

# 自動調節原理

刘 豹

— 上 册 —

天津大学精密仪器系工业控制仪表教研室

1961.9



# 序

自动调节原理是研究和设计自动化系统的理论基础。本书原稿曾在天津大学精密仪器系化工自动化和热工仪表两专门化作为教材使用过多年，并作过多次修改。本书基本上是参考苏联索洛多夫尼各夫主编的自动调节原理体制编排的，全书以频率法为主干，对自调原理中频率法的应用介绍得较为详细。当然，为了使同学有较广的知识面，也引入了必要的其他方法。

本书的内容较多，使用时可按本课在教学计划中的学时，以及专业培养目标，酌为选取。按作者的經驗，提供下表所列的教学时间，以供参考。

| 章 次   | 学 时    |
|-------|--------|
| 第 一 章 | 2—4    |
| 第 二 章 | 5—7    |
| 第 三 章 | 4—6    |
| 第 四 章 | 10—14  |
| 第 五 章 | 13—17  |
| 第 六 章 | 10—16  |
| 第 七 章 | 12—16  |
| 第 八 章 | 10—14  |
| 第 九 章 | 14—20  |
| 总 計   | 80—114 |

对于仪表专业，自动调节原理是设计闭网随动系统的基础，所以第八章和第九章可取上限，而第七章可取下限，对于生产过程自动化专业，第八章和第九章可取下限，而第六章，第七章可取上限。如果学生在学习本课以前，已有足够的数学知识，则第三章和第八章都可取下限或更少。

学习自动调节原理，一定要多做习题，本书没有附录习题，但可参阅[42]、[43]。作者建议，在每章讲授过程中，可适当分配家庭作业，其内容如下：（1）无量纲方程式的推导；（2）频率特性的绘制；（3）传递函数的运算；（4）应用对数频率特性判定系统的稳定性；（5）利用稳定区域法判定系统的稳定性；（6）判定有纯滞后的系统的稳定性；（7）利用频率法鉴定系统的素质；（8）从频率特性曲线绘制过渡过程；（9）按给定素质指标综合自动化系统；（10）用相关函数计算对象的动态特性；（11）用相轨迹法研究非线性系统的自振；（12）谐波平衡法的应用。

如果有条件，可作占20学时的大型习题，其内容可按专业性质不同而选定。作者建议，对于生产过程自动化专业，可作一个单网自动化系统的设计；对于仪表专业，可作一个考虑随

机訊息的随动系統的設計。

要使学生更深入地掌握自动調节原理，必須进行有关自动調节原理的實驗。同时，从自动調节学科本身的发展来看，調节理論中的實驗方法占有很重要的地位。因此，作者建議进行下列內容的實驗：（1）应用模拟装置进行元件、对象或閉网系統的过渡过程測繪工作；（2）利用动态試驗仪，或其他形式的正弦波发生器測取元件或对象的頻率特性；（3）利用模拟装置来調整閉网自动化系統；（4）应用相关函数器測取对象的动态特性。

本书編写匆忙，一定有不少錯誤，同时在內容的編排和取舍上，都可能有不适当之处，希望应用本书的教师与学生，提出珍貴意見，以便在再版时，得以修正。

刘豹 一九六一.夏.天津



# 自动调节原理目录

(上册)

## 第一章 概 論

- 1—1 自动调节系统的作用原理..... ( 1 )
- 1—2 自动调节系统的各种类型..... ( 3 )
- 1—3 自动调节原理的基本任务和內容..... ( 7 )

## 第二章 自动调节系统及其元件的特性和运动方程式

- 2—1 自动调节系统的特性..... ( 9 )
- 2—2 静态特性..... ( 10 )
- 2—3 运动方程式的列写方法..... ( 15 )
- 2—4 增量方程式..... ( 19 )
- 2—5 方程式的线性化..... ( 20 )
- 2—6 无量纲运动方程式..... ( 22 )
- 2—7 推演自动调节系统及其元件运动方程式的实例..... ( 24 )

## 第三章 自动调节系统线性运动方程式的解求和研究方法

- 3—1 自动调节系统的自由振荡和强制振荡、频率特性..... ( 34 )
- 3—2 在任何周期扰动下的强制振荡, 富氏积分和富氏变换..... ( 40 )
- 3—3 拉氏变换..... ( 43 )
- 3—4 传递函数、脉冲过渡函数和单位过渡函数..... ( 52 )

## 第四章 自动调节系统的组成元件及其耦合

- 4—1 自动调节系统组成元件的分类..... ( 55 )
- 4—2 非周期元件..... ( 55 )
- 4—3 振荡元件..... ( 60 )
- 4—4 积分元件..... ( 65 )
- 4—5 放大元件..... ( 68 )
- 4—6 一阶导数元件..... ( 68 )

|      |                       |        |
|------|-----------------------|--------|
| 4—7  | 二阶导数元件.....           | ( 69 ) |
| 4—8  | 滞后元件.....             | ( 70 ) |
| 4—9  | 元件的各种耦合.....          | ( 72 ) |
| 4—10 | 求自动调节系统传递函数的实例.....   | ( 83 ) |
| 4—11 | 自动调节系统的各种形式的传递函数..... | ( 85 ) |

## 第五章 自动调节系统的稳定性

|      |                        |         |
|------|------------------------|---------|
| 5—1  | 稳定性的基本概念.....          | ( 90 )  |
| 5—2  | 罗斯侯维智稳定准则.....         | ( 92 )  |
| 5—3  | 米海依洛夫稳定准则.....         | ( 97 )  |
| 5—4  | 乃阔斯特稳定准则.....          | ( 101 ) |
| 5—5  | 利用对数频率特性分析稳定性.....     | ( 114 ) |
| 5—6  | 多网系统的稳定性.....          | ( 128 ) |
| 5—7  | 稳定余量.....              | ( 136 ) |
| 5—8  | 稳定区域法.....             | ( 138 ) |
| 5—9  | 具有滞后元件的自动调节系统的稳定性..... | ( 147 ) |
| 5—10 | 自动调节系统结构上的稳定性.....     | ( 150 ) |

