



自动控制原理及设计

陆道政 季新宝

*

上海科学技术出版社

序 言

自动控制广泛地应用于工农业生产、交通运输和国防建设,因此一个国家在自动控制方面的水平是衡量该国家的生产技术与科学水平先进与否的一项重要标志,正因为如此,各国对自动控制均很重视,所以它的发展也就非常迅速。

由于自动控制涉及范围广,进行研究时不仅需要分类,而且分类的方法也很多。例如,根据信号的联接形式而分成开环或闭环控制;根据自动控制系统中有没有非线性环节而分成线性或非线性控制系统,习惯上还常根据被控制的对象和被控制的参数等不同而分成热工自动调节系统和电力拖动自动化等;或分成化工自动化、冶金自动化等;还有根据是否采用数字技术或采用电子计算机而分成模拟控制系统、数字控制系统或是常规仪表控制系统、计算机控制系统等。

本书作为介绍自控原理方面的书,就应尽可能地讨论各种系统中的一些共同性的问题,并提出解决的方法。为此,我们认为对自动控制系统采用闭环、开环来分类比较方便。但是这两类控制系统不仅在信号的联接上不同,而且分析方法与研究的内容也是相差很远。闭环控制由于它总涉及到要求被控制的量能自动进行调节来达到预定要求的数值,或克服外来的扰动而维持原数值不变。在作为原理性讨论时一般就称为闭环自动调节系统,其中包括连续系统和计算机控制所用的采样系统;而开环控制系统在工业应用中的主要内容是程序控制,包括曲线、曲面机械加工等,目前多数是一些数控技术的问题。本书将主要介绍闭环系统的理论,包括分析和设计。应用方面则以工业对象为主。

同时,自动控制原理还根据研究时立足于频率域还是时间域

1107071

• 1 •

DS8-109

而分成惯用(经典)控制理论和近代控制理论。本书主要讨论惯用控制理论。但在第七章中也简单地介绍了时间域的研究方法和某些最佳控制,作为近代控制理论的入门。

考虑到实用的需要,本书第五章扼要介绍了对象特性识别的几种常用方法。为了检验系统的设计是否正确,第六章讨论了系统的模拟,其中包括采用模拟计算机和数字计算机的模拟技术。由于数字计算机在自动控制中应用日益广泛,本书对这方面的内容也进行了较多的讨论。

本书对在工业自动化控制领域工作的人员和大专院校有关专业的师生可作为参考读物,也可供具有一定数学基础的读者自学自动控制之用。

在编写本书过程中得到了复旦大学计算机科学系自控教研组和上海机械学院有关同志的支持;此外,还得到了复旦大学数学系、上海调节器厂、上海矽钢片厂、上海轻工业设计院以及上海整流器厂的协助。在此,作者深表感谢。

由于作者水平有限,时间也较仓促,本书必然有不少错误之处,希望读者能不吝指正。

目 录

第一章 自动调节的基本原理

§ 1-1	自动调节系统概述	1
§ 1-2	自调系统的特性和微分方程分析研究法	10
§ 1-3	拉氏变换	30
§ 1-4	自调系统的传递函数分析研究法	44
§ 1-5	自调系统的静差	66
§ 1-6	自调系统的频率特性	75
§ 1-7	自调系统的稳定性	86

第二章 自动调节系统的设计

§ 2-1	自调系统的三种基本类型	95
§ 2-2	补偿环节和调节器的构成形式和特性	101
§ 2-3	二阶系统	119
§ 2-4	对数频率特性设计法	132
§ 2-5	频率特性法系统设计举例	141
§ 2-6	二阶工程设计方法	149
§ 2-7	三阶工程设计方法及与二阶工程设计的比较	159
§ 2-8	多回路调节系统的最佳化设计	170
§ 2-9	电力拖动系统设计举例	174
§ 2-10	对象包含纯滞后时的系统设计	192

