

交通系统中等专业学校试用教材

自动控制元件与系统

(船舶电气自动化专业用)

武汉河运专科学校 易让, 陈才贤 编

人 民 交 通 出 版 社

交通系统中等专业学校试用教材

自动控制元件与系统

(船舶电气自动化专业用)

武汉河运专科学校 易让 陈才贤 编

人 民 交 通 出 版 社

交通系统中等专业学校试用教材

自动控制元件与系统

(船舶电气自动化专业用)

武汉河运专科学校 易让 陈才贤 编

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 006 号

新华书店北京发行所发行

[各地新华书店经售]

人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 16.75 字数: 411千

1980年12月 第1版

1980年12月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—4,800册 定价: 1.35元

内 容 提 要

本书共有十二章。第一章至第八章是控制元件部分，包括电磁、电机、铁磁、热电、电子等元件和变压器及电动执行器。第九章至第十二章是系统部分，包括调节器、调节系统、随动控制系统、程序控制系统、系统过渡过程的质量指标、自动检测记录和报警装置等。

本书内容比较广泛，对自动控制理论的物理概念作了较详细的定性分析和阐述，并结合船舶的实际情况，说明自动控制元件与系统的应用。

本书为交通系统中等专业学校船舶电气自动化专业的教学用书，也可供从事船电工作的技术人员参考。

本书由武汉河运专科学校电气教研组易让、陈才贤编写。陈才贤编绪论、第一、二、三、四、八、十二章，易让编第五、六、七、九、十、十一章。全书由易让统稿，广西航运学校石志高、欧阳春主审。在编写过程中，承蒙广西航运学校，集美航海专科学校，大连、上海、青岛海运学校，南京海员学校，南京河运学校有关教师参加会审。

目 录

绪 论	1
第一章 自动控制元件的作用和一般性能	6
§1 自动控制元件的作用	6
§2 自动控制元件的一般性能	7
第二章 电磁元件	12
§1 概说	12
§2 电磁阀	12
§3 电磁离合器	12
§4 电磁制动器	13
§5 磁粉离合器	18
§6 电磁转差离合器	24
第三章 电机元件	29
§1 概说	29
§2 伺服电动机	29
§3 测速发电机	38
§4 旋转变压器	45
§5 自整角机	55
§6 步进电机	73
§7 滚切电机	80
第四章 铁磁元件	82
§1 饱和电抗器	82
§2 磁放大器	86
§3 无触点磁继电器	92
§4 铁磁谐振稳压器	94
§5 差动变压器	96
第五章 热电元件	98
§1 概说	98
§2 热电偶	98
§3 热电阻	101
第六章 电子元件	107
§1 概说	107
§2 相敏整流器和相敏放大器	107
§3 光电元件	113
§4 霍尔元件	117

§5 集成运算放大器	120
第七章 变送器	135
§1 概说	135
§2 沉筒式液位变送器	135
§3 力平衡式变送器	139
§4 温度变送器	145
第八章 电动执行器	152
§1 概说	152
§2 DKJ型电动执行机构	154
§3 船用锅炉燃烧过程自动调节中使用的电动执行机构	170
第九章 调节器与自动调节系统	172
§1 概说	172
§2 基本调节规律	172
§3 调节规律的实现与反馈原理	177
§4 传递函数的应用和PID反馈电路的分析	180
§5 调节器电路的分析	191
§6 调节器的调试与校正	204
§7 DDZ型电动单元组合仪表介绍	208
§8 自动调节系统的组成	210
第十章 随动控制系统与程序控制系统	214
§1 概说	214
§2 随动控制系统	214
§3 程序控制系统	221
§4 电子计算机控制简介	233
第十一章 自动控制与调节系统的过渡过程	235
§1 概说	235
§2 常用的几个过渡过程品质指标	235
§3 自动调节系统的整定方法	236
第十二章 集中监视与自动检测记录	241
§1 集中监视的应用	241
§2 巡回检测	242
§3 自动记录仪	252

绪 论

自动化是在人类已经掌握了一定的科学技术，并已进入了大规模生产的基础上逐渐发展起来的一门科学。

生产过程的自动化，可以减少工人在高温或者有害空气的场合中工作，使劳动条件得到改善，工人只需要对技术设备的运转进行监视，而不需要再从事繁重的技术操作。自动化还可以在新的设备和规范上，重建或新建生产过程，使其更符合科学性和先进性，降低原料和动力的消耗，延长设备的寿命，降低生产成本，加快生产速度，提高产品质量，大大提高劳动生产率。

