第一章　基本概念

§1　自动调节的性质与任务

船舶动力装置由种类繁多的机械设备所组成。它为船舶提供的能量有动能、电能和热能。象其它生产过程一样，任何一种动力设备都是被用来把物质和能量由一种形式变换成另一种形式。动力装置在物质或能量的转换过程中，除了要保证自身体系所需的物质或能量的数量、质量外，还要保证整个系统的经济性和可靠性的要求，这正象生命持续的过程中，除了保证整体必需的热量之外，还要保证机体的最佳状态，并具有抗病毒的功能一样。在内燃动力装置中作为主机的内燃机就是把含于燃料中的能量通过燃烧膨胀作功变成动能，带动螺旋桨旋转变成推动船舶航行所必需的动力——推力。如果带动的是发电机，则产生电力，即电能。在蒸汽动力装置中，内燃机被蒸汽锅炉代替，由水蒸汽产生的热能通过汽轮机转变为机械能和电能，即实现了能量的转换。在蒸汽动力装置中，具有水的某种形式的蒸汽如果在冷凝器中，就能凝结成水的颗粒形式。亦即实现了物质由一种形式转变为另一种形式。

任何一种过程都能用不同方式加以表达和说明，动力工程问题的表达习惯是采用参数这一概念，并且还分成数量工作参数和质量工作参数两大类。对于象动力装置这样的工作过程，数量工作参数是指物质经过设备时的消耗量。例如：燃油耗量、锅炉给水量、蒸汽量、主机产生的推力、发电机的电功率等等。同样，质量工作参数是指过程进行中能量所处的工作状态。例如：蒸汽压力、蒸汽温度、水柜中的水位、内燃机中空气过量系数、转速、粘度等等。由于数量参数在整个工作过程中会随外界情况而变化的，所以我们习惯上又称为“外负荷”。在内燃动力装置中，外负荷的变化意味着燃油耗量这一数量参数的变化，当外负荷增大时，内燃机必须增加燃油耗量以发出大功率来适应这种增加，当然这是相对的，是针对某一台装置而言的。在外负荷变化范围内，作为一个系统的动力装置提供质量参数的保证是指表征系统工作状态的参数要控制在它的给定值的范围之内，而这种给定值便是影响系统性能的质量参数值。例如：内燃机装置中，由于外负荷的增大，使耗油量增大，放热量增加，主机本身的冷却水温度提高了，表示温度的质量参数发生了变化，但主机要求的冷却水温度有一个给定值，这时要使主机和各耗能部件都能可靠而经济地工作，就必须保证质量参数应限在给定值范围之内。

控制质量参数的变化可以满足各种工况的要求，为此要对动力装置进行必要的操作。表征生产设备正常运行的物理量称为质量参数，使它保持在规定值而进行的必要操作，我们称之为调节。动力装置有大量的系统参数是需要进行控制和调节的。动力装置的特点不同，决定采用的系统参数类型也不相同。例如：有主机的运行参数、辅锅炉的热工参数；各种压力、液位参数；燃油的粘度参数等等，使得整个动力装置的调节系统庞大而复杂。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

早期陆地上的动力装置，如热电厂中的热工参数是用人工来调节的。随着发电机组容量的不断增大，参数不断提高，人工调节的热工参数变得愈来愈不可靠，并且使有些过程不可能实现人工调节，故又发展了自动调节，借助仪表仪器代替人的操作。自动调节技术的产生和发展，使船舶动力装置的自动调节得以实现和发展。

我们可以通过设备的人工调节来理解自动调节的任务和目的。图 1-1所示为炉膛负压的人工调节。所谓炉膛负压是指锅炉炉膛中由于燃烧而产生的压力。它的调节过程是这样实现的：首先炉膛负压通过负压指示仪反映到人的眼里，再由人的头脑进行比较判断，然后用手去操作风门。在这种手动调节中，维持工作参数给定值的准确程度，亦即设备的工作可靠性和经济性完全取决于管理人员的技术熟练程度和反应灵敏程度。在这种情况下，人要用一定的体力来完成对工作过程连续监视和控制的作用，这样，人就成了调节回路中的“组成环节”如图 1-2所示。因此，当工作过程尤其是快速进行的工作过程用手动调节时，使人在精神上和体力上会感到高度的紧张和难以胜任。如果有一种装置能把调节回路闭封起来，使它能连续地测量参数对给定值的任何偏移，并与此偏移成一定规律地来按需要的方向改变能量的供给，那么就可实现设备工作过程的自动调节。这就是自动调节的任务。它像人工调节一样，是在设备的所有可能的情况下，以给定的准确度来保持工作过程的质量参数。

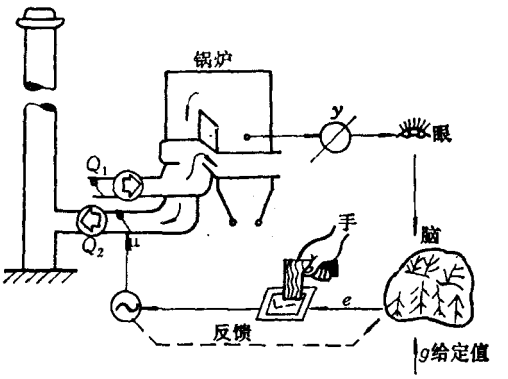


图1-1　锅炉负压的人工调节示意图

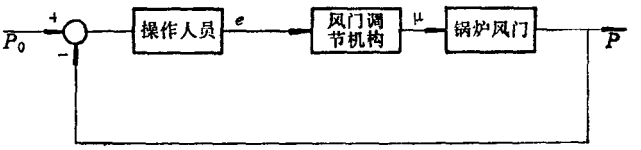


图 1-2　锅炉负压的人工调节回路图

显然，自动调节的采用，使上述人的作用完全由自动工作的装置来完成，因而使工作过程进行的准确性以及自动调节的机器工作的可靠性和经济性不决定于人的主观因素。从而把人从工作过程的控制工作中全部地或部分地解脱出来，这也是自动化技术的主要任务。在整个工业技术革命中，自动调节技术的不断发展和完善，为现代自动化理论打下了基础，并且发展成了一个独立的技术分支—— 自动控制学。船舶自动化经历了这样一个历程：由热工参数的自动调节，逐步发展到今天的无人机舱，实现全船的自动化控制。自动调节是最经常起作用的一种自动控制职能，它对运行过程的正常进行有很大的影响。所以，有些文献上就把自动调节称为自动控制。从自动调节的理论和船舶动力装置中自动调节技术的应用来看，自动化技术的关键是自动调节技术，自动调节技术包括调节器技术、调节系统的整定调试技术。这些技术的理论基础是自动调节原理，我们下一节中的内容就是学习简单调节原理，掌握一些常用的理论和定义，对各种类型的调节系统有一个初步的认识。