第三章 生产过程仪表控制

§ 3-1	生产过程仪表控制的特点	197
§ 3-2	生产过程中被调对象的特性	199
§ 3-3	自动化仪表构成原理及特性	209

§ 3-4	非线性自调系统	218
§ 3-5	准连续自调系统	236
§ 3-6	单回路系统参数的实验整定法	243
§ 3-7	复杂系统及其整定	254

第四章 采样调节和计算机控制的基本原理与设计

§ 4-1	计算机工业控制的发展、分类和工作内容	265
§ 4-2	数据采样控制系统和差分方程	270
§ 4-3	Z -变换	276
§ 4-4	采样系统的方块图变换	286
§ 4-5	由系统的 Z -传递函数求采样系统的特性	292
§ 4-6	采样系统的稳定性	299
§ 4-7	采样系统的设计	303
§ 4-8	计算机控制实例——退火炉温度自动调节	319

第五章 对象特性的测量和识别

§ 5-1	飞升曲线方法	328
§ 5-2	频率特性方法	345
§ 5-3	用最小二乘法求对象的差分方程	350

第六章 系统的模拟研究

§ 6-1	电子模拟计算机的基本知识	358
§ 6-2	系统的模拟机研究法	364
§ 6-3	数字计算机计算频率特性和辅助选择调节参数	378
§ 6-4	数字计算机模拟系统的动特性	384

第七章 近代控制概述

§ 7-1	引言	395
§ 7-2	矩阵代数	398
§ 7-3	系统的状态空间研究法	403

§ 7-4	采样系统的状态方程式和求解	411
§ 7-5	动态最佳控制的描述	416
§ 7-6	动态规划方法	419
§ 7-7	最大值原理	424
§ 7-8	静态最优控制的数学模型法	427
§ 7-9	静态最优控制的在线搜索法	429
§ 7-10	自适应和自学习控制系统	431

附 录

附录一	拉氏变换、 Z -变换对照表	436
附录二	二阶系统中几个参数的相互关系	440
附录三	$f_1(\alpha)$ 、 $f_2(\alpha)$ 与 α 的关系	441
附录四	一般化对象 Z -传递函数系数的识别	442

第一章

自动调节的基本原理

在工业生产或科学实验中,我们经常会碰到这样的情况:加热的电炉要求恒温,不能随电源电压波动或炉内物体的变化而变化;或者有的热处理炉的炉温要求按照某个指定的升温或保温规律而变化;等等。因此,在工业生产或科研中就常常需要对某些参数不仅需要不断测量,而且需要进行控制,要求它们能恒定在某一范围内,或是按某些规律变化。要达到这样的目的,就必须对某些工业参数随时进行调节。凡人工来保持某些参数(一般是物理量)达到规定值或按某一特定的规律来操作的称人工调节,而采用仪表、自动装置在没有人直接参与下实现使这些参数达到规定值或按某种规律变化的操作则称为自动调节。对于实现自动调节功能的装置,包括被调节对象在内总称为自动调节系统,简称自调系统。

本章介绍自动调节系统的基本原理将只局限于测量和控制的信号都是连续变化的系统。至于离散的采样控制系统将在第四章中讨论。

§ 1-1 自动调节系统概述

很多自动调节方法的实现,都由人工调节启发而得到,下面我们先举例来分析一下人工调节的过程。

机电工业中常用的原材料——矽钢片在热处理时需要较长时间(一般几小时以上)的保温后,才能达到预期的性能。如矽钢片在处理过程中需要10个小时连续恒温在 $680 \pm 5^{\circ}\text{C}$,通常是用感应调压器来对退火炉供电。此时人工调节的任务是克服外来种种干扰(例如,电源电压的波动,车间环境温度的变化等),使矽钢片的

温度满足保温阶段的要求。其人工调节的具体过程如下：

(1) 观察由测量元件测出的炉温；

(2) 与要求的温度值进行比较，得出偏差情况，根据偏差再进行控制：若炉温高于 685°C ，则转动调压器，朝着减小加热电流的方向，使炉温降到正常范围内；若炉温低于 675°C ，则转动调压器，朝着加大加热电流的方向，使炉温升到正常范围内；若炉温处于 $680 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 内，则不动调压器。