自动化在生产过程中具有重要的作用，在各种技术部门里得到了极其迅速的发展。随着我国交通运输事业的突飞猛进，在船舶上，自动化技术也越来越普遍地得到了应用，例如自动舵；锅炉自动化；主、辅机各种参数的测量、控制和报警；火灾报警系统；主机遥控等等。

自动化是可以用的方法来实现的，而自动调节是自动化的一个重要形式。自动控制元件与系统这门课程是以自动调节和自动控制普遍使用的元件及其系统的一般理论为研究对象的。它是作为船舶电气专业的技术基础而设置的学科。正如前面所指出的，自动调节广泛应用在技术部门和技术设备中。它有各种各样的构造，然而这些不同的自动调节系统中却存在着共同之处，这些共同处是由自动调节的任务所规定的。因为任何一种技术操作过程都是在和它周围的环境相互联系的情况下进行的，周围环境的各种因素时常干扰它，使它发生偏差，而调节设备的任务，正是减少或消除这种偏差，因此在自动调节系统中，随着操作过程发生偏差和恢复原状，不断发生着动的状态。虽然自动调节系统的构造以及它调节的物理量种类很多，但在调节系统中所使用的元件及其在操纵时所发生的动的状态，却具有共同的理论基础。本课程的任务就是研究自动控制和调节系统的一般理论。掌握这些理论，对于掌握和使用自动调节系统具有重要的意义。

在各种生产过程和技术设备中，常常需要使其中的某些物理量（例如温度、电压、转速等等）保持常数，或者让它们按照一定的规律变化，例如对某船用柴油主机冷却淡水的出口温度要求是 $68^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，超过了规定范围，将影响主机安全运行。要满足这种需要，就应该对生产机械或技术设备进行及时的调节，以抵销外界的扰动和影响。这种调节，除了可以用人工来进行外，还可以通过自动控制装置来进行，即自动地进行。执行这种调节动作的设备，称为调节器。被调节器控制的设备称为调节对象。调节对象和调节器一起，统称为自动调节系统。

虽然被调节的物理量各式各样，并且就各种自动调节系统来说，它们的构造也可能有很大的差别，然而，在一些自动调节系统中，总有一个共同的目标，那就是要用机械的调节来代替人工的调节。为了说明这种代替为什么可能，以及究竟是怎样代替的，首先必须了解在人工调节中，参与调节的人担任了哪些工作，起了些什么作用。

在调节过程中，人们总是希望达到一定的目标，得到比较理想的工作情况，这个规定的

目标，通常把它叫做给定值。在图 0-1 的烘炉温度调节系统中，炉子 1 在什么温度下工作，事先有个给定温度值；在任意时刻又有一个实际温度值。调节人员的任务就是在测量了实际温度之后，把它和给定温度比较。倘若炉子的温度比给定值高，我们便将图中的开关 3 断开，电阻 4 发热停止，炉子逐渐冷却。倘若炉子的温度比给定值低，则将开关 3 合上，电阻 4 发热，炉子的温度将逐渐上升到给定值。

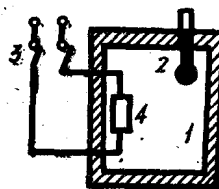


图0-1 烘炉
1-炉子；2-温度表；3-开关；4-电阻

由此可见，在人工调节中包含着这样几个步骤：

1. 测量被调参量；
2. 将所测得的被调参数的值和给定值进行比较，得出偏差；
3. 根据偏差的性质和大小，转化为调节动作。

因此，倘若要用自动调节来代替人工调节，那末在自动调节系统中，必须包括三个单元，即：

1. 测量单元：它的作用是测量被调参数的实际值。例如在温度自动调节系统中，测量单元是热电阻或者热电偶、感温包、温度计等。
2. 调节单元：它是一个比较指挥机构，是自动调节系统的核心。调节器有电动的、气动的、液动的和机械的等。
3. 执行单元：它是最后完成调节任务的单元。它可以分为气动的、电动的或液动的。

在人工调节过程中，被调参数和给定值进行比较是靠调整人员来进行的，因此对于给定值，只要调整人员心中有数就行了。而在自动调整系统中，则必须将给定值在系统中具体的体现出来。因此，自动调节设备还应该引入给定值的设备，我们把它称为给定机构。