§2 自动调节的定义和分类

根据自动调节的目的和任务，我们可以给自动调节下这样的定义：在设备运行过程中，为了保持质量参数恒定或在某一给定范围内变动，采用一套自动化装置来代替运行人员的操作过程称为自动调节。在实际调节过程中，我们常用调节术语来表达调节过程．常见的有六种：

（1）调节对象：被调节的动力设备或运行需要调节的系统称为调节对象。例如，我们进行柴油机冷却水温度控制或调节时，调节对象就是柴油机冷却系统。

（2）被调量：表征设备运行过程是否符合规定工况的物理量，也就是调节所要维持为规定数值的这些物理状态（如温度、压力、流量等等）称为被调量或被调参数。

（3）给定值：希望被调量应该具有的数值称为给定值或目标值。在很多情况下，给定值是不变的。如柴油机冷却水温在正常情况下是一个给定值或给定范围，这种给定值是考虑了冷却效果和冷却状态而得到的。但有些情况下给定值是变化的。如汽轮机启动过程中，转速给定值是不断改变的。

（4）扰动：生产过程或运行过程中引起被调量偏离其给定值的各种原因称为扰动。在柴油机冷却系统中引起被调量水温偏离其给定值的原因之一就是外负荷的变化，所以这时的外负荷就是该系统的扰动量。

（5）调节量：由调节作用来改变或去控制被调量变化（使被调量恢复为给定值）的物理量称为调节量。在冷却水温调节系统中就是旁通阀开口和冷却阀开口的比值。

（6）调节机构：接受调节作用去改变调节量的具体设备称为调节机构。

在介绍了术语后，以后的叙述就可以用术语来表达了。显然，调节就是抵消扰动的影响，使被调量回复到给定值。在前一节中讲的人工调节我们可以这样来认识：在膛炉负压调节系统中，调节对象是锅炉，被调量是负压，通过负压仪表指示值供运行人员监视，在监视的同时，运行人员在头脑里把被调量的指示值与给定值进行比较，根据偏差的大小、方向和变化作出是否进行调节和如何进行调节的判断。以判断的结果为依据，运行人员进行必要的操作，直至流入量和流出量重新平衡使被调量恢复到给定值为止。在操作中，不仅要根据判断的结果来决定操作的快慢，而且要运用反馈原理即根据执行机构移动后的预期效果恰当地变更调节的快慢，使调节机构的位移不至于过量而引起多次反复的振荡，但也不会使操作过量不足，以致拖长调节的时间。

如果我们使用一套自动调节装置来代替操作人员的调节作用，那么运行过程就不需要操作人员直接参与调节过程而有自动调节装置自动地执行调节任务。如图 1-3 是采用了自动调节装置的炉膛负压自动调节系统框图。与前面的人工调节回路图相比较可知：操作人员的功能和作用被定值单元、测量单元、调节单元、执行单元所取代。这不仅可大大减轻操作人员的劳动强度，而且还能避免人为因素的影响而提高了调节精度。

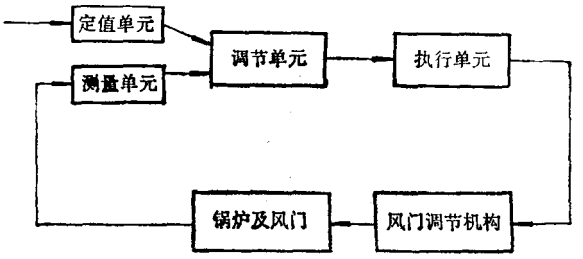


图1-3 炉膛负压自动调节系统图

图 1-3 所示的自动调节系统的工作原理与人工调节是相同的，只是用了一些设备，它们主要有以下四个单元组成：

测量单元；定值单元；调节单元；执行器。它们所完成的功能分为下列几部分：

（1）测量变送：测量被调量的大小，即变化量。由变送器把被调量的大小及变化趋势变成不同的信号种类，如电压或电流信号，气压或液压信号，或者其它物理量信号送至调节器。

（2）定值：定值单元的作用是人为设定给定值 g （给定值的信号种类要和变送器送来的信号种类相同）作为被调量的标准值，用来与被调量的变化量进行比较。

（3）比较：把被调量与给定值进行比较，发出一偏差信号（正或负），一般情况下，还有反馈或其它的辅助信号也在这里进行综合比较。

（4）调节：把偏差信号按预定规律进行运算，然后发出调节信号。

（5）放大：把调节信号放大到足以推动执行机构动作的程度。

（6）反馈：调节作用的信号通过反馈元件变成反馈信号，反馈到放大元件以前的比较元件上，去抵消被调量的偏差值，即负反馈；或去增加偏差值，即正反馈。它的实质是当被调量尚未调节而开始变化以前，反馈信号就预先反映了调节效果，从而能起到一定的积极作用。

（7）执行：按照放大后的调节信号通过执行机构去移动调节机构。

所以当被调量偏离给定值后，自动调节设备就能自动担负起上述功能，直至被调量等于给定值时为止。当然，不能认为自动调节设备一经安装，就能顺利地执行调节任务。为了使自动调节系统能满意地工作，必须研究调节系统的运动规律。这是在以下章节中我们要讨论的主要内容。

我们在讨论调节系统的运动规律之前，首先必须了解产生调节系统运动的原因。在自动调节系统中外界干扰或扰动，就是产生调节运动的根本原因。动力装置中的能量转换、形式转变受到了外界干扰或扰动的影响后，原先的稳定状态被破坏，在自动调节机构的作用下使不平衡的状态得到恢复。这方面的知识在第一节中已学过一些概念了。在船舶动力装置的各种系统中，影响系统正常工作的干扰是很多的，而且各具形式。例如：主机冷却水系统中影响平衡的干扰主要有三方面：主机的负荷、阀口的开度、冷却器的温差变化；辅锅炉系统中影响平衡的干扰主要有蒸汽输出量、水位、汽压等。这些干扰的作用使得系统的被调参数发生变化，要从根本上抵消掉这种变化首先就要从扰动开始。

在扰动理论中，我们把扰动分成外扰和内扰两种形式。象上述的负荷变化，它是系统外部产生的并对系统被调参数发生影响，因此我们称为外扰。象锅炉蒸汽压力调节系统中的给水温度和炉膛受热面的传热条件等等，都是偶然出现在系统内部的并对系统被调参数发生影响的，我们称为内扰。相比之下，外扰的影响比内扰为大。我们在讨论系统运动规律的时候，通常是给系统施加任意一种形式的输入作用（如扰动作用）然后去求出系统输出的过渡过程曲线（运动规律）。这样做是比较复杂的，也没有必要，所以我们往往是用具有典型意义的系统的输入作用，来分析这种作用或扰动在系统中的运动规律，使其具有普遍的实用价值。在选择这种典型扰动中，通常具有共同性的几种形式并可以用数学式表达的有下列四种：