可见，在上述的人工调节过程中，必须有一个测量元件（例如测温的热电偶元件）和一个受人工操作的元件（例如调压器），而人则把实际的炉温和要求的炉温进行比较，从而得出它们之间的偏差大小和正负。然后，根据这个偏差情况，判断出如何去操作调压器，是增加加热电流还是减小加热电流？最后就去操作调压器。因此，人在这个过程中起了测量、比较、判断、操作的作用，可见人工调节过程实质就是“检测偏差，纠正偏差”的过程。

倘若有一些能自动完成上述人工调节中几个动作的装置或元件，则人工调节就有可能成为自动调节，图 1-1 所示的就是这样一种电炉炉温的自动调节系统。

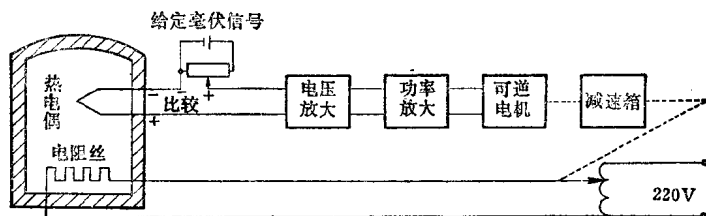


图 1-1 电炉炉温自动调节系统

在此调节系统中，热电偶用来测出炉温，即将炉温转变成毫伏电信号和给定毫伏信号*进行比较，相减之差即为实际炉温和要求炉温偏差的毫伏信号，经电压放大和功率放大后，选择适当的极性驱动可逆电机，就可当炉温偏高，使调压器减小加热电流；反之，加大加热电流。从而完成自动调节炉温的任务。

* 对应于温度 680°C 的毫伏值约 27.2mV 。

但须注意,实际生产工艺对参数要求调节的精度总是有限的,另外上述系统中各组成部分都有些不灵敏区,因此不必也不会一有偏差就使电机转动,进行调节。适当调节电压放大倍数,使炉温在 $680 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围内功率放大输出很小,电机不能转动,系统不起调节作用。则上述的系统只是一个能完成 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 调节精度的炉温自调系统。

通过上面分析可以看出,不论是人工调节还是自动调节都是基于“检测偏差,纠正偏差”这样一个原理,没有偏差便没有调节过程,根据这个原理实现自动调节的系统称为按偏差的自调系统。通常所称的自调系统就是指这一类。

为了便于下面的讨论,我们在这里先介绍几个自调系统中常用的术语:

被调量(或称输出量) 指被自调系统调节的物理量等(如上面的炉温),一般就是自调系统的输出量。若一个自调系统只调节一个物理量,则此自调系统称单变量自调系统,调节两个以上物理量的称为多变量自调系统。

被调对象(或简称为对象) 指被调节的物理量相应的那个生产过程,或者进行生产过程的设备、装置等(例如上面的电炉)。

给定值(或称给定信号) 根据生产要求,被调量需达到的数值(例如上面要求炉温值 680°C 或对应的毫伏值 27.2mV)。

扰动(或称干扰) 指引起对象中被调量变化的各种外界原因(如上面的电源电压波动等)。

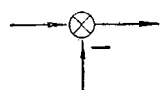
输入量 泛指输入到自调系统中的信号,包括给定值和扰动。

反馈 将输出量的全部或一部分信号返回到输入端称为反馈。反馈的结果若是有利于加强输入信号则称为正反馈;反之,其作用减弱的则称为负反馈。在自调系统中主要应用的是负反馈。

闭环与开环 系统输出的被调量和输入端之间存在着反馈回路的系统称为闭环系统;反之,被调量并未以任何形式反馈到输入端的则称为开环系统。

使用这些术语后,可将图 1-1 简化成图 1-2 形式。由于我们

研究系统最关心的是调节过程的工作原理,亦即信号传递的情况,而并非注重系统中各个组成部分结构的情况,因此图 1-2 中只用方块图表示各组成部分,并在方块中注明它所表示部分的名称或功能,即可不必画出该部分的具体结构。另外,信号的传递也不必画上两条线,而用一根带箭头的直线就可说明信号的传递。这样的图叫做系统结构方块图(简称方块图)。图中