图 0-2 是一个最简单的温度自动调节系统的原理图。在这一图中，3 所代表的不是一个普通开关，而是一个继电器。这个继电器的触头接在交流电源的电路里，当继电器的线圈中没有电流时，继电器的触头是闭合的。温度表 2 上引出两根导线 5、6 作为接头。继电器线圈和直流励磁电源的连接方法如图所示。

当炉子的温度高于给定值时，温度表中的水银柱上升，直到超过接头 5，将继电器线圈的电源接通，继电器触头动作，切断电阻 4 上的交流电源，电阻停止发热，炉子的温度逐渐降低。当炉子的温度低于给定值时，温度表中的水银柱下降到低于接头 5，继电器线圈和电源断开，触头闭合，电流流过电阻 4，使得炉子的温度上升。在这一系统中，炉子是被调对象；温度是被调参数；温度表 2 是测量元件；接头 5 是给定值，由接头 5、6 所连成的继电器线圈的供电线路是比较元件；继电器本身是执行元件。

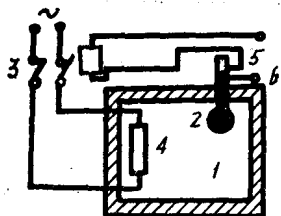


图0-2 温度自动调节系统原理图
1-炉子；2-温度表；3-继电器；
4-电阻；5、6-导线接头

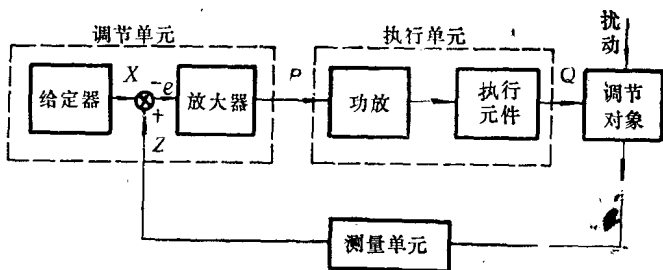


图0-3 自动调节系统的组成

综上所述，自动调节系统和人工调节一样，也是由测量元件测量被调参数，把它和给定值比较，得出偏差，然后由偏差来控制执行元件，从而达到减少偏差的目的。

在研究自动调节系统时，为了更清楚地表示一个自动调节系统各个环节之间的相互影响和信号联系，一般都用方框图来表示调节系统的组成，如图 0-3 所示。每个方框表示组成系统的一个环节或一件实物，两个方框之间用一根带有箭头的直线表示其相互关系，箭头表示信号进入还是离开这个方框。图中 $\rightarrow \otimes$ 符号代表比较机构，由测量单元测量得的实际参数

与给定值进行比较，得出偏差信号 ($e = Z - X$)。 $e > 0$ 称正偏差， $e < 0$ 称负偏差。在比较简单的调节系统中，这个偏差信号可以直接推动执行单元动作，在比较复杂的调节系统中，这个偏差先送入放大器（实际上比较机构是调节器的一个部分），放大器接受偏差信号 e 。进行一些运算，并输出信号 P 推动执行单元。执行单元输出 Q 称为调节作用。在复杂的调节系统中，测量单元除了温度计、热电阻等之外，还有变送器。它将所测量的实际参数的变化变成电信号的变化，以使仪表间得到相互配合。

目前使用的自动调节系统类型很多，为了更好地掌握各种不同的自动调节系统的特点，我们可以对调节系统进行分类。下面介绍自动调节系统的几种主要分类方法。

(一)按被调参数可以分为：

1. 温度自动调节系统。其调节器也称为温度调节器。
2. 压力自动调节系统。其调节器也称为压力调节器。
3. 水位自动调节系统。其调节器也称为水位调节器。

.....

(二)按仪表的能源可以分为：

气动自动调节系统；电动自动调节系统；液动自动调节系统。

(三)按系统有无静差可分为：

1. 有差调节系统

当调节系统受到扰动后，经过调节作用可以减小外来扰动所引起的偏差并重新稳定下来，但被调节量却不能准确回到给定值，总是留下残余的偏差，这种系统称为有差系统。外来扰动（例如负载）愈大，偏差也愈大。图 0-4 所示的自动调压系统便是一个有差系统。在这一系统中，他励发电机的电枢由三相同步电动机带动作匀速旋转，发电机的输出电压 U 和给定电压 U_r 依相反的极性串联后，作为放大器的输入。放大器的输出，接在发电机的励磁绕组上。由图中不难看出，偏差 $U_r - U = \Delta U$ ，倘若 $\Delta U = 0$ ，发电机没有励磁，也就不会有调整动作，因此在该系统中 $\Delta U \neq 0$ ，也就是说，偏差总是难免的。这种系统的曲线如图 0-5 所示。有静差系统的特点如下：