（1）单位阶跃函数 $I(t)$。单位阶跃函数的定义为：

$$I(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ 1 & t>0\end{cases}$$

对于幅值为 A的阶跃函数可表示为：

$$f(t)=A\cdot I(t)$$

（2）单位斜坡函数 $f(t)$。单位斜坡函数的定义为：

$$f(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ t & t\geqslant 0\end{cases}$$

表示从 $t=0$ 时刻开始，$f(t)$ 随时间的推移，以速度为 1 恒速变化，对于速度为 R 的斜坡函数可表示为：

$$f(t)=Rt$$

（3）单位脉冲函数 $f(t)$。定义：

$$f(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ \infty & t=0\end{cases}$$

单位脉冲可以看成图示的面积为 1 的矩形脉动函数，当宽度 $\tau\to 0$ 时的极限

$$f(t)=\lim_{\tau\to 0}\frac{1}{\tau}[1(t)-1(t-\tau)]$$

显然，$f(t)$ 函数的面积为 1，即把脉冲面积为 1 的理想短脉冲称为单位脉冲函数。

（4）单位正弦函数定义为：

$$f(t)\begin{cases}0 & t<0\\ \sin(\omega t+\varphi) & t\geqslant 0\end{cases}$$

上述这四种典型输入可用图 1-4 表示。从扰动的角度来看，阶跃函数所代表的阶跃扰动是系统遇到的最厉害的扰动。因为它的作用发生在瞬时，而且幅值达到最大，倘若系统在阶跃的扰动下能令人满意地工作，则在其它缓慢地扰动下必然更能满足实际工作的要求。同时，在实际工作中，这种阶跃扰动也是经常出现的。阶跃扰动除了作用强烈之外，还具有易于实现、便于分析、实验和计算的特点，所以在自动调节理论中，我们常用阶跃扰动作为系统的于扰，所讨论的运动规律及各种特性都是针对阶跃干扰后产生的运动过程来进行的。

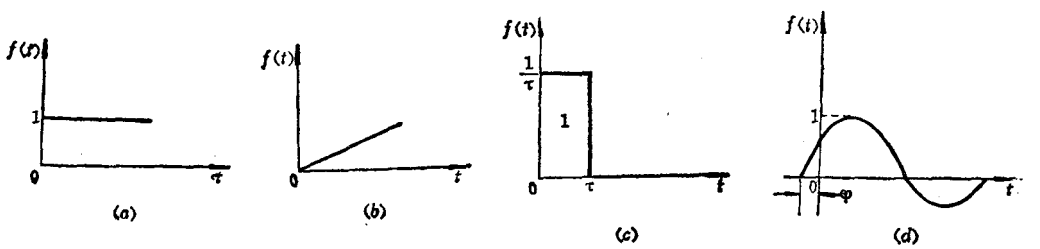


图 1-4　典型扰动形式

（a）单位阶跃函数；（b）单位斜坡函数；（c）单位脉冲函数；（d）单位正弦函数。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

同样道理，自动调节系统在实际调节过程中，根据不同的要求也有各种不同的形式。我们可以大致分成下列几个类型：

1．按被调量的稳态值是否受影响分类

有无差调节系统和有差调节系统。前者是指稳态下的被调量在各种负荷下都保持为初始给定值。后者是指稳态下的被调量在各种工况下与给定值有一偏差，而且不同工况对应着不同的偏差，这种偏差决定了系统的调节不均匀度的大小，对系统的性质有较大的影响。

2．按保持被调量的给定值来分类

有定值调节系统、程序调节系统和随动调节系统。

定值系统通常是指以给定的准确度，在调节对象的所有可能工况下保持被调量的值不变或基本不变。例如，蒸汽锅炉水位自动调节系统。这种系统的特点是它的主扰动作用（输入量）是调节对象的外负荷，此时用来调整被调量给定值的设备处在恒定的作用之下。

程序调节系统是指被调量（输出量）是按预先给定的程序来变化的。这类系统与给定系统有结构上的区别，程序自动系统有一辅助装置用以给出被调量变化的必要程序。如船用辅锅炉燃烧中，向喷油器供给的空气量的改变应按燃料量的变化来进行，因此，喷油器前的空气压力自动调节器是根据燃料量的程序来控制的。程序系统受到扰动作用一是来自程序发送装置，另一是来自外负荷的变化。

随动系统是指被调量（输出量）按相应的比例重复着供给到给定装置的量随时间而发生变化。它与程序系统的差别仅仅在于前者是没有一定程序的变化，而后者是按预先给定的程序变化。它的结构是使被调量连续同给定值相比较其差值（误差）就是主冲量即输入信号，以此来作用于调节机构，使差值趋于零。船用自动舵是典型的随动调节系统。

3．按调节系统的结构分类

有开环调节系统、闭环调节系统和复合调节系统。

开环调节系统是指系统的输出量对系统的调节作用没有影响的系统，如图 1-5所示。这系统中没有闭合的信号传递回路，亦即没有用被调量的变化信号作为反馈信号，调节器只按给定值的变化信号 g，通过执行机构对调节对象进行调节，被调量 y 随给定值 g 而改变，这是一个开环的随动系统。有时它还可以按主要的扰动作用（负荷变化）自动改变给定值，按预定的比例使调节作用 μ 能够抵消扰动 x 对调节对象的直接影响，从而被调量 y 能够保持合理的数值，故这种系统还具有自动补偿的调节功能。这种系统对调节结果是不能自动检查是否符合所期望的数值，也无法予以纠正。所以开环系统只适用于被调量没有严格要求的场合。

闭环系统是指系统的输出量对调节作用有直接的影响，我们也称之为反馈调节系统，如图 1-6。这种调节系统的特点是利用输出量与给定值的偏差来进行调节，使系统的输出量趋于所希望的数值，闭环的含义是反馈，用反馈作用来减小偏差，从系统框图中可看出被调量变化信号以反馈方式送到调节器的输入端，与给定值信号 g 进行比较而产生偏差信号。这个偏差信号即作为调节的依据，只要被调量不等于给定值，调节作用就一直进行下去，直到偏差值减小到允许范围之内。闭环系统的缺点是当调节系统受到扰动