# 第一章 概 論

## 1—1 自動調節系統的作用原理

在生产过程中，为了維持正常的生产常常需要将机器或設備中的某些参数值，以一定的精确度保持在某一定值上，或使它們随一定的規律变化。例如在一个气罐中进行变化的某一化学反应，要使它以最好的反应速度进行工作，必須将气罐中的压力維持在某一定值上。要做到这一点，最原始的办法是在气罐上装一个压力計 1（图 1—1），在进气罐上装一个調節伐門 2，操作工一方面随时观察压力計的讀数，看它是否和所需要的定值相符，然而作出判断，應該将調節伐門关小还是开大，另一方面就根据判断，开启或关小閥門，直到压力計的讀数附合給定值时为止。这种生产过程是人工控制的，人工控制的生产过程的劳动强度很大，工作單調，容易产生錯差，同时劳动生产率也不高。人工操作时，操作工不能远离生产設備或机器，因而很难保証操作工的安全，这对于某些必須在高温高压、有毒性气体等条件下进行生产的化学工业來說是特別重要的。此外，由于人的生理反应速度有限，对某些变化迅速，要求精度較高的自动控制系統，例如雷达的自动搜索系統，就完全无能为力。这时就必须采用自动調節。如果我們应用一个仪器，它一方面能随时感受气罐中的压力，並随时将此压力和給定值相比較，另一方面，它又能按比較的結果，以一定的力量去操纵調節伐門，这样，图 1 所示的必須操作工参加工作的人工控制系統就变成了图 1—2 所示的自动調節系統。气罐中的压力經过气管作用在膜 3 上，膜片受压就产生一个向下的作用力和彈簧 4 的反作用力相比較。当气罐中压力增大，膜片向下的作用力大于原始位置时彈簧的反作用力，就使伐門关小，这样进入气罐的气量就減少，使罐中压力不再上升。反之，如果罐中压力降

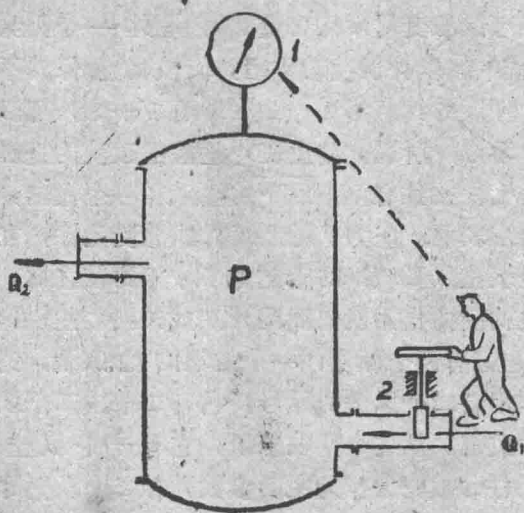


图 1—1

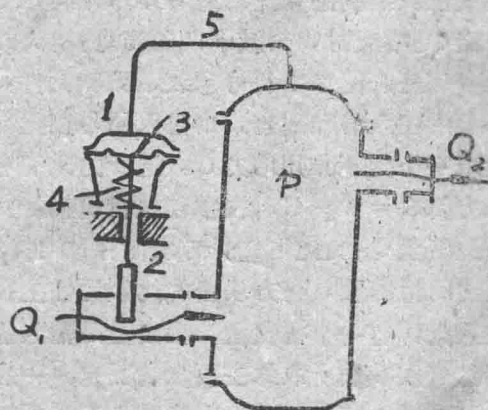


图 1—2



低，膜片向下作用力就小于弹簧在当时的反作用力，使伐門开大，这样进气量也增大，使气罐內压力不再下降。

从图 1—2 可以知道，要自动调节生产过程中的某一参数，首先要用测量仪表（或叫发送器、感受元件），把该参数测量出来，然而将测得的讯号送到调节器的比较元件中去和给定值进行比较。比较的结果就是系统中实际参数值和希望值間的誤差。这个誤差讯号在调节器中经过某种方式的运算和放大，使它具有—定的功率，再送入执行机构去控制伐門。伐門的启閉直接控制了进入气罐的气量，进气量和出气量相平衡时，气罐中的压力也就稳定在一定值上。由此可见，图 2 所示压力自动调节系統是由气罐、仪表、调节器和执行机构（伐門）四者构成的，其中气罐是被调节的对象，所以又简称对象。以后，为了便于分析自动调节系統的构成和其間各部分的相互連系起見，常常用若干方块来表示系統中的每一元件，方块的輸入訊号表示輸入該元件的各物理量（或化学量），方块的輸出訊号，同样表示該元件受到輸入量作用后引起的輸出反应。如图 1—2 系統的方块图就具有图 1—3 所示形式。气罐是

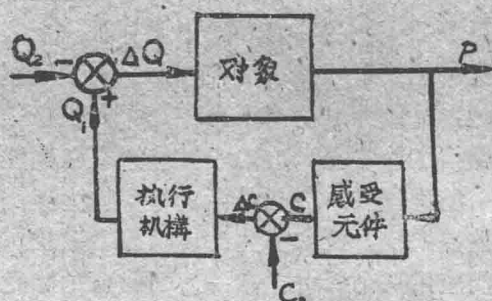


图 1—3

被调节对象，它的輸出量是被调节参数，或简称被調量，即罐中的压力  $p$ 。在任何一种自动调节系統中都存在着若干使被調量偏离給定值的原因，这些原因，通常都叫做扰动。在图 2 例子中，使被調量  $p$  发生偏离的主要原因是  $Q_2$  的变化， $Q_2$  的变化可能就是气罐的負荷变化或由于下一个工序中的压力变化而引起的变化。可以改变对象輸出量  $p$  的另外一个因素是  $Q_1$ ，它往往是自动控制的结果，是自动调节系統中賴以补偿扰动作用，使被調量保持不变的控制量。控制量和扰动量的作用方向往往是相反的，从图 1—2（即图 1—3）可以知道，当  $Q_2$  增大时， $p$  减小；而当  $Q_1$  增大时， $p$  增加。所以，真正使对象輸出改变的是  $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ 。图 3 中符号  $\otimes$  表示比较元件，这种元件往往有两个以上的輸入和一个輸出，輸出等于各輸入的和或差，由輸入訊号綫上的正負号表明。压力  $p$  通入膜片式感受元件，在膜上生成一个向下作用的力  $C$ ，这一力只有和給定装置（弹簧）的給定力  $C_0$  相比較之后，才有余力  $\Delta C = C - C_0$ ，去推动执行机构。执行机构受力作用就使閥門开启或关闭，並以此控制了进气量  $Q_1$  由此可知，方块图中的各个方块上都有两个訊号，一个是它的輸入量，另一个是它的輸出量。在方块图的比例元件上往往作用着二个以上的訊号，它有二个或二个以上的輸入量，有一个輸出量，輸出量是輸入量的和或差。从整个系統來說，它有一个以上的輸出量（視我們所取的主要参数而定，一般都以它的被調量作为主要参数）和二個以上的輸入量（在图 1—3 例中，这两个輸入量是对象的負荷  $Q_2$  和调节器上的給定值  $C_0$ ）。自动调节系統的作用就是按被調量  $p$ （即  $C$ ）和給定值  $C_0$  的偏差自动调节系統，使系統产生足够