1) 在一定范围内，被调整量为任意值时，系统都可以平衡。

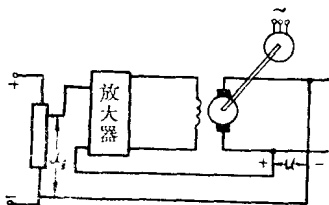


图0-4 有差调节系统

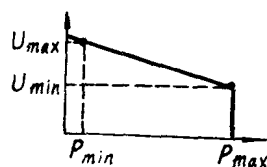


图0-5 有差系统调节曲线

2) 被调整量的稳定值与系统的调整机构的位置成单值对应。

用静差度这个概念来表征偏差的量。静差度由下列关系式来确定：

$$S = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\max}} \quad (0-1)$$

式中：

$x_{\max}$ ——负载变动时被调整量的最大值；

$x_{\min}$ ——负载变动时被调整量的最小值。

在稳定状态下，开环系统输出端的增量与输入端的增量的比值，称为开环系统的放大系数（或传递系数）。

现在由上述的调压系统（图 0-4）来推导静差度与放大系数之间的关系。

在调压系统中输入的增量为

$$\Delta U = U_g - U \quad (0-2)$$

放大系数

$$K = \frac{U}{\Delta U} \quad (0-3)$$

由图 0-4 中不难看出， $\Delta U = 0$ 时， $U = 0$ ，因此在这里 U 应该理解为输出的增量。

由 (0-2) 式和 (0-3) 式可以求得：

$$U_g = U + \Delta U = U \left(1 + \frac{1}{K} \right)$$

或者

$$\frac{U}{U_g} = \frac{K}{1 + K} \quad (0-4)$$

式中： $\frac{K}{1 + K}$ —— 闭环系统的放大系数。

在调压系统中

$$S = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{U_g - U}{U_g} = 1 - \frac{U}{U_g}$$

将 (0-4) 式代入上式得：

$$S = 1 - \frac{K}{1 + K} = \frac{1}{1 + K} \quad (0-5)$$

当 $K \gg 1$ 时，

$$S = \frac{1}{K} \quad (0-6)$$

即静差度与放大系数成反比。因此，要减小系统的静差度，应该增加放大系数。

2. 无差调节系统

无差调节系统的特点是在稳定状态下被调整量的值总保持恒定，它与外来的扰动无关。

图 0-6 所示的自动调整电压系统，便是无静差调整系统的一个例子。图中他励发电机的电枢由三相同步电动机带动作匀速旋转，发电机的励磁绕组与可变电阻 4 串联后接到固定的直流电源上，可变电阻可动片与他励直流电动机同轴，发电机的输出电压 U 与给定电压 U_g 依相反的极性串联后，把这两个电压的差 ΔU （偏差）作为放大器的输入，而放大器的输出则接在电动机的电枢上。显然，当发电机的端电压与给定电压有差别时，即 $\Delta U \neq 0$ 时，电动

机将按照放大后 ΔU 的大小和符号，以一定的速度和方向旋转，从而改变发电机的励磁来减小误差。不难看出，只要有偏差存在，电动机便转个不停，调整动作便不会终止，直到发电机的端电压与给定值相等为止。因此，无静差系统有下列两个特点：

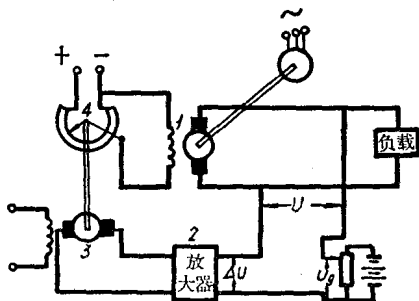


图0-6 无差调节系统

1-发电机；2-放大器；3-他激电动机；4-可变电阻

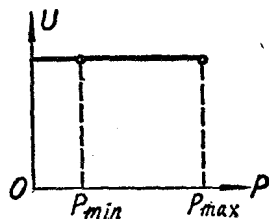


图0-7 无差系统调节曲线

1) 只有被调整量与给定值相等时，系统才能稳定。

2) 当被调整量为同一值时，系统的执行机构可能占据不同的位置。

要使系统具有上述两个特点，系统必须含有一种元件。当有输入时，这种元件的输出不断地加大；当没有输入时，它的输出等于零。图0-6中的电动机3便具有这种性质：当输入 $\Delta U \neq 0$ 时，电动机转个不停；当输入等于零时，它随处都可以停下来。这种元件叫做无静差元件或积分元件。它是无静差系统必需的。