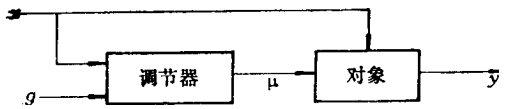


图 1-5　开环调节系统框图

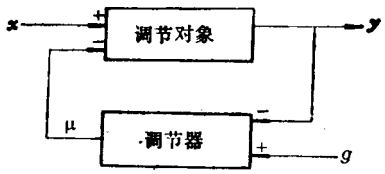


图1-6　闭环调节系统方框图

作用时，不能立即动作，只有在被调量与给定值出现偏差后，才开始调节，这样对于那些有延迟性即反应慢的调节对象来说，被调量出现的动态偏差较大。

复合调节系统是指开环调节和闭环调节相互配合使用的调节系统，如图 1-7所示。当外界干扰量 x作用到调节系统而被调量还没有作出反应时，系统按开环调节进行粗调 μ_1，调节量 μ_1 一开始就抵消扰动 x 的大部分影响，使被调量 y 不会发生变化或变化很小。如果 μ_1不能起到完全补偿的作用，被调量 y还存在一些偏差，还可以通过闭环回路进行细调 μ_2，因此这种调节系统对于特定的扰动来说，获得的调节效果比一般闭环调节系统要好得多。

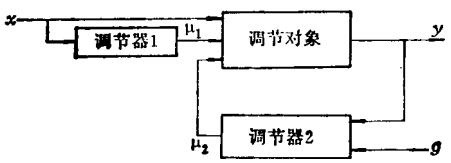


图 1-7　复合调节系统方框图

4．按被调量数目分类

有单参数调节系统和多参数调节系统。

单参数调节系统是指调节系统中只有一个被调量和一个调节器的调节系统。调节器的任务只是为了保持被调量等于给定值。一般动力装置中的调节系统都是单参数的调节系统。

多参数调节系统是指调节系统中有多个被调量和多个调节器的调节系统。根据实际运行工况的要求，这些被调量之间必须保持一定的关系，或是通过共同的调节对象相互起着影响而不能各自独立地进行调节，当需要调节其中任何一个被调量时，各个调节器必须协调动作，以防止其它被调量受到不利的影响。火电厂的直流式锅炉单元机组的负荷调节系统就是这种系统。

5．按调节系统的动态特性分类

有线性调节系统和非线性调节系统。

线性调节系统是指系统的动态特性可以用线性微分方程来描述，动态特性中各个参数是恒定的，或者在系统工作条件下可以近似看作是恒定的，线性调节系统的一个重要性质是在几个扰动同时作用于系统时，其总效果等于每个扰动单独作用时的效果之和，这就是线性调节系统的叠加原理。

非线性调节系统是指其动态特性参数中至少有一个不能保持恒定，随着系统的被调量的变化而变化的调节系统。这种调节系统的动态特性只能用非线性微分方程来描述，非线性系统就不能用叠加原理。

非线性因素在一般的调节对象和调节设备中都含有，如：不同负荷下对象特性的偏移、调节器的不灵敏区，执行机构的惰走等，在分析调节系统时，处理的办法有三种：一种是影响较小的因素就忽略不计；一种是进行线性化的近似处理，最后当作线性环节

来进行分析；还有一种是在调节系统中采用必要措施，特别是通过局部负反馈来缩小非线性因素的影响。总之，在调节系统中一般总是尽可能地避免和缩小非线性因素的不利影响，但在另一些场合，又需要引入非线性来改善调节系统的工作性能。

6．按调节动作和时间的关系分类

有连续调节系统和断续调节系统。

连续调节系统是指这样的系统，在这种系统中如果不考虑不灵敏性，则被调量的连续改变与调节机构位置的连续改变相对应。也就是说，在这种系统中，所有元件的输入量和输出量的变化保持着连续的联系。

断续调节系统是指被调量的连续变化与调节机构位置的变化不是相对应的，也就是说在断续调节系统中，调节机构的动作只对被调量的连续变化中的几个量相对应而不是全部。我们根据调节机构可能有的位置数的不同，又可分为双位置和多位置系统。双位置系统中调节机构只可能占据两个极限位置中的一个，此时调节机构的一个位置对应于向对象供给全部的能量或物质，第二个位置则对应于完全停止供应。该系统的开始或停止工作是由被调量在很宽的范围内从某一最大值变到某一最小值而发生的。例如动力装置中的空压机控制回路就是断续调节系统。

除了以上六种分类法以外，还有其它的自动调节系统的分类方法。这些分类相互之间都是联系的，根据不同的要求给调节系统以不同的名称。例如定值调节系统可以是有差调节，也可以是无差调节系统，也可以说闭环调节系统中包括定值调节系统和程序调节系统等。因为在调节过程中，不同类型调节系统适用的场合不同，要掌握各种系统的特性和要求，合理地选择调节系统。在动力装置中，经常接触的调节系统是定值、连续、闭环、单参数线性的自动调节系统，断续调节系统在位置调节中用得较多。要掌握自动调节系统的适用场合必须首先了解系统的性质，通常的系统性质是由调节对象的特性和调节器的特性所共同决定的，所以接下来我们要讨论的是调节对象的基本性质。

§3　调节对象的基本特性

一、调节对象的工况

组成自动调节系统的各种调节对象在整个动力装置中都有着一定的作用，随着船舶的运行状态的不同和各种外界干扰的影响，调节对象所处的工况就会发生变化。调节对象的运行工况通常规定为三种，即稳定工况、扰动工况和过渡工况。稳定工况就是指调节对象的输入与输出不随时间发生变化，能量或参数达到平衡，被调参数处于稳定状态。如图 1-8所示，（$0\sim t_1$）段，这时的工作状态是设计状态，被调量对给定量没有发生偏移，自动调节器处在静止状态。扰动工况就是指原先的那种平衡被外界干扰所破坏，此时的被调参数随时间而变化。由于被调量的偏移，使调节器处在调节状态来克服干扰的影响，如图 1-8 所示（t_1-t_3）段。如果在 t_2 瞬间，干扰停止作用，并保证在一定值，则扰动工况结束，继而开始了过渡工况。过渡工况和扰动工况的区别在于调节器动作与否。在过渡

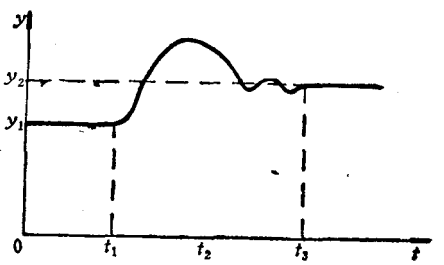


图1-8　被调参数的变化曲线

工况期间，输入量对应于新的负荷值趋向平衡，使在工况始点被调量在有限的时间间隔内取得给定的常数值。因而，随着过渡工况的继续，对象的工作过程重新达到稳定工况。在调节理论中，从原状态过渡到新状态的过程称为过渡过程。