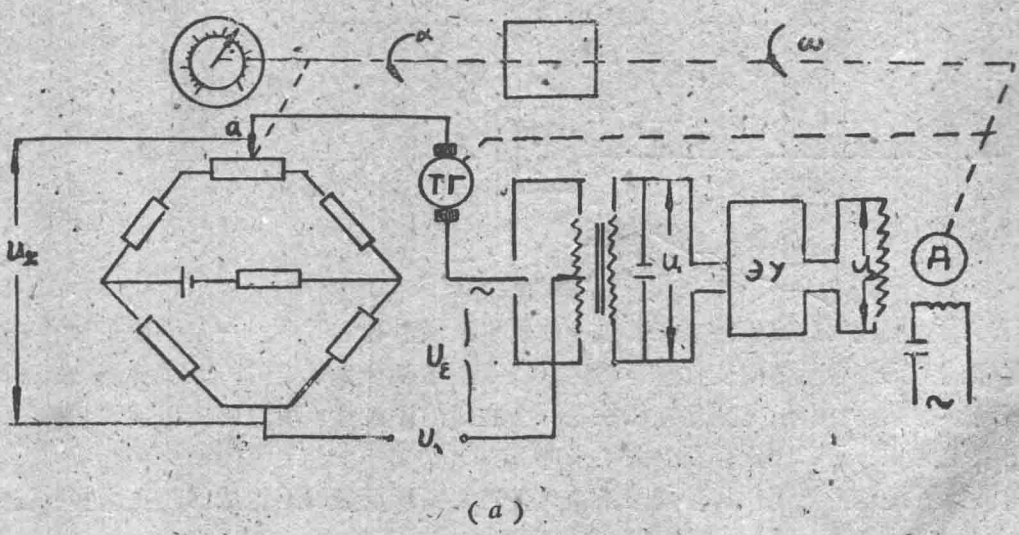
的控制量 $Q_1$ 去抵消扰动量 $Q_2$ 的作用，从而保持被调量 $p$ 在一定的精度范围内等于给定值。由此可知，系统的输出量 $p$ 一定要引回来和给定值相比较，再去控制系统，控制的结果（即 $p$ ）是随时利用这种反馈的方法来检查的。现代自动调节系统大多数都是利用反馈系统的原理构成的。

### 1—2 自动调节系统的各种类型

自动调节系统按其输入量和输出量间的关系，可以分成定值调节系统、随动系统和程序调节系统等多种。

象图 1—2 所示系统，输出量要以一定精确等于给定值，而给定值一般是不变的常数。这个系统的输入量是随时变动的负荷。所以这种系统就是定值调节系统。在生产过程中，定值调节系统是最常见的，例如保持蒸汽压力和质量一定不变的蒸汽锅炉自动调节系统，保持炉温不变的燃炉自动调节系统等等。

在另一类自动调节系统中，负荷的变化往往不是主要的输入量，而希望系统的输出量以一定的精度随给定值变化。这种系统叫做随动系统，随动系统的应用很广，如雷达的搜索，射电天文望远镜的跟踪；武器的自动瞄准等等都是具体例子。很多自动测量仪表本身也是一种随动系统，例如电子电位计，它的线路如图 1—4, a。系统的输入量是被测量的电势 $U_{入}$ ，当它不等于电位计两端 $ab$ 的电压降 $U_{出}$ 时，就形成了输出电压差 $U_e = U_{入} - U_{出}$ 。 $U_e$ 作用在振荡变压器上（不考虑 $U_e$ 线路中的测速电机 $\tau r$ ），使后者有一输出电压 $U_1$ ， $U_1$ 作用在电子放大器 $\text{ay}$ 上，转而变成可逆马达 $n$ 控制绕组电压 $U_2$ 。 $U_2$ 的大小和 $U_e$ 成比例，并按 $U_2$ 的方向来控制马达 $n$ 的旋转方向。马达 $n$ 的转速 $\omega$ 和 $U_2$ 成比例。马达输出轴通过减速齿轮和电桥的滑动接触头 $a$ 相连，使 $a$ 移动 $\alpha$ 。这样就使电位计 $ab$ 端所测电压值 $U_e$ 向接近 $U_{入}$ 的方向改变，直到 $U_{出}$ 重新等于 $U_{入}$ ，使电位计恢复平衡。另一方面， $\alpha$ 通过指示或记录仪表直接指出了被测量值 $U_{出} = U_{入}$ 。





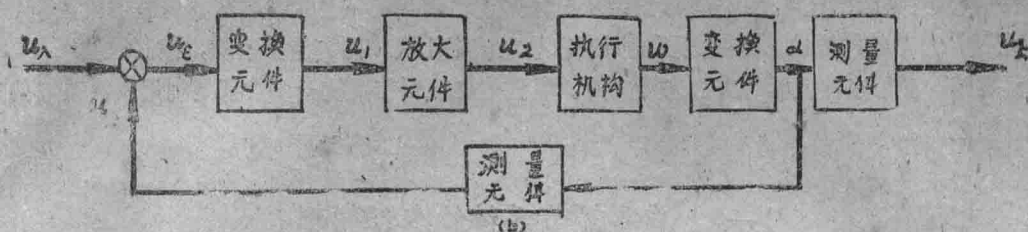


图 1—4

电位计一方面是一个测量元件,另一方面又起比较元件的作用,作用在电位计上的输入量之一是 $U_{\text{入}}$ ,另一个输入量是测量到的反馈量 $U_{\text{出}}$ ,所以在方块图(图1—4, b)上可以用比较元件及反馈线上的测量元件方块来表示。振荡交流器的输入是 $U_{\text{e}}$ ,输出是 $U_1$ ,可用一个署名为变换元件的方块来表示。电子放大器 $\text{ay}$ 是一个放大元件,它的输入输出量各为 $U_1$ 和 $U_2$ 。可逆马达 $\text{a}$ 是一个执行机构,它的输入输出量各为 $U_2$ 和 $\omega$ 。减速齿轮即输入是转速 $\omega$ ,输出是角位移 $\alpha$ ,所以它是一个变换元件。接触头的位移 $\alpha$ ,通过电子电位计就变成电压讯号 $U_{\text{出}}$ 。这样,就从系统的线路图化成了方块图。