的图叫做系统结构方块图(简称方块图)。图中  代表比较器,其中“-”(“+”)表示两信号相减(相加)。方块图两边的直线及其注标表示该组成部分在调节过程中与其他部分发生相互作用的物理量,箭头表示作用的方向。注意,这带箭头的直线,仅表示物理量的信号传递,丝毫不表示过程中物料的流向或能量转换。

系统结构方块图清楚地表明了系统中各组成部分间的关系,信号传递的过程,这对于了解系统调节过程的工作原理来说是一种简单明了的方法,因而它被广泛地应用在分析自调系统中。以后,我们还会看到,当在系统结构方块图中注标上它所代表部分的动态性能(即信号传递的运动情况)时,就成了分析系统动态性能的“系统动态方块图”。

由图 1-2 也可以看到,各组成部分间的相互作用的物理量也就是这些部分在调节过程中的输入输出量,故被调量是系统的输出量,给定值(给定毫伏值)是系统的输入量,而偏差就是输出量经热电偶反馈到输入端与输入量相减后所得的量。这样图 1-2 系统

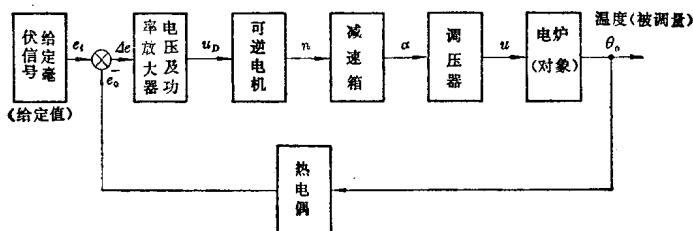


图 1-2 电炉炉温自动调节系统方块图

必存在负反馈回路，或者说按偏差自调系统必须有负反馈回路存在，它是一个负反馈闭环系统。图 1-2 表示的就是这样一类负反馈闭环系统。

为了更清楚地说明按反馈方法构成的闭环自调系统是具有普遍性的，并总可以用方块图来表示各类自调系统，我们再举一个采用可控硅的电动机调速系统的例子(图 1-3)。其中对象是电动机，被调量是电动机的转速，利用测速发电机来实现负反馈(称为测速反馈)。下面我们来看它的调节过程。

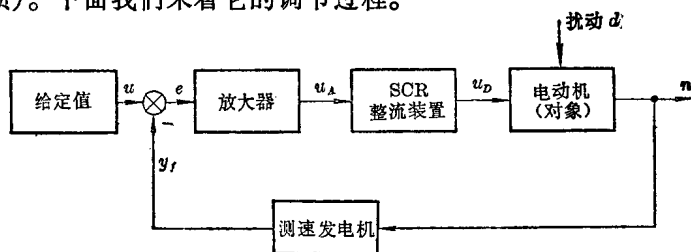


图 1-3 可控硅电机调速系统方块图

当给定某一转速的电动机正常运行时，若突然加大负载，电机转速 n 即下降，反映到测速发电机输出电压 y_f 下跌，与给定值 u 比较，偏差信号 $e = u - y_f$ 增加。于是经放大后使可控硅控制角前移，输出电压 u_D 增加。转速增加，因而补偿了刚才的下降，电动机又重新在一个新的平衡上稳速运行。另外，如果输给可控硅整流装置的交流电压由于某种外界原因而有波动，例如下跌，则会使 $u_D \downarrow$ ，电动机转速 $n \downarrow$ ，有了测速反馈，同样可使 $e \uparrow$ 来促使 $u_D \uparrow$ ，补偿交流电压的波动。