在外界变化停止后，过渡工况中被调量于有限时间间隔内能达到给定的常数值，则此过渡过程称为稳定的过程。如果被调量连续变化的时间不定，而且对应于给定值作正负向的波动，则此过渡过程是不稳定的过程。显然，这种不稳定的过渡过程不可能保证自动调节对象的正常运行。为了使调节对象能正常运行，除了保证稳定性的要求外，还应该使过渡过程在一定的时间里结束，并且最大的偏差不得超过运行条件给定的数值。因此，对任何调节系统都有一定的指标来衡量其调节质量的好与坏。

二、调节对象的性质

自动调节系统能否得到满意的调节品质指标，不仅决定于调节特性，同时还决定于调节对象的特性。研究调节对象就能正确使用调节器，并且为调节器的参数整定工作提供依据，从而改善调节质量。

调节对象的性质有静态和动态之分。对自动调节系统来说，任何对象都是为了保证预先给定的工艺过程而设计和制造的，在大多数情况下，对象的性质是完全确定了的，所剩下的工作是要相当全面正确的评定这些性质，并为它选择最满意、工作最简单的调节器。然而对调节器来说，对象的不稳定工况是主要的工况，只有在这种工况中才有必要进行调节。所以我们了解调节对象的不稳定工况下的特性及被调参数的变化特点有着重要的意义。

1．对象的动态特性及其曲线的表示

我们先看一下船用淡水加热器温度自动调节时的动态特性。如图 1-9 所示，在船舶航行中，受外界因素的影响是经常发生的，淡水加热器的温度也是经常变动的。例如，用热淡水量变化了，或者供给的淡水温度变化了等等，这些外来的干扰破坏了原来淡水加热器的吸热量与加热蒸汽供热量之间的热量平衡，致使被调参数温度发生了变化。

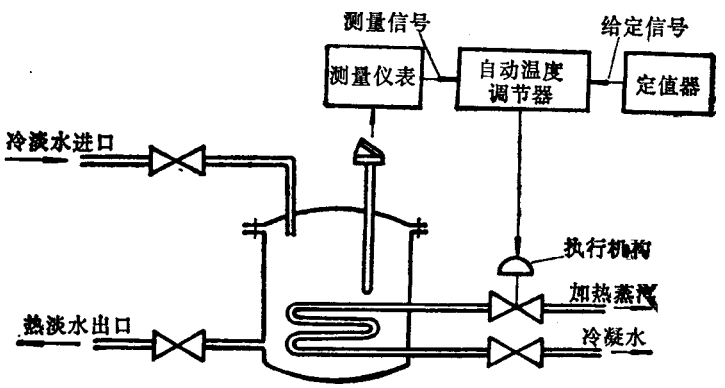


图1-9　淡水加热器温度自动调节系统示意图

这时的调节器就要根据温度变化的情况，开大或关小加热蒸汽调节阀门，以抵消外来扰动的影响，使温度恢复到给定值。这里，蒸汽调节阀门开度改变后，调节对象的被调参数随时间的变化情况，就称为调节对象的动态特性。

当加热蒸汽阀门突然开大，并保持某一开度时，淡水加热器的温度开始上升，但这个温度上升的过程是缓慢进行的，最后上升到一定温度后就不再变化了。我们用曲线把这一过程表示出来，如图 1-10 所示。图中的温度变化曲线称对象的动态特性曲线，也称对象的过渡过程或飞升曲线。

从曲线可以看出，调节阀门在 t_0 时刻增大 $\Delta\mu$ 以后，淡水加热器的温度是慢慢上升的，就是说，加热器的温度对于调节阀的调节作用是有惯性的或者是有滞后现象的。进一步研究说明，这种滞后现象是调节对象的一个很重要的动态特性。它影响着调节器的工作也影响着调节过程。

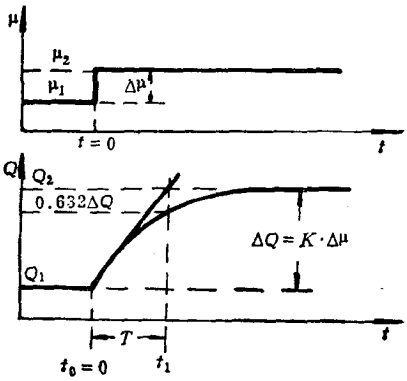


图1-10　加热器温度动态特性线

2．表示动态特性的特征参数

在表示动态特性的时候，如果每次都用图示的整条曲线来表示，就很不方便，特别是在研究动态特性的情况下，带来许多麻烦。所以理论上希望用几个特征的数值来表示这种特性。如图 1-10 所示的曲线，我们通过分析和数学推导，可以求出以上曲线的方程式：

$$Q=Q_1+K\cdot\Delta\mu\left(1-e^{-\frac{t}{T}}\right) \qquad (1\text{-}1)$$

可以看出，这是一个指数方程式，说明图 1-10所示的曲线在数学上是一条指数曲线，这种数学表达式也称为该淡水加热器调节对象的数学模型。方程式中的两个常数值 K、T 是该动态特性的两个重要参数，分别称为时间常数和放大系数。

下面我们进一步来分析这两个参数的物理意义及对动态特性的影响。

（1）假设加热器受到突然的扰动（阶跃扰动）以后，即 $t=\infty$ 时，代入公式（1-1）可得：

$$e^{-\frac{t}{T}}=0$$

$$\Delta Q=Q_2-Q_1=K\cdot\Delta\mu$$

就是说温度的变化为 $K\cdot\Delta\mu$。这里的加热器是一个单元（也称环节），可以用图 1-11 来表示。当输入量 $\Delta\mu$ 产生时，它的输出量 ΔQ 改变了 $K\cdot\Delta\mu$，也即输入量在通过这一单元后，放大了 K 倍而输出，所以我们把 K 叫做放大系数。可见，K 表示了调节对象受到扰动后，被调参数最终变化（$t=\infty$）的大小，从物理意义上讲，放大系数大的调节对象比较灵敏，但稳定性差，而放大系数小的调节对象，调节起来比较迟钝，但稳定性好。一般在稳定性上希望 K 小一点，在灵敏度上希望 K 值大一点，至于最佳的配合状态，是需要通过调整来实现的。

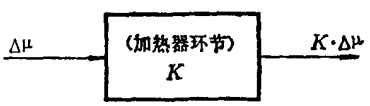


图1-11　静态放大系数示意图

（2）又假设在刚加上扰动的瞬间，即 $t=t_0=0$ 时，温度变化的速度是多少？可用求曲线方程的导数来实现，如式：

$$\frac{dQ}{dt}=\frac{K\cdot\Delta\mu}{T}\cdot e^{-\frac{t}{T}} \tag{1-2}$$

$t=0$ 时：

$$\left.\frac{dQ}{dt}\right|_{t=0}=\frac{K\cdot\Delta\mu}{T} \tag{1-3}$$

从图 1-10 上看，就相当在曲线 $t=0$ 时的切线的斜率，而这条切线在新稳定温度 Q_2上截得的一段时间就等于 T。可见，时间常数的定义就是：当温度一直以 $t=0$ 时的最大速度变化到新的稳态温度所需要的时间。可是，温度实际的变化速度是愈来愈小的，所以温度变化到新的稳定状态所需要的时间要比 T长得多。理论上说，需要无穷长的时间，因为只当 $t=\infty$时，$\Delta Q=K\cdot\Delta\mu$最终结果在 $t=\infty$时达到的，但实际上一般认为当$\Delta Q=0.95\Delta\mu\cdot K$ 时，可以近似地认为变化过程已经基本结束。