无静差系统用在对调整要求比较高的地方，它的特性曲线如图0-7所示。随动系统都是无静差系统。

(四) 按调节器给定值变化的规律可分为：

1. 定值调节系统（或称恒值调节系统）。这种调节系统的作用是使被调参数保持恒定或者基本上保持恒定。图0-2所示的保持温度恒定的系统，可以当作这种系统的一个例子。这种调节系统的特点是它的调节器的给定值是一个常数。

2. 随动调节系统（或称随动控制系统）。这种调节系统的作用是使被调参数严格地跟着另一参数变化。在随动调节系统中，调节器的给定值是一个变化不定的参数，而不是一个恒定值，它的变化情况事先并不清楚，例如，船舶自动舵就是属于随动调节系统。

3. 程序调节系统（或称程序控制系统）。这种调节系统的作用是使被调参数严格地跟着给定值来变化，而给定值的变化是根据工艺过程的要求，按照预先制定的程序进行的。程序调节又称为程序控制。

第一章 自动控制元件的作用和一般性能

§1 自动控制元件的作用

自动调节系统是由许多自动控制元件组成的。这些元件可以用来作为自动调节系统的测量机构、控制机构和执行机构等。按照执行任务的性质、元件可以分为变送器、放大器、稳压器、继电器、执行机构等。按照元件的动作原理可以分为电磁元件、电动元件、热电元件、铁磁性元件和电子元件等。

(1) 变送器 (又称为测量机构或传感器)

变送器能将待检测的量 (或调整的量) 变换成另一种形式的量, 从而对系统的执行机构发生作用。目前, 在很多场合中, 都采用把非电学的检测量转变成电学量的变送器。它把待检测量的变化, 转换成电路参数的变化或转换成电信号而输出。为此, 应尽量使变送器的特性符合线性要求, 这样在平稳地改变待检测量时, 就可以平稳地改变输出量。

(2) 放大器

为了满足系统的工作要求, 往往需要将变送器或其它元件的输出量加以放大, 这样就需要在系统中装设放大器。放大器的特点是输入量和输出量的物理性质相同, 只是在数量上加以转变 (放大)。

放大器有电学的和非电学的 (机械的、液力的和气力的)。电学放大器的输出量和输入量都是电学量 (电流或电压)。

电学放大器按其放大过程的物理原理可以分为电子放大器、磁放大器、电动放大器和电机放大机等。

(3) 稳压器

稳压器的作用是当输入量在某一范围内变化时, 输出量保持恒定。稳压器的类型很多, 本书将着重介绍铁磁谐振稳压器, 这种稳压器主要是利用钢的磁化曲线的非线性制成的, 详细内容将在第四章叙述。

(4) 继电器

继电器是当输入量 x 达到一定数值时, 输出量 y 就发生跃变的电器, 继电器特性如图1-1所示。当 x 从0增加到 x_2 时, y 维持在一定值 y_1 ; 当 $x = x_2$ 时, y 发生跃变, 从 y_1 变到 y_2 ; 当继续增大 x 时, 输出值仍维持在 y_2 。当 x 减小到 $x = x_1$ 时, 输出量仍等于 y_2 , 但当 x 减小到 $x = x_1$ 时, y 又发生跃变, 从 y_2 减小到 y_1 ; 当 x 减到零时, y_1 还是近似地保持不变。

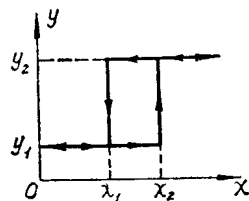


图1-1 继电器的特性

在 $x = x_2$ 时, y 的跃变叫做继电器的动作, x_2 的值叫动作值 (例如电气继电器的动作电流、动作电压)。在 $x = x_1$ 时 y 的跃变叫做继电器的释放 (返回), x_1 值叫做释放值 (返回

值)。

x_1 和 x_2 的比值 K 叫做返回系数, 即

$$K = \frac{x_1}{x_2}$$

通常继电器的释放值 x_1 小于动作值 x_2 , 即 $x_1 < x_2$, 因此返回系数小于 1。

继电器的作用: 确定输入量的定值; 作功率放大; 同时向几个电路发送信号。

目前广泛应用的继电器分为有触点的和无触点的两种。前者依靠电学输入量的改变使衔铁动作, 带动继电器的电气触头闭合或开启, 后者是以电子仪器和非线性阻抗为基础的继电器。