我们把负载的变化，交流电压的波动……等统称为扰动，在方块图中有时为了方便起见，把扰动集中起来，用一条作用线作用在对象上。

从上面的两个例子可见，这里所讲的自调系统是一种按偏差的自调系统(通常称作自调系统)，它是基于“检测偏差，纠正偏差”的原理，其构成方法是反馈系统。

另外，这类反馈系统尽管所完成的调节任务不一样，如上面的

两个例子中：一是炉温调节；一是转速调节。它们的组成部分的具体结构虽然不一样，但这些组成部分从其完成“检测偏差，纠正偏差”这个调节过程的功能来看却是相似的。例如，热电偶和测速发电机都是起着测量被调量进行反馈的作用；调压器和SCR整流装置都起着改变被调量，即纠正偏差的作用等等。因此可以说，尽管起调节任务的反馈系统各不相同，但都是由一些功能相似的组成部分构成，这种起一定功能的各个组成部分，习惯上被称为构成系统的各功能元件。换句话说，这类反馈系统由一些功能相似的功能元件构成，这些元件包括下列几个方面：

(1) 要检测偏差，必须有测量元件，给定元件，比较元件。由测量元件测出被调量的实际值，经过一定的变换后成为反馈信号与给定元件给出的给定值在比较元件上得到偏差信号。

(2) 要纠正偏差，先得有这样一个元件，它能改变对象中引起被调量变化的那个量。如改变加热电流而使炉温变化的调压器；改变可控硅输出电压而使电机转速变化的SCR整流装置，就是这样的元件。为了推动上述元件，有时还要有足够功率输出的元件（功率放大），把这二种元件联起来就能完成人工调节时的手动操作的任务，具体起着纠正偏差的功能，被称为执行元件。执行元件输往对象的信号起着调节和控制被调量的作用，统称控制信号（在生产过程仪表控制中，习惯上也称作操作量）。

(3) 往往由于检出的偏差，还不足推动执行元件，因此还要有放大和模拟人判断增加还是减小控制信号来改变被调量，以及用什么速度来改变控制信号使调节过程加快等动作的调节元件。

归纳起来，上述的自调系统可看成由下列方块图构成（图1-4）。由于自调系统的任务就是使被调量不受扰动影响保持在要求范围内或依一定规律变化，因此在研究一个自调系统方块图时，必须考虑扰动的影响，故图1-4中还表示出了作用到对象上去的除控制量外，尚有扰动量。另外，我们还把被调量到反馈信号这一自右向左的通道称为反馈回路，从给定元件到被调量这一自左向右的通道称为前向回路。

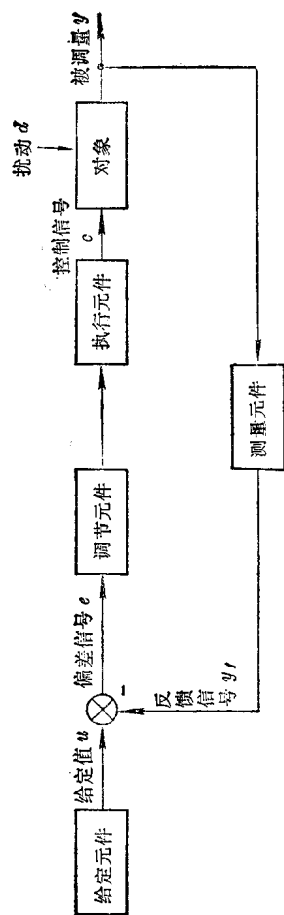


图 1-4 自动调节系统构成原理图



图 1-5 开环控制系统

再有,若将图 1-4 中输出端和输入端之间的反馈回路取除,则按定义就属于开环系统,如图 1-5。开环系统不对被调量进行测量和反馈,一般皆只是根据人的意志依一定的程序或规律来控制 and 调节被调量。这类开环系统的设计和研究主要是如何能执行预定的程序动作或完成一定曲线形状的加工,因此它和闭环自动调节的研究有较大的区别,为明确起见称它为开环控制系统,以免和我们讨论的自调系统混淆。