当 $t=3T$时，$\Delta Q\approx 0.95K\cdot\Delta\mu$，说明扰动发生后，要经过 $3T$的时间温度的变化过程才基本结束。从物理意义上看，T是变化过程的时间参数，T越大，温度变化过程的时间越长，这也意味着调节对象的惯性越大。时间常数 T也可以认为是表示对象惯性大小的一个参数。

一般求 T值的方法有作图法和计算法两种。前者求得的数值不易准确，所以往往采用计算的方法。

令 $t=T$，得：

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

从稳态 Ⅰ变化到稳态 Ⅱ时，当变化量达到 0.632 倍的 $\Delta Q_{t=\infty}=K\cdot\Delta\mu$，所需要的时间就是$T$。

通过T值的讨论，我们知道了对象是有惯性的，从普通物理我们也许记得惯性是物体速度和质量的产物，那么调节对象惯性又是什么呢？它影响动态特性的因素有哪些？

我们以船用重力润滑油柜为例来认识对象的惯性及意义，见图 1-12 所示。滑油不断从上面的管中流入，同时又不断从下面的管中流出，流入和流出都由调节阀来控制流量的大小。油柜要求保持油位高度H一定，因此，这是一个被调量为液位H的油柜油位调节对象。

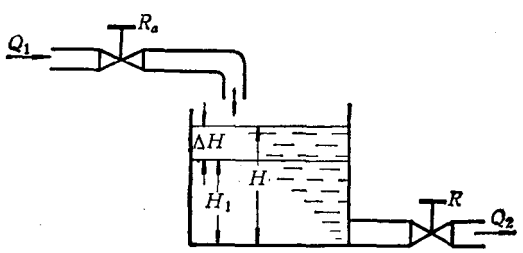


图1-12　重力润滑油柜示意图

如果流出量为Q_2，要保持油位高度H不变，在平衡时，流入量Q_1应等于流出量 Q_2，这时，对象的负荷即能够储存工质或能量的能力为：

$$W=H\cdot F(\mathrm{m}^3) \tag{1-4}$$

式中 F是柜的截面积（m^2）。这种能力我们称为容量，W是该对象的体积容量。容量是由于对象中存在某种阻力的缘故。上例中，油柜流出管路上的调节阀就是一个阻力元件，由于它的阻力，阻碍了液体的流出，才使油柜能保持一定的油位高度，具有一定的容量。反之，没有阻力的话，油柜中盛不住油，当然也就没有容量了。另外，容量可以通过阻力的大小来调节的，因此，对象的容量与阻力及截面积（也称之为容量系数）有关。我们可以通过公式的变换得到容量系数与容量变化ΔW的关系，即

需要全本请访问 www.ertongbook.com

$$C=\frac{\Delta W}{\Delta H} \tag{1-5}$$

这就是说对于相同的容量变化ΔW容量系数越大，油位H即被调量的变化量就越小，反之就越大。所以容量系数反映了油框的惯性。通过这种分析，我们就不难理解调节对象的惯性概念，就是这种惯性使调节系统的工作有了一个动态过程，要使动态过程达到一定的指标就要根据不同对象的不同惯性来配备调节装置。从理论上讲，就是要改善调节系统中的特性参数值。这种改善在今后的学习中就是调节技术中的一个重要内容：调节系统参数的整定。

船舶动力装置中的各种调节对象受到重量和尺度的限制，它们的惯性是相当小的。同时它们的种类特别繁杂，对调节器的要求各不相同，有的只要简单的调节器，有的则需要复杂的调节器。在进行自动化设计时有这样的设计原则：尽量运用最简单、最适用的技术方法。然而，究竟使用什么样的调节器还得从调节对象的另一重要特性——自平衡能力来判断。

调节对象的自平衡能力是指对象受到扰动作用后，在没有操作人员或调节机构的作用下能借助对象被调参数变化的作用，使对象又重新自动处于平衡状态的能力。如图1-13所示，被调参数液位的改变，可以使调节对象的介质能力——流量发生变化。当

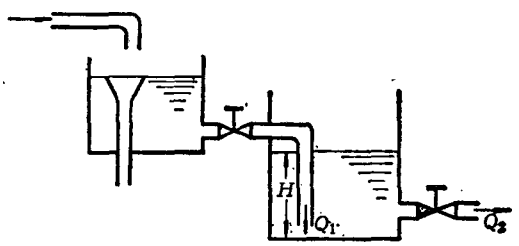


图1-13　具有自平衡能力的调节对象

Q_2受到扰动而变化时，液位H可以调整Q_1的流量，使该系统重新处于平衡状态。这种自平衡能力并不是每个系统都具备的。如图 1-14 所示，就是典型的没有自平衡能力的对象。水箱的给水管位于水面之上，而水是用泵来排出的，于是当给水量Q_1和排水量Q_2不相等时，如果不对给水装置进行调节作用，则过了一段时间不是溢满就是流空。

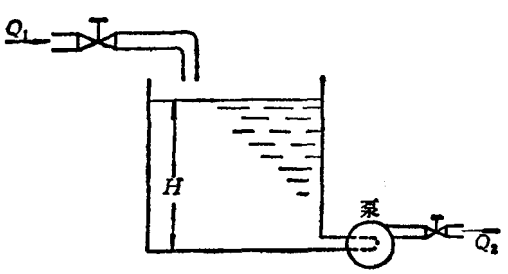


图1-14　没有自平衡能力的调节对象

在船舶动力装置中，水箱对象中的液位、换热器对象中的温度、压力容器对象中的压力等参数就是有自平衡能力对象所对应的被调参数。锅炉对象中的水位调节则是没有

自平衡能力对象的被调参数调节。具有自平衡能力的调节对象，其调节器的任务就是保证正常运行所规定的被调量值和良好的过渡过程。反之，其调节器将是复杂的。由此可见，在评定对象动态特性、选择调节器时，评定它的自平衡能力是非常重要的。