(5) 执行机构

执行机构是自动化元件之一, 它将各种形式的能量转变成机械动作, 从而去控制对象。执行机构的输入量可以是液力、气力或电力。目前使用最广泛的电动机, 其输入量是电力的。因为小型电动机的旋转方向容易改变和调速范围广, 所以得到广泛的应用。

§2 自动控制元件的一般性能

自动控制元件是一个能量转换机构, 在输入端送入一个 x 量时, 在输出端得到一个 y 量, 而且 x 和 y 之间存在着一个函数关系:

$$y = F(x)$$

我们从这一关系出发来研究元件的一般特性, 它分为静态特性和动态特性两种。静态特性是指变换系数 (包括灵敏度、放大系数、稳定系数)、误差、灵敏限度、反馈等。

一、静态特性

1. 变换系数

变换系数是元件的输出量 y 和输入量 x 的比, 或者是输出量的增量 (Δy , dy) 和输入量的增量 (Δx , dx) 的比。前一种情况的变换系数称为静态变换系数:

$$K = \frac{y}{x}$$

而后一种情况的变换系数称为动态变换系数:

$$K' = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$

变换系数 K 和 K' 的数值由函数 $y = F(x)$ 的性质来决定, 在一般情况下, 当 x 和 y 改变时, 这个函数的变化是不同的, 但是输出值 y 和输入值 x 常常成正比变化, 这时变换系数 K 和 K' 是常数, 并且对所有的 x 值和 y 值来说它们总是相等的, 即

$$K = K' = \text{常数}$$

变换系数 K 和 K' 的概念是一个普遍的概念, 可以应用到任何元件上, 不管这些元件起什么作用, 其概念都是一样的。但是对每一个担负有一定任务的元件来说, 变换系数有它自己的意义和名称。应用在变送器上的变换系数称为绝对灵敏度。绝对灵敏度是有单位的, 这单位取决于输入量和输出量的单位, 例如输入量的单位是厘米, 而输出量的单位是欧姆时, 绝对灵敏度的单位是欧姆/厘米。

变送器也常用相对灵敏度来表示其特性, 相对灵敏度是相应输出量的相对增量 $\frac{\Delta y}{y}$ 和输入量的相对增量 $\frac{\Delta x}{x}$ 的比:

$$\eta_A = \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta x}{x}} = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta x}}{\frac{y}{x}}$$

当 $\Delta x \rightarrow 0$ 时, 取极限, 得到:

$$\eta = \frac{\frac{dy}{y}}{\frac{dx}{x}} = \frac{\frac{dy}{dx}}{\frac{y}{x}}$$

倘若待检测的数值变了 1%, 变送器输出值变了 3%, 则相当灵敏度 $\eta = 3$ 。相对灵敏度是没有单位的, 因此它和 x 、 y 的单位无关。

具有正比变化特性的变送器的相对灵敏度等于 1, 即

$$\eta_A = \eta = 1$$

应用在放大器上的变换系数称为放大系数, 同样以 K 和 K' 形式来表示。对电学放大器来说 (其中 x 和 y 是电压、电流、功率等), 可以区分为电压、电流或功率的静态或动态的放大系数。

在绝大多数情况下, x 和 y 是同种类的量, 因此放大系数没有单位, 例如若输入电流改变 0.1 毫安引起输出电流改变 100 毫安, 则放大系数 $K' = 1000$ 。

应用在稳压器上的变换系数称为稳定系数。对稳压器的要求与对变送器、放大器的要求恰恰相反, 它不是要求保证最高的灵敏度和最大的放大系数, 而是要它具有最小的灵敏度, 所以稳压器的性能是用相对灵敏度的倒数来表示的, 即

$$S = \frac{1}{\eta_A} = \frac{\frac{\Delta x}{x}}{\frac{\Delta y}{y}} = \frac{\frac{y}{x}}{\frac{\Delta y}{\Delta x}}$$