象上面所述两种系统,都只有一根反馈线路,这种系统所构成的网路叫做单网系统。有时候,在图1—4 a所述的电子电位计中,为了改善它的特性,必须在电位差 $U_{\text{e}}$ 线路中串连一个测速电机 $\text{tr}$ ,用以将马达输出 $\omega$ 的变化率反馈回来,即测速电机的输出电压 $U_{\text{T}} = K \frac{d\omega}{dt}$ ,而 $U_{\text{T}}$ 再和 $U_{\text{e}}$ 相比较。这样,它的方块图就可化成图1—5形式。这种系统叫做多网系统。

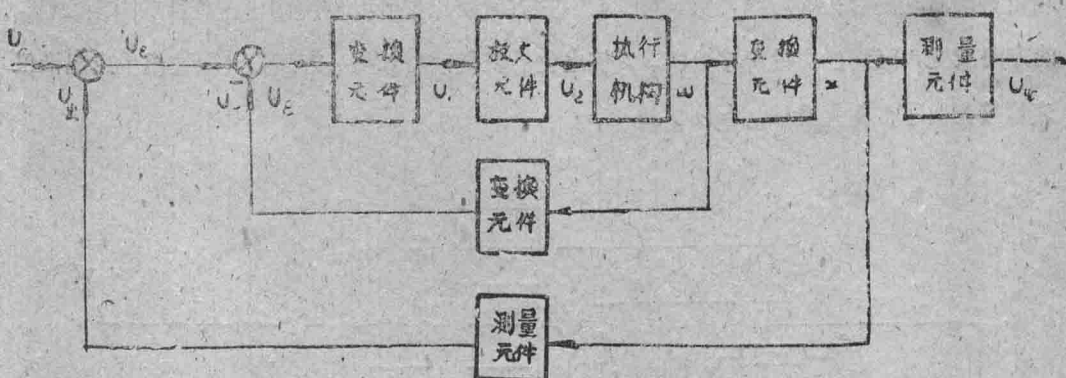


图 1—5

程序调节系统的给定值是按工艺过程的需要而设计得随时间以一定规律变动的。这种变化规律和随动系统中给定值变化规律的区别在于前者是预先确定的,而后者是未知的。此外,程序调节系统中,负荷变化也往往是一个主要的输入量。所以研究程序调节系统时应当从输出和给定以及输出和负荷两个关系来进行。

前面曾经提出过,现代自动调节系统大多数都是以反馈网路构成的。在这些系统中,被

調量被取回來和系統的給定值相比較所得的結果，即系統的偏差去形成控制量，從而抵消負荷的影響，使被調量保持在一定值上。在反饋控制系統中，產生控制量的主要因素是偏差，所以，這種調節系統，也叫做按偏差進行調節的系統。由此可知，在這種自動調節系統中是無法徹底消除偏差的，只是將偏差限制在一定允許值以內而已。如果系統的精確度問題特別重要，要比較徹底解決系統偏差的問題，就應當改變調節的方法。我們可以再研究一下前面舉過的定值調節系統（圖 1—2）的例子，是什麼原因使系統中被調量發生波動的？顯然，這是因為對象的負荷改變了如果我們隨時測量負荷，即圖 1—2 中的  $Q_2$ ，並以此變化  $\Delta Q_2$  為原動力去推動調節器和執行機構，使控制量  $Q$ ，也發生變化，以抵消負荷的變化（圖 1—6）。這種調節方案在理論上可以做到完全無偏差的調節。這種系統叫做按擾動進行調節的系統。它的方塊圖如圖 1—7 所示，從方塊圖顯然可知，被調量  $P$  並沒有最後的驗證，如果由於各種原因，它和所需值之間產生了偏差，系統也無法感到，因而也不能使它消除，這是按擾動進行調節的主要缺點。

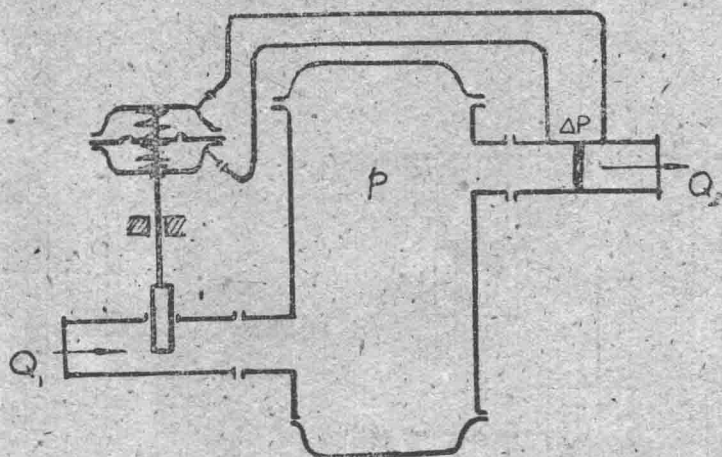


圖 1—6

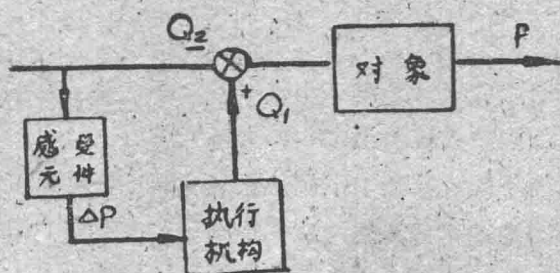


圖 1—7

結合按偏差和按擾動進行調節的兩種方法，優點，就形成了現代自動調節系統的新發展方向之一的複合調節系統。圖 1—8 就是按這種原理構成的自動化系統。它的方塊圖如圖 1—9 所示。