复习思考题

1．解释自动调节的下列术语：

调节，人工调节，自动调节，被调量，给定值，扰动，内扰，外扰，调节对象，调节器，调节机构。

2．为什么说自动调节是模拟人工调节，又是人工调节的发展？

3．何谓自动调节系统。

4．常用的干扰形式是什么？理论干扰与实际干扰是什么关系？

5．调节系统有哪几种分类法？

6．调节对象的基本特性有什么意义？

第二章　自动调节器

§1　自动调节的基本原理

在自动调节系统中，调节器的作用就是自动地纠正或调整由于扰动而产生的偏差。对它有两个方面的要求：既要满足调节对象的特性要求，又要使被调量的调节过程速度快、质量好，结构简单。上一章我们对调节对象的特性有了初步的认识，明确了对象性能的调节特点。接下来让我们讨论一下调节器是怎样实现调节过程的。

在调节理论中我们把调节器定义为：按特定的调节规律使被调量稳定在给定的范围内的设备。尽管调节器的形式是多种多样的，然而不管哪种形式都是以基本的调节原理为基础的。所谓简单调节器，就是指只由一种调节原理所构成的自动调节器；所谓复杂调节器，就是指由几种调节原理组合而构成的自动调节器。下面我们分别叙述调节原理的主要内容。

一、典型调节规律及特点

1．位式调节规律

调节器在自动调节系统中的作用是接收被调量的变化信号，按一定的调节规律输出相应的信号。所谓位式调节规律，就是指调节器的输入信号 e 超过某一规定值时，调节器的输出信号 y 就从某一值跃变到另一值。若输入偏差信号 e 在某一规定的范围内变化时，则输出信号 y 保持原状态不变。

图 2-1是双位式调节原理图。当然，还有三位式和多位式。当偏差信号 e超过e_2时，输出信号 y 从 0 点跃变到 y_A 反之，偏差信号 e 低于e_1时，输出信号 y又从 y_A 退落到 0。只有当偏差信号 e在e_2～e_1之间时，输出信号 y 才保持原状态不变。通常，我们把 e_2～e_1 的范围称为位式调节器的幅差值。

这种双位调节原理的特点在于它的输出只有两个位置（相当于阀门的全开和全闭两个状态）。被调参数可以在给定值或给定范围上来回变化。因此它的偏差大，精度低。这样的调节规律多用于对调节对象的被调参数的精度要求较低即调节质量要求不高的场合。对于船舶动力装置中的空气瓶压力参数的调节，常用这种调节规律。有时，为了改善调节质量，可把双位改成多位，使被调参数的变化范围缩小，精度提高。

2．比例调节规律

调节器的输出信号与输入偏差信号的关系如果是连续的，并且成比例的，那么，这种调节规律就是比例调节规律。如图 2-2 所示。

显然它比位式调节规律更进了一步，有时我们还认为它是无穷多的位式调节的组合。用数学模型可表示为：

$$\Delta y = K_e \cdot \Delta e \qquad (2\text{-}1)$$

式中　Δy——调节器输出的变量；

　　Δe——调节器输入的偏差变量；

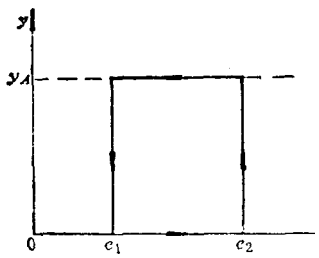


图 2-1　双位式调节原理图

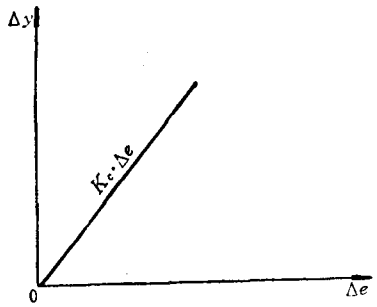


图 2-2　比例调节原理图

K_c——调节器的放大系数，一般为常数。

在放大系数一定的条件下，偏差量Δe愈大，比例作用就愈强；反之，偏差Δe愈小，比例调节作用也愈弱。这种调节规律的特点是调节作用及时，输入与输出是一一对应的，而不象位式调节那样有一个变化范围。但当调节过程结束后却有误差存在，即被调量不能恢复到原来的稳态值。在调节理论上我们把这种静止状态的误差称为静态偏差。静态偏差产生的原因是由于系统负荷变化时，要求调节器的输出也能随着调节阀的开度作相应的变化，以使系统能重新稳定下来。然而，调节阀的开度变化又必须在被调参数出现某一偏差后才能出现，因此，被调参数不可能回到原来值，而却在另一数值上稳定下来。对于被调参数不要求保持恒定的场合，使用这种调节规律比较适宜，在船舶动力装置中常在液位调节中使用。

液位调节的主要目的是使流量Q能得到充分保证，它允许液位这一被调参数存在静态偏差。图 2-3 所示就是简单的比例调节系统。水箱的水位 x是被调参数，给定值是x_0，当水流出量小于流入量时，水位就升高Δx，通过浮子 1 的传感和杠杆 2 的调节，使调节阀的阀芯 4 向下移动，减小流入量。反之，水位偏低，阀芯上移增加流入量。于是，不难看出阀芯位移的变化量（调节器输出 Δy）与水位偏差（输入偏差 Δx）成正比例，因此调节机构具有比例调节规律，而且在调节过程结束后 Δx 的静态偏差仍然存在，只有当流量的出与入恢复到设计状态时，偏差才能消除。

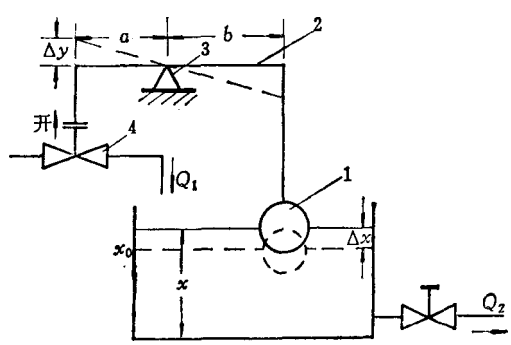


图 2-3　浮子式水位调节系统

1—浮子；2—杠杆；3—可调支点；4—调节阀芯。

3．积分调节规律

从调节结果来看，比例调节属于有差调节，在某些要求无差调节的场合是不合适的。如果我们采用积分调节规律，就可以实现无差调节。积分调节规律就是把偏差量随时间不断地积累起来（这种积累在数学上称为积分）。积累的结果是使调节器的输出不断地增加或减小，只要存在偏差就连续不断地积累，直到偏差为零，积分作用才停止。换句话说，只要作为输入信号的偏差量存在，调节器就会不停地调节执行机构，直到把被调参数调回到给定值为止。我们用数学模型表达积分调节规律，即：