图 1-4 实质上是前述自调系统构成的原理图,也可称为自调系统构成的原则性方块图,它是自调系统所具有的共同点,但成为我们认识事物的基础的东西,则还必须注意它的特殊点,对于上面列举的二个自调系统中也有很多不同之处,首先是它们的给定值有的是恒定不变,或者是很少变化,且对变化速度要求不高(如炉温);也有的则是随时而变,特别是希望被调量能迅速跟随给定值变化(如某些调速系统或调相系统)。前者我们称为恒值自调系统,后者则称其为随动自调系统。在恒值自调系统中,由于给定值不变,系统是在对象被调量已调整在给定值时投入运行,此时系统的调节作用主要就是去克服扰动而引起的被调量偏离给定值的情况。而在随动系统中的调节作用,既要使被调量跟着给定值变化,又要克服扰动破坏被调量跟随给定值而变。

综上所述:一般所谓自调系统是一种按偏差的自调系统,是根据“检测偏差,纠正偏差”原理工作,并按照反馈系统方法构成。具体地说,由一些具有测量、比较、调节、执行等功能的元件和对象连成反馈系统构成;自调系统按其给定值是恒定还是变化的来分类,可以分成恒值和随动两类自调系统。

在上面叙述中,会发现系统的原则性方块图 and 实际系统图有一点不同,即上面二个实际的系统方块图中的放大元件,在原则性方块图中均用调节元件代替。采用调节元件而不用放大元件的原因前面没有说明,为了说明这一点,我们再来分析图 1-2 的炉温自调系统的调节过程。所谓调节过程,前面只是笼统说是被调量在扰动下偏离给定值后系统进行的“检测偏差,纠正偏差”的过程,而并

没有说明这个过程的变化情况，即被调量恢复原值或跟随给定值运动情况：是较快地还是缓慢地恢复或跟随；在恢复或跟随时是过冲了还是没有过冲；过冲大还是小；过冲后经过振荡稳定下来还是不稳定下来；振荡的频率是大还是小；恢复或跟随的精度（误差）是高还是低等等。但对于了解一个自调系统的调节过程的这些情况恰恰是主要的。因为一个自调系统具有检测和纠正偏差的能力是必然的，单有这种能力还并不等于就可完成自动调节的任务，主要还要看上述的这些调节过程情况如何。对于图 1-2 的系统，它的调节过程情况就不一定使人满意。例如在人工调节时会有这样的情况，当发现炉温由于某种原因而跌落很多时，我们会立即把调压器移到最大加热电流处，使炉温迅速回升，等到炉温由于热惯性而继续上升，甚至超过给定值很大。然而有经验的老师傅操作时就会在炉温快要接近原值时，就提前减小加热电流，避免过冲或使过冲不大，同时回升速度也不减慢，而且还会使炉温恢复到原值的时间缩短。因此调节过程好坏和老师傅操作经验有关。如何在自调系统中也反映这类问题，单靠系统中放大元件来处理偏差信号，给出和偏差信号成比例的加热电流是得不到好的调节过程的，只有引入能模仿人工操作经验的功能元件才能得到好的调节过程。这种功能元件如前述称为调节元件。当然，有了调节元件并不等于系统调节过程一定就好，正如人工调节时的操作经验还要随对象的不同而不同，例如对象是电炉还是电机，即使是电炉，是大炉子还是小炉子，即提前减小加热电流的时间就应该不一样。因而调节元件也应该因不同对象而不一样，倘若配合不当，就不会得到好的调节过程。可见，同样是负反馈调节系统，有的调节过程好，有的就差些，或是来回过冲多次工作很不稳定，甚至不能正常工作。

因此，分析研究一个自调系统的目的就是要分析它的调节过程情况，而调节过程情况又可通过反映它好坏的一些性能指标来表示。这样就必须要分析研究自调系统的各项性能指标，这些指标包括是否稳定、精度（误差）、纠正偏差的快速性、在纠正偏差过程中被调量的振荡情况等。这些将在下面进一步讨论。