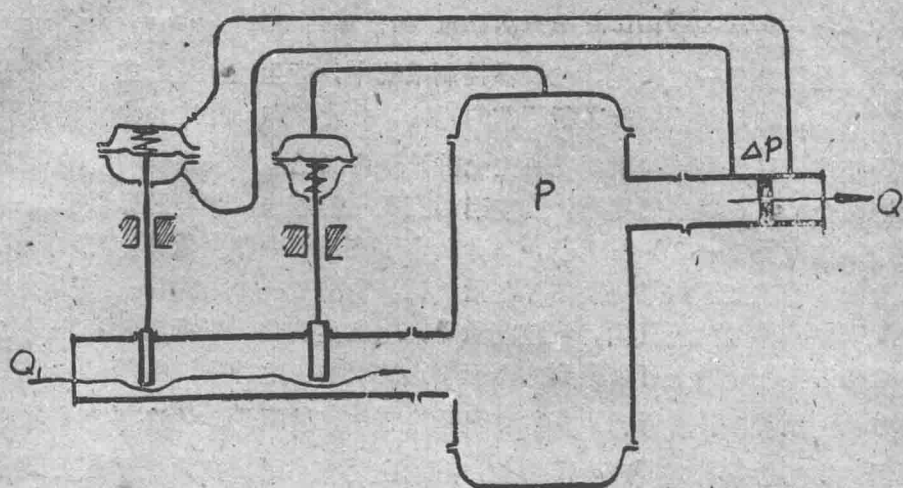


图 1—8

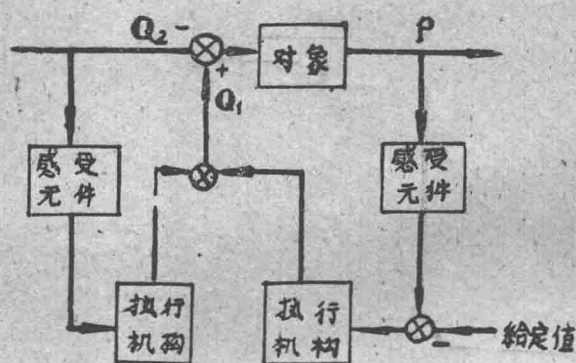


图 1—9

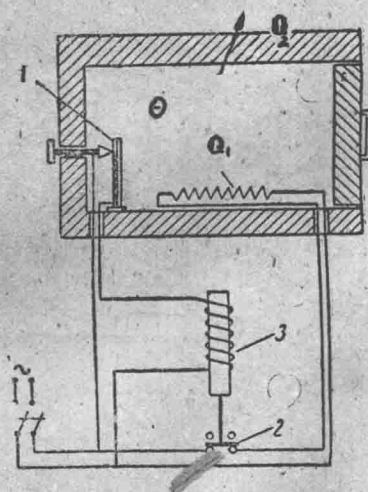


图 1—10

象前面所介绍过的各种自动化系统的例子中，系统中各元件前后的作用量都是连续变化的数量，这种系统都叫做连续调节系统。反之，如果系统中有一个以上的断续变量，这种系统就叫做断续调节系统。最简单的断续调节系统是两点式调节系统（又称继电器式调节系统），如图1—10所示电烘炉的自动调节系统就是一个例子。当炉温 $\theta$ 降低到一定值，双金属开关1将继电器2的励磁电路接通，使电炉通电。电炉的供热量为 $Q_1$ ，它大于烘炉的一般耗热量 $Q_2$ ，所以炉温又会逐渐回升。当 $\theta$ 回升到一定值时，双金属开关1又跳开，切断了继电器励磁电路，使电炉停电。这样，炉温又逐渐下降，由此可知，这种继电器控制系统的作用是不停地开关电炉，使炉温始终围绕所需值作允许的波动。它的方块图如图1—11所示，继电器的输出信号是一个断续量，所以它是一个断续调节系统。显然，断续调节系统所用控制元件的结构比较，它的动作比较可靠。



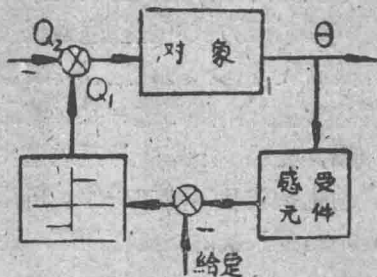


图 1—11

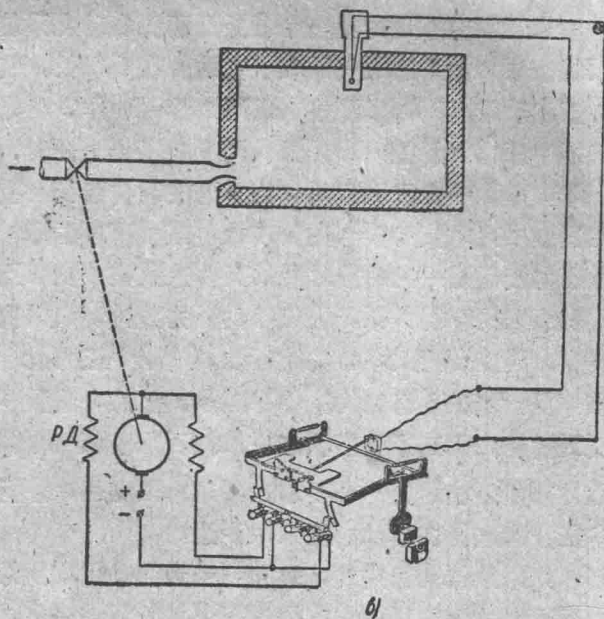


图 1—12

另一种形式的断续调节系统叫做脉冲调节系统，如图 1—12 就是一个例子。A 是等速回轉的凸輪。落弓 B 紧压在凸輪上，随凸輪轉动而上下升降。C 是測溫毫伏計的指針，它随炉 E 中溫度而摆动。当炉中溫度等于給定值时，指針停在中間位置，落弓上下升降並不碰到指針 C，水銀开关 D 以及其后的伺服电动机 F 等都沒有动作，系統处在平衡状态。如果炉溫降低，指針偏轉到图中所示位置，那么当落弓 B 周期性下降时，就会把 C 压下去，並且使水銀开关 D 轉动，将伺服电动机右边繞組接通。F 就依一定方向轉动，将燃料閥 G 打开，增加炉中热量。閥門开多大，进入炉中热量增加多少，决定于伺服机的轉动時間，亦即决定于在一个周期中，水銀开关閉合的时间。落弓 B 下面是有台阶的，指針偏轉愈大，落弓将指針就压得愈低，在落弓上升下降的周期中指針被压下的時間就愈长，这样在每一周期中水銀开关閉合的时间也愈长，所以閥門就开得大。

如果按自动调节系统工作的能源来分，則可以分成直接调节系统和間接调节系统。如图 1—2，1—6 就是直接调节系统，因为执行机构的原动力就是被調参数（压力、流量）。用在这种系統上的調节器也叫做直接作用調节器，它的构造簡單，动作可靠，但它的应用有限，只适用对象中有足够能源之处。

凡是应用外界能源，将被測参数訊号放大，或利用外界能源推动执行机构的自动调节系统是間接调节系统，应用在这些系統上的調节器叫做間接作用調节器。

### 1—3 自动调节原理的基本任务和內容

近年来，自动化系統的发展非常迅速，自动化系統在工业各部門以及国防方面应用得极为普遍。在实际設計自动系統中，已經累积了不少方法和經驗。在这些方法和經驗的基础上，自动调节原理已經形成一門独立的技术学科。总的來說，自动调节原理是分析、改进和

