节阀关小，减少给水流量 Q_i,直到 $Q_i = Q_0$ 为止,水位又会稳定在比给定值 X_0 略高的值上。当对水柜施加扰动（出水阀开度变化）后，水位的实际值（浮子的位置）X 偏离给定水位 X_0 的数值就是偏差值 e。从图上可见,P 与 e 的关系是：

$$P(t) = \frac{a}{b} \cdot e(t) = K \cdot e(t)$$

式中，$K = a/b$,是比例调节器放大倍数。改变杠杆长度比 a/b,可改变 K 值。左移可调支点 3，a 减小,b 增大,则 K 减小。反之,右移可调支点 3,a 增大,b 减小,则 K 增大。K 是衡量比例作用强弱的参数。K 若大，系统出现一个较小的偏差 $e(t)$,调节器(本例中是杠杆 2) 就能使调节阀开度 $P(t)$ 有一个较大的变化，给水流量的变化量也比较大，克服扰动的能力强，其比例作用强,K 若小，被控量出现较大偏差 $e(t)$ 时，调节器指挥调节阀开度变化不大，克服扰动的能力弱，我们就说比例作用弱。

比例作用规律的优点是，调节阀的开度能较及时地反映控制对象负荷的大小。负荷变化大,偏差 $e(t)$ 就大,调节阀开度会成比例变化,对被控量控制比较及时。正因为如此,比例作用的调节器应用比较广泛,它也是其它作用规律(位式作用除外)的基础。但是,比例作用规律存在的缺点也是明显的。当控制对象受到扰动后，在比例调节器的控制作用下，被控量不能完全回到给定值上来，只能恢复到给定值附近。被控量的稳态值与给定值之间必定存在一个较小的静态偏差，这是比例作用存在的固有的、不可克服的缺点。为什么比例作用会存在静态偏差呢？这是因为调节阀开度是与偏差成硬性的一一对应关系。参看图 1-3-3,在初始平衡状态(水位稳定在 X_0 上)下,如果对水柜施加一个阶跃的扰动,例如突然开大出水阀,出水流量 Q_0 会阶跃增大,水位逐渐降低,在杠杆(调节器)的作用下,使给水阀的开度逐渐增大，其给水流量 Q_i 也会逐渐增大，这就限制了水位的降低并使水位逐渐向给定值恢复（这与没有配控制系统的单容水柜受到外部扰动后，水位的变化规律是不同的。因为没有配控制系统的水柜,在受到外部扰动后 Q_i 是不变的)。但是,被控量不可能完全回到 X_0,只能比 X_0 低一点，才能使调节阀的开度比原来大一点。这样才能保证给水流量的增大，以适应水柜受到扰动后 Q_0 的增加,使 $Q_i = Q_0$,系统达到新的平衡 相反,若在初始平衡状态下,突然关小出水阀,出水流量 Q_0 会阶跃减少。$Q_i > Q_0$,水位会上升,在杠杆(调节器)作用下,调节阀要关小,使 Q_i 减小,水位逐渐向给定值 X_0 恢复。当 $Q_i = Q_0$ 时,水位将稳定在新稳态值上,该值必定比 X_0 略高一点，只有这样调节阀开度会略小一点，使给水流量 Q_i 的减小适应负荷减小的要求。由上述可见，比例作用的结果，被控量达到新稳态值必定与给定值之间存在一个静态偏差值。实际上，比例控制系统正是靠静态偏差来适应不同负荷的要求。显然比例作用放大倍数 K 越大(比例作用越强),稳态时,有一个较小的静态偏差,调节阀就会有一个较大的开度变化以适用负荷的要求，因此,K 越大，稳态时静态偏差越小。

比例控制系统虽然存在静态偏差，但这个偏差值是不大的，与有自平衡能力的控制对象受到扰动后，被控量自行稳定在新稳态值上的变化量相比较要小得多，动态过程进行也要快得多。因此，对被控量稳态精度要求不是很高控制系统中，采用结构比较简单的比例调节器