设计一个自调系统(有时称为自调系统的综合),主要是根据要求的设计指标,针对给出的具体对象,执行元件的特性来设计调节元件或其他辅助回路。而要进行自调系统的设计,必须先要了解分析研究自调系统的方法,否则就不可能把设计指标和具体的系统联系起来。因此,本章将讨论系统的分析,而在下一章再介绍系统的设计。

§ 1-2 自调系统的特性和微分方程分析研究法

一、自调系统的过渡过程

前面谈的调节过程概括起来就是指在扰动变化下(或给定值变化下)被调量偏离原值和调节作用下恢复原值(或跟随给定值)这样一个变化的过程。而对于恒值自调系统,它的调节作用主要是克服扰动对被调量的影响,则它的调节过程主要是指扰动引起的调节过程,这个调节过程也就仅指被调量在扰动下偏离原值和调节作用下恢复原值的一段变化过程。因此可以说研究自调系统的过程就是研究被调量在扰动下的变化过程,假如系统有一个突然的扰动,如电炉中电源突然跌落、炉门的突然打开、电动机负荷突然增加等。同时若系统中各元件又都无惯性,则调节过程便会这样:突然的扰动引起被调量突然的变化,即突然出现了偏差,突然改变执行机构,使被调量立即回到原值,在这一瞬间被调量好似没有发生过任何变化。但事实上,这样的调节过程是不可能的。因为系统中各元件,特别是对对象多少都有惯性,因此过程就不会在突然的一瞬间开始而又结束。在工业生产过程中实际的情况一般总是突然的扰动引起被调量缓慢的变化,因而缓慢地出现了偏差,即使此偏差能立即推动执行机构,但由于工业对象的惯性比较大,被调量不能立刻,只能缓慢地回到原值。这样,被调量在突然扰动下会出现一个变化过程(调节过程),亦称过渡过程。在过渡过程中当被调量偏离给定值时,倘若对象的惯性很大,同时对调节系统调节得又不及及时,致使被调量将仍继续向增大偏差方向变化,在过渡

过程中造成过大的偏差,使恢复原值的时间拖长,甚至出现为正常生产所不允许的调节过程。因此,了解系统在扰动影响下的过渡过程的情况是很重要的,也是研究恒值系统的主要内容。对于随动系统来说,则除了考虑扰动影响外,还得着重考虑过程中在给定值发生变化时,输出被调量跟随给定值变化的情况。后者也是一种过渡过程,同样是十分重要的。

二、自调系统的动特性和静特性

当扰动或给定值发生变化时,被调量将偏离原来的稳定值,系统的调节作用又将使它趋近于回到原来的稳定值或跟随给定值稳定下来。因此被调量的变化总是先偏离原稳定值经过一段变化过程,然后趋近原稳定值或新的给定值,也就是说系统在任一输入作用下,紧接着就引起过渡过程,经过一段时间后,过渡过程结束,系统恢复到稳定状态,因此整个调节过程可以分为两个阶段:前一阶段的特点是被调量处于变化状态的过渡过程,它代表系统的动特性;后一阶段被调量处于某一稳定状态的静态过程,它代表系统的静特性。因此研究被调量变化过程的问题,就变成研究系统动特性和静特性的问题了。

如果知道系统中被调量和输入量(扰动或给定值)之间的数学关系式,则就可知道在任一输入下的被调量,即知道了被调量在任一输入量下的动态和静态过程,因此可用系统的被调量(输出量)和输入量之间的数学关系式来描述系统的动、静特性。例如当输入为某一函数,则对应的输出就称自调系统的某一过渡过程函数或某一响应函数。另外若将过渡过程函数用曲线来表示,则该曲线称为系统的过渡过程曲线。用它来表示系统动、静特性的优点是简单明了。

究竟用对应什么样形式的输入信号下的一组输出过渡过程函数或过渡过程曲线来描述呢?是否有必要把任一输入下(即任一扰动或给定值)的过渡过程函数或曲线都求出来描述系统的动、静态特性?这样做太复杂,也没有必要。因为我们总可以找到一种典型