## 綜合自动化系統的理论基础。

自动調節原理的第一个任务是研究自动化系統的稳定性。以图 1—2 所示压力自动調節系統来看，如果連通气罐和膜室的管綫 5 很长，气压从气罐传播到膜室就需要一定時間，在气压波动传播到膜室以前，伐門 2 並無动作。由此可見，当对象中負荷增大（即  $Q_2$  增大），气罐中压力  $p$  馬上下降，但伐門 2 並不馬上开大，以致使  $Q_1$  不能馬上和  $Q_2$  相平衡， $p$  繼續下降。等到一定時間以后，当  $p$  的波动传播到膜室以后，才使伐門 2 开大。当伐門开大到一定程度后，才使  $Q_1 = Q_2$  使气罐中压力不再下降，但这时气罐中压力很可能已达最低值。这个压力值經過一定传播時間后又传达膜室，使伐門开大，因而使  $Q_1 > Q_2$ ，这样，就破坏了系統原来的平衡关系，使气罐內压力上升。气罐內压力的这种上升，要經過一定時間再传达膜室，再使伐門关小。由此可知，气罐中压力就会上下升降，波动不已。这种系統已失去調節作用，处在不稳定的条件下工作，显然，这种不稳定自动化系統是不能工作的。所以系統受到扰动，偏离了平衡状态以后能否重新恢复平衡的問題，就是系統的稳定性問題。稳定性是自动化系統的第一个要求，必須給以滿足，分析系統稳定性就是自动調節原理的第一个基本任务。这将在本书第五章中讲述。

如果系統是稳定的，那么它受到扰动以后，最后一定会重新平衡下来，这中間需要一个过程，叫过渡过程。在这个过程中被調量在变化，当然这种变化和整个过程都随外作用不同而不一样，但是我們都希望过渡过程經歷的時間愈短愈好。在过渡过程中間，被調量变化的最大值不能过大，以及在重新平衡后被調量和規定值相差应在允許范围内。这些对系統从一个平衡状态到另一个平衡状态的过渡过程的要求，是对系統性能上的要求，就是系統的质素問題。关于分析系統质素的問題，即研究系統在过渡过程中的动态、如何提出各种质素指标來說明质素的各个方面以及用什么方法分析质素指标等等問題，都将在本书第六章中介绍。

如果系統承受連續变动的外作用，或随机过程形式的扰动时，系統就根本沒有平衡状态，它永远处在变动的过程之中。这样平衡状态和过渡过程的概念就失去意义。这时用来衡量系統动态的重要指标是被調量和給定值的偏差值，这就是所謂系統的动态精確度的問題。这一問題需要应用統計动力学的方法来介决，将在本书第八章論述。

自动調節原理的任务除了分析系統的稳定性、质素和动态精確度以外，还必需根据对象的特点，以及系統所希望具有的各种特性，恰当地选定自动化系統的結構、元件和它們的参数，这就是自动化系統的綜合問題。这将在本书第七章介绍。在自动調節原理中，綜合問題研究得还不够全面，目前很多設計方法还是基于試算法，而且結果都只是近似的。所以，綜合后的系統必須經過試驗和調整。

自动調節原理的另一个任务是发展它的实验方法。模拟技术（包括物理模拟和数学模拟）是設計現代自动化系統时必不可少的实验手段，而且目前有将模拟技术裝置設計到自动化系統里面去的发展趋势。数字計算不但可以介算自动化系統中某些繁复的演算公式，而且是构成脉冲自动調節系統的中心环节。

本章参考資料，可查閱 [1]、[2]、[3] 第一章及緒言，以及 [4]。

## 第二章 自动調節系統及其元件的特性

### 和运动方程式

#### 2—1 自动調節系統的特性

我們已經知道，自动調節的作用就是使系統的輸出量和輸入量之間，保持我們所要求的一定函数关系，如图 1—4 的自动电位計的作用是使系統輸出  $U_{出}$  跟隨輸入量  $U_{入}$  变动，力求  $U_{出} = U_{入}$ ；又如图 1—2 所示压力調節系統的作用是維持系統輸出量，即气罐中的压力  $p$  为一常数，不受負荷（即  $Q_2$ ）变化的影响。系統輸出量和輸入量間的种种关系，統称为系統的特性。

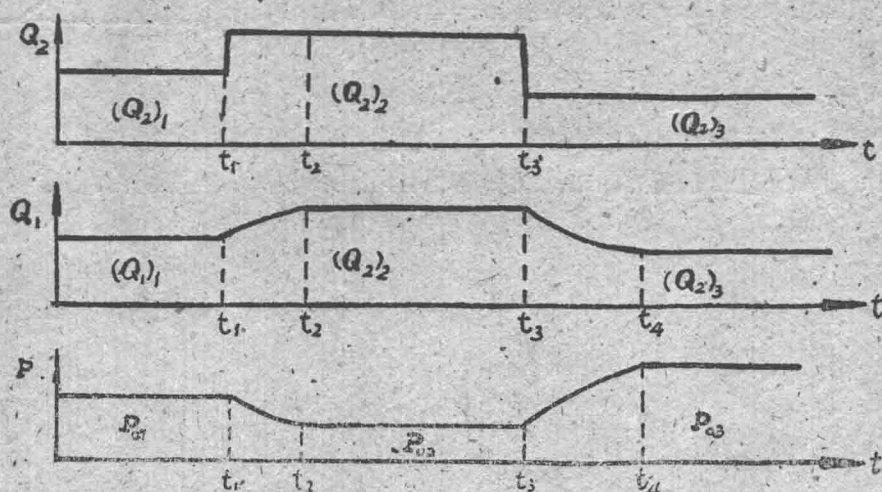


图 2—1

要研究系統的特性，首先要設法描述这些特性，最直接的描述方法是应用系統輸出量和輸入量和時間的关系曲綫。以图 1—2 所示压力調節系統为例，在从  $t = 0$  到  $t = t_1$  一段時間內，設系統負荷为某一定值，即  $Q_2 = (Q_2)_1$ ，如果这时系統处于平衡状态，則  $Q_1 = (Q_2)_1$ ，系統輸出量  $p$  也为某一定值  $p_{01}$ 。这种情况，可以用图 2—1 中  $t = 0$  到  $t = t_1$  間段內三条参数綫  $Q_2$ 、 $Q_1$ 、 $p$  来表示。在  $t_1$  时，由于某种原因使得負荷改变了，即  $Q_2 = (Q_2)_2 > (Q_2)_1$ 。这时，气罐中压力就会逐漸下降，其結果使伐門打开，因而使輸入气量  $Q_1$  也逐漸上升，直到  $Q_1 = (Q_2)_2$ ，系統达到新的平衡状态。这一期間中  $Q_2$ 、 $Q_1$  和  $p$  的变化可从图 2—1 中  $t = t_1$  到  $t = t_2$  这一間段的曲綫看出。如果在  $t = t_3$  时， $Q_2$  又因某一原因减小为  $(Q_2)_3 < (Q_2)_1$ ，則系統又失去平衡，气罐中压力逐漸上升，因而伐門关小，使进气量  $Q_1$  也逐漸下