稳定度越高, 则稳定系数越大, 例如若输入值改变 20%, 而输出值改变 0.5%, 则稳定系数 $S = 40$ 。

2. 误差

误差是由于元件内部的性质 (摩擦、材料的陈旧等) 或外界工作环境变化 (四周温度的改变、电源电压的改变等等) 所引起的输出量的变化。

误差的发生将会改变元件的特性, 如图 1-2a) 所示。误差可分为绝对误差和折算相对误差。

实际获得的输出值 y' 和标定的 (或算出的) y 的差, 称为绝对误差, 如图 1-2a) 上的 Δy 。绝对误差和标定的 y 值之比称为相对误差。以百分值表示如下:

$$\alpha\% = \frac{\Delta y}{y} 100$$

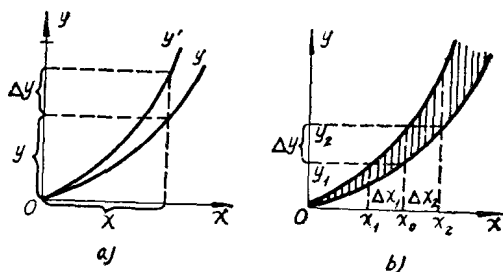


图1-2 元件特性的变化
a) 误差; b) 灵敏限度

当绝对误差 Δy 不变时, 输出值 y 越小则相对误差 a 越大。

绝对误差和最大输出值的比值称为折算相对误差, 以百分值表示折算相对误差如下:

$$b\% = \frac{\Delta y}{y_{\max}} \cdot 100$$

当绝对误差 Δy 不变时, 折算相对误差 b 也恒定不变。

相对误差和折算相对误差都是没有单位的。折算相对误差经常用来鉴定自动控制元件的准确度。

3. 灵敏限度

表征元件性质的第三个特性是灵敏限度。元件在运行过程中, 由于外界和内部因素 (例如由于摩擦、磁滞、干扰等) 的影响, 在很多场合下使得元件的特性不是单值的, 若用图来表示, 不是一条特性曲线, 而是在某两条极限曲线范围内的某一区域, 如图1-2b) 所示。从图中看出, 当输入值 $x = x_0$ 时, 输出值 y 是由 y_1 到 y_2 的数值。在 x 减小到 x_1 的过程中, y 值可以大于或小于 y_1 。但是当 $x < x_1$ 时, 输出值肯定小于 y_1 。同理, 当 x 增大到 x_2 时, y 值可以大于或小于 y_2 , 但是当 $x > x_2$ 时, 输出值肯定大于 y_2 。因此, 由于元件特性的非单值性, 要使输出值 y 小于 y_1 或大于 y_2 , 输入值 x 就要作 Δx_1 或 Δx_2 的变化, 这个输入量的改变值我们把它称为灵敏限度。

在灵敏限度内, x 改变的范围 (即 $x_2 - x_1$) 称为不灵敏带。

灵敏限度或不灵敏带可以表示变送器、放大器和其他元件的特性。无输入信号时, 有些变送器或放大器的输出端有寄生的输出量 (噪扰、不平衡电压等等), 因此要使输出值作明显的改变, 就需引入相当的输入信号值, 这个信号值即为变送器或放大器的灵敏限度。我们力求元件的灵敏限度尽可能地低。灵敏限度和不灵敏带的单位和输入量 x 的单位相同。

4. 反馈

说明元件性质的第四个特性是反馈。为了使放大系数稳定或者为了增大放大系数, 在放大器中广泛地采用了反馈。反馈是通过附加的反馈元件 F 来达到的 (图1-3), 在反馈元件的输出端我们得到:

$$x_F = \beta y$$

β 称为反馈系数, 按照 β 的正或负, 可以将反馈分为正反馈和负反馈。正反馈时, 放大器输入端的输入量 x 和反馈量 x_F 相加, 即

$$x + x_F = x + \beta y$$

若以 K 代表没有反馈时的放大系数, 并且假定放大器的特性是一条直线, 则我们可以得到放大器的输出为

$$y = K(x + \beta y) \quad (1-1)$$

移项得

$$y = x \frac{K}{1 - K\beta} \quad (1-2)$$

若以 K_F 代表有反馈时的放大系数, 我们可得到:

$$K_F = \frac{y}{x} = \frac{K}{1 - K\beta} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可以看出, 带正反馈的放大系数增大了。