$$\Delta y=\frac{1}{T_I}\int \Delta e dt \qquad (2\text{-}2)$$

式中 T_I——积分时间常数。

T_I是衡量积分作用强弱的标志。T_I大，表示积分作用弱；反之，T_I小，表示积分作用强。

图 2-4 为液动积分调节的原理图。用浮子 1 检测水箱的水位变化，通过杠杆使滑阀 2 在油缸 7 内作上下移动，用来分配压力油的流动方向，使压力油进入伺服油缸 5 的一个空间，而另一空间内的油排回到循环油箱。油缸 5 中的伺服活塞 4 通过活塞杆带动调节阀作上下移动而起调节作用。当出水量减少时，水位升高并偏离给定值，这时阀 2 随水位而升高，打开配油口 A和 B，其开启的高度等于水位偏差 Δx，于是压力油经 A孔进入伺服器油缸的上部空间，推动伺服活塞向下移动，关小调节阀 6。由图 2-4可知 只要存在 Δx，伺服活塞的移动不会停止，调节阀的开度跟着变化，直到偏差被消除为止，所以它具有积分作用的调节规律。

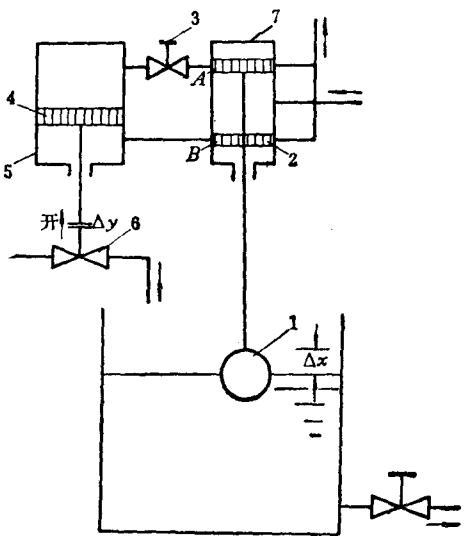


图2-4 液动积分调节器原理图

4. 比例积分调节规律

积分调节规律如上所述具有消除静偏差的优点，但由于它的输出是按时间逐渐积累起来的，也即调节作用是逐渐加强的，而且其速度与积分时间 T_I 成反比。在时间上调节作用总是落后于偏差的变化，使调节过程进行得非常缓慢，如图 2-5 所示。要增加 Δy 的量需要一定的时间过程。与此不同，比例调节规律其输出 Δy是立即产生的，没有那种称为“滞后”的时间过程。我们比较二者的特点，可以把它们结合起来组成具有比例和积分两个调节规律的调节器，此时，比例加积分的调节器既能将偏差按比例放大或缩小，又能将偏差按时间的增加而积累。这种调节规律的调节器具有比例规律和积分规律的共同特点，其输出信号为比例规律和积分规律两部分之和。它的动态特性曲线如图 2-6所示。用数学公式可以表示为：

$$\Delta y=\Delta y_P+\Delta y_I=K\cdot\Delta x+K/T_I\int_0^t \Delta x dt \qquad (2\text{-}3)$$

式中 K——调节器的放大系数；

T_I——积分时间常数。

这种比例积分调节规律在船舶动力装置中常用于温度调节系统，可以确保被调参数的恒定。

5. 微分调节作用规律

微分调节作用就是根据系统扰动信号的变化率进行调节的。有经验的操作人员在控制锅炉的压力时，能根据汽压变化趋势对汽压进行调节。有时尽管压力表指针偏离给定

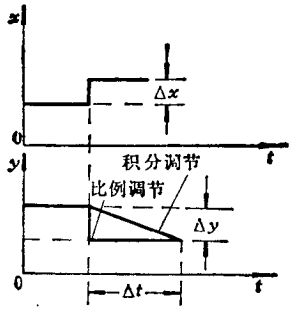


图2-5　比例调节和积分调节动态特性曲线

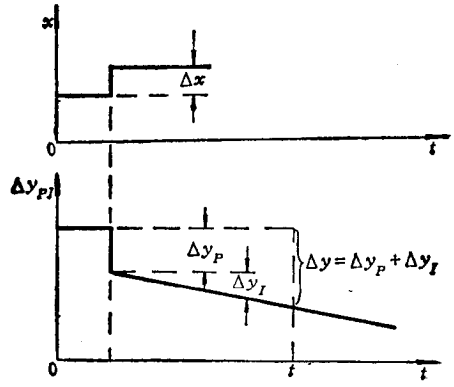


图 2-6　比例积分调节原理图

值并不多（如汽压减小），但变化的速度较快。这说明已出现较大的负荷变化，如不采取有效措施，必将出现更大的偏差。于是操作工有意识地把燃油阀开大一些，然后再慢慢关小一点，这种调节方法称为超前动作，它能很快地消除偏差。微分调节作用规律就是模拟上述的动作，使偏差变化速度与阀门开度之间存在快变大动，慢变小动，不变不动的关系。微分调节作用规律通常用 D 表示，其数学表达式为：

$$\Delta y = T_d \frac{d\Delta e}{dt} \tag{2-4}$$

式中　T_d——微分时间。

微分作用的特点是：只要偏差刚一出现，调节器就立刻有一较大的输出，调节动作及时，并在时间上体现了超前。在偏差为常数时，不管其数值多大都没有微分作用，达不到消除偏差的目的，所以微分作用是一种辅助作用，当偏差变化缓慢时，它就无作用了，没有输出。这种作用多用于对象时间常数较大的系统中，发挥它时间超前的特点。其特性曲线如图 2-7 中 D 线所示。因此，具有微分调节规律的调节器输出的信号只与输入的偏差信号变化有关，而与偏差是否存在及偏差的大小无关。例如，当被调参数稳定在某一数值时，微分作用就停止了，即使这时有很大的偏差，调节器也不再动作，因此微分调节器不能单独使用，一般是和比例作用组成比例微分调节器（简称 PD 调节器），成和比例积分作用组成比例积分微分调节器（简称PID）来使用。

与前述的比例积分作用一样，当给比例积分微分调节器输入一个阶跃的偏差信号时，调节器的输出信号实际上就是比例作用、积分作用和微分作用这三部分输出变化之和。如图2-8所示。

可以看出，微分作用使 Δy_D 变化得最快，它的输出信号先发生突变，然后就慢慢地下降。而随时间累积的积分作用却越来越强烈，使 Δy_I 随时间而不断增大，若偏差信号 Δx 不消失，则积分作用可以使输出的调节信号一直变到最大值。与 PI 调节器相比，由于 PID 调节器中增加了微分作用，就可以实现所谓“超前调节”，从而大大缩短了调节时间。

二、反馈的概念

在自动调节理论中经常会碰到“反馈”这个名词，我们可以用锅炉水位调节的例子

需要全本请访问 www.ertongbook.com