降，直到 $Q_1=(Q_2)_3$ 时为止，系统才恢复平衡状态。这时，系统输出量 $p=p_{03}$ 也保持不变。 $t_1$ 到 $t_2$ 以及 $t_3$ 到 $t_4$ 这两段时间内 $p$ 的变化曲线，就描述了系统的过渡过程，即描述了系统的动态特性。在0到 $t_1$ ， $t_2$ 到 $t_3$ 以及 $t_4$ 以及 $p$ 和 $Q_2$ 的关系（即其比值）就描述了系统的静态特性。

为了便于用理论方法来研究自动调节系统，所以用数学方程来描述系统特性的方法更有普遍性。一般说来，描述系统特性的数学方程的介，就是图2—1所示系统的时间特性曲线。关于如何演化描述系统特性的数学方程的问题，将在本章后几节说明。

## 2—2 静态特性

### 1. 静态特性的表示方法

静态特性是指系统或其元件在平衡状态下，它们的输出量和输入量的关系。以图2—1所示压力调节系统为例，可以见到，当输入量为 $Q_2=(Q_2)_1$ ， $(Q_2)_2$ 或 $(Q_2)_3$ 时，其输出量分别为 $p=p_{01}$ ， $p_{02}$ 或 $p_{03}$ 。如果以输入量 $Q_2$ 为横坐标，以输出量 $p$ 为纵坐标，就可以得到如图2—2所示的一条直线关系。这一关系很容易用一个代数方程来表示，即

$$p = K_1 - K Q_2 \quad (2-1) \quad \text{图 2-2}$$

式中 $K$ 是决定其比例关系的常数值。系统的静态特性是取决于构成系统的诸元件的静态特性的，图2—3所示是应用在压力调节系统和电子电位计系统中的某些元件的静态特性曲线。

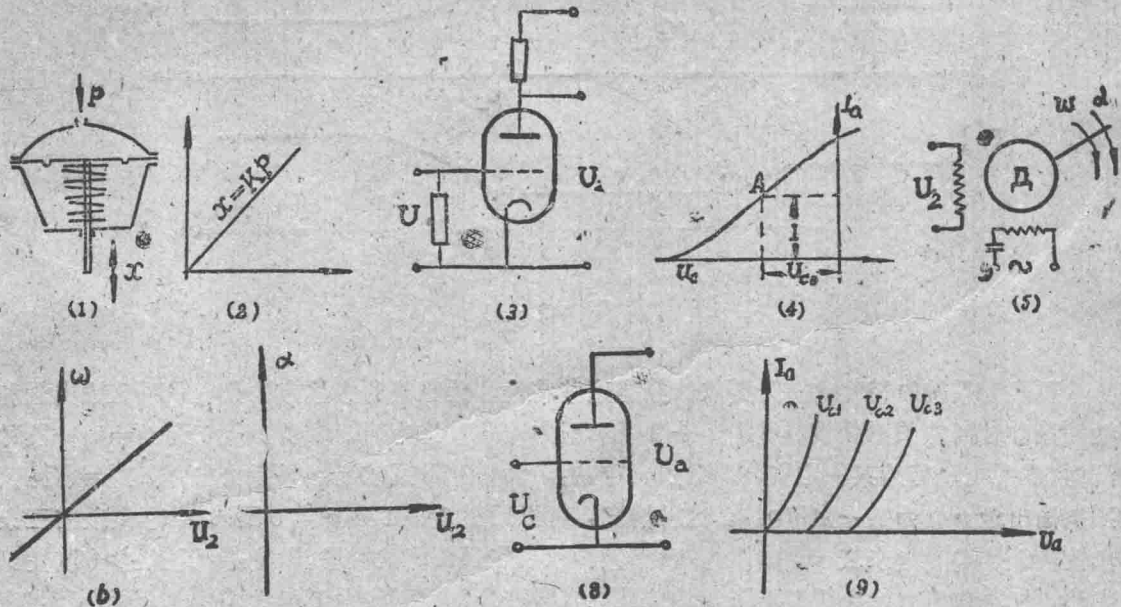
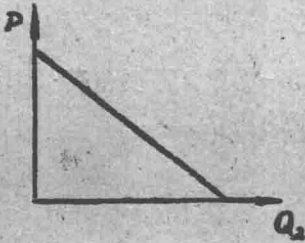


图 2—3

图2—3 (1) 是气动膜式执行机构，当膜室中压力 $p$ 增大或减小时，使膜杆发生上下

位移  $x$ ，位移，即元件的输出量的大小和元件的输入量，即压力  $p$  的大小成比例，其关系如图 2—3 (2) 所示。电子管放大级，图 2—3 (3) 的输入量是电压  $u_1$ ，它的输出量是电压  $u_2$ ，它們在一定的范围内也有比例关系，如图 2—3 (4) 所示。图 2—3 (5) 是两相可逆马达，输入量是绕组端电压  $u_2$ ，输出量是马达转子轴的角速度  $\omega$  或其转角  $\alpha$ 。当以角速度  $\omega$  为输出量时，它的静态关系如图 2—3 (6) 所示，也是一条比例关系线，但是如果把转角  $\alpha$  当作输出量，则该元件就没有一定的静态关系，因为在任一个  $U_2$  值下， $\alpha$  都是随时而变的。图 2—3 (8) 是一个电子管，它的输入量是栅压  $u_c$  和阳极电压  $u_a$ ，输出量是阳极电流  $I_a$ 。只有在一定的栅压下，即  $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}$  等，才可得到一定的阳极电流和阳极电压间的关系，如图 2—3 (9)。