对于负反馈来说, 在放大器输入端所得到的是 x 和 x_F 相减的差值。因此公式 (1-1) ~

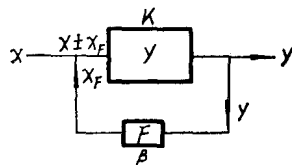


图1-3 带反馈的放大器的结构图

(1-3) 将变成下列的形式:

$$y = K(x - \beta y) \quad (1-4)$$

$$y = x \cdot \frac{K}{1 + K\beta} \quad (1-5)$$

$$K_F = \frac{K}{1 + K\beta} \quad (1-6)$$

从式 (1-6) 可知, 有了负反馈后, 放大系数减小了。

上面我们假定放大器的特性是一条直线, 从而得出放大系数 K 是一个常数。但实际上放大系数 K 不是恒定不变的。 K 的变化将对有反馈的放大系数 K_F 发生影响, 为了说明这个影响, 我们首先要求出相对灵敏度 η 。 η 是有反馈的放大器的放大系数 K_F 对放大系数 K 的相对增量的比 (假定反馈系数 β 是常数), 即

$$\eta = \frac{\frac{\Delta K_F}{K_F}}{\frac{\Delta K}{K}} \approx \frac{\frac{dK_F}{K_F}}{\frac{dK}{K}} \quad (1-7)$$

η 值表明了有反馈的放大器的相对误差与无反馈的放大器的相对误差相差的倍数。

将 (1-3) 式微分然后代入 (1-7) 式, 我们可得到正反馈时的相对灵敏度:

$$\eta = \frac{1}{1 - K\beta} \quad (1-8)$$

同样将 (1-6) 式微分然后代入 (1-7) 式我们将得到负反馈时的相对灵敏度:

$$\eta = \frac{1}{1 + K\beta} \quad (1-9)$$

将 (1-8) 式与 (1-3) 式比较, 或将 (1-9) 式与 (1-6) 式比较, 则得:

$$K_F = \eta \cdot K$$

利用 (1-7) 式, 可写成:

$$\eta = \frac{K_F}{K} = \frac{\frac{\Delta K_F}{K_F}}{\frac{\Delta K}{K}}$$

从这里得出一个重要的结论: 引用反馈, 使得放大器相对误差改变的倍数, 正好等于放大系数改变了的倍数。因而, 正反馈增大了放大器的放大系数, 但也增大了它的误差; 负反馈减小了放大器的放大系数, 但却减小了误差。

还必须指出, 当正反馈的 β 趋近 $1/K$ 时, 式 (1-3) 和 (1-8) 中的分母趋近于零, 于是放大系数和误差趋近于无穷大, 这时放大器的工作是不稳定的, 这种情况对放大器来说也是不允许的, 但是我们却可以利用这种特性来制造无触点继电器。

二、动态特性

前面所述是自动控制元件的静态特性, 即当 x 和 y 的数值不随时间而变化的特性。动态特性是, 输入值 x 和输出值 y 都随时间而变化的特性。由于自动控制元件通常都具有显著的惯性, 输出值 y 不能马上随着输入值 x 的变化而变化, 在时间上总要存在着一定的差异。

就拿最简单的情形来说, 当输入值 x 从 0 跃变到 x_0 时 (图1-4a), 若在静态情况下, 对

应于输入值 x_0 就会立即出现一个输出值 y_0 ，然而在动态情况下， x 改变了以后， y 值并不立刻达到 y_0 ，而需要经过一定的时间才能接近于 y_0 ，这种从一个平衡状态到另一个平衡状态随时间变化的过程我们称为过渡过程。

这个过程可以是非周期无振荡性的（图1-4b），或是衰减振荡性的（图1-4c）。最简单的情况是， y 值按照指数函数变化，即

$$y = y_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

式中： τ ——元件的时间常数。

时间常数越大，则 y 值建立得越慢。通常以 y 值趋近稳定值 y_0 所需的时间 t_y 来表示元件的惯性。这个时间叫做输出值的稳定时间。趋近的程度 Δy 通常规定为稳定值的 1~10%。

静态时的输出值和动态时的输出值的差值，称为动态误差。通常要求动态误差达到最小。

最后应该指出，在这一节中讨论的是属于自动控制元件的一般性能和概念，这些性质对整个控制系统同样适用。

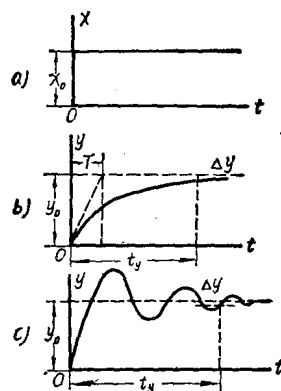


图1-4 输入值跃变时元件中的过渡过程
a)输入值跃变的图形；b)无振荡的过渡过程；c)衰减振荡的过渡过程