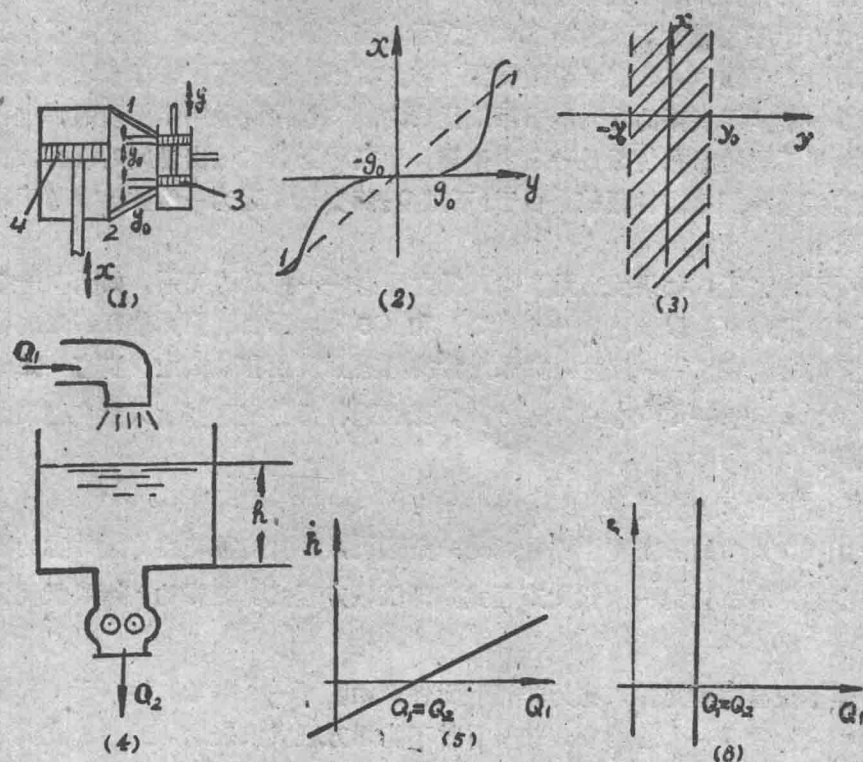


图 2—4

在自动化系统中还有一些具有比较特殊的静态特性的元件，如图 2—4 (1) 所示的液动伺服机。控制伺服机的阀可上下移动，当它处在图示位置时，阀将通向执行机构的两油路 1 和 2 完全堵住，活塞 4 没有动作，即  $x = 0$ 。当阀上下移动的位置  $y$  大于  $y_0$  时 ( $y_0$  是阀活塞将油孔让开所需的位移)，供油才能进入油管 1 或 2，同时执行机构油缸中另一部分的油液也才有可能从油管 2 或 1 洩出。在这种情况下，活塞 4 才开始移动，即  $x > 0$ 。 $y$  愈大，进油和洩油孔道也愈大，故推使活塞升降的速度也增大。以活塞速度  $\dot{x}$  为输出量，以阀位移  $y$  为输入量的静态特性关系如图 2—4 (2) 所示。如果以活塞位移  $x$  为输出量，则得图 2—4 (3) 表示的一个区域，在该区域内的每一点，都可能是元件输出量和输入量间的关系，这就是说，当  $|y| < y_0$  时，元件处在平衡位置，活塞 4 可能在它行程范围内的任

何一个位移上。在这个区域以外， $x$ 和 $y$ 間沒有靜态关系。图2—4（4）是一个經常以容积式泵抽水的水罐，即抽水量 $Q_2$ 一定，並不随水位 $h$ 的变化而改变。該系統的輸入是進水量 $Q_1$ ，輸出是水位 $h$ ，或水位升降速度 $\dot{h}$ 。当 $Q_1=Q_2$ ，水位沒有变化， $\dot{h}=0$ ，当 $Q_1 > Q_2$ 时， $\dot{h} > 0$ 。这种关系如图2—4（5）所示。如以水位 $h$ 为輸出量，則得图2—4（6）所示通过 $Q_1=Q_2$ 的一条垂直綫。因为 $Q_1 \neq Q_2$ 时，水位总在变动， $h$ 沒有平衡值，故 $h$ 和 $Q_1$ 間沒有靜态关系。只有当 $Q_1=Q_2$ 时， $x$ 才有平衡值，但是 $h$ 的平衡值的大小可以从 $h=0$ 一直到 $h=h_{max}$ ，也沒有固定的关系。

## 2. 有差和无差系統，靜定和不定元件

图2—2所示压力調节系統的靜态特性表示，当系統承受不同負荷时，系統的被調量也不同。在定值調节系統中，我們希望被調量不随負荷而改变，要始終等于給定值。显而易见，具有图2—2所示关系的自动調节系統最后的調节結果是有一定偏差的，这种系統叫做有差系統。如果系統的靜态关系是一条水平綫，即表示系統的輸出量 $p$ 和其輸入量 $Q_2$ 之間沒有固定一定的关系，那么这种系統，由于 $p$ 不随 $Q_2$ 而变，永远为一常数值（等于給定值）所以是无差系統。

对于一个元件來說，如果輸出量和輸入量之間有一一相对的关系，如图2—3（2）、（4）、（6）和（9）以及图2—4（2）和（5），那么这些元件在特定的輸出量和輸入量上來說，叫做靜定元件。反之，如果元件的某些輸入量和輸出量間沒有一定的关系，如图2—3（7），图2—4（3）和（6），那么这种元件在这些輸入量和輸出量的关系上說是不定元件。

## 3. 綫性元件和非綫性元件

图2—3（2）中的靜态特性曲綫，是一条直綫，具有这种特性的元件称为綫性元件。綫性元件的靜态方程式，为一次代数方程式，即直綫方程式。直綫的斜率叫做元件的放大系数。

靜态特性不是直綫的元件，称为非綫性元件。如图2—3（4）中所示。非綫性元件的方程式中含有变量的非一次幂的項，甚至有时不能用方程式来表达。为了簡化問題，通常要将非綫性特性綫性化。

## 4. 綫性化的方法

所謂非綫性特性的綫性化，即是在輸入量和輸出量的某一变化范围内，將它們的非綫性关系用近似的方法取为綫性。綫性化的方法有两种：切綫法和平均法。

切綫法是在元件的靜态特性上表示元件正常工作状态的一点（額定点）作切綫，以此切綫代替曲綫来表示元件靜态特性的方法。我們以图2—3（9）中电子放大器阳栅特性的綫性化來說明，放大器的額定点是由負栅压所确定的A点，通过A点作曲綫的切綫，則这条切綫就是綫性化后元件的靜态特性。它的方程式即为A点的切綫方程式：

$$(u_1 - u_{20}) = \left( \frac{du_2}{du_1} \right)_A (u_1 - u_{10})$$

或

$$u_2 = \left( \frac{du_2}{du_1} \right)_A u_1 + [u_{20} - \left( \frac{du_2}{du_1} \right)_A u_{10}] \quad (2-2)$$