

自动調整原理基础

宋振璞 傅道里 合編
刘訓初 田 林

內 部 資 料

南 京 航 空 学 院

1963.7.

自动調整原理基础

目 录

第一章 緒言	1
§1—1 自动化在生产技术上的作用和意义	1
§1—2 自动調整系統的构造	2
§1—3 自动調整系統的分类	5
§1—4 系統及元件的靜态特性, 动态特性及研究动态特性的方法	9
§1—5 自动調整系統举例	16
第二章 訊号轉換元件	22
§2—1 前言	22
§2—2 电阻式訊号轉換元件	23
§2—3 电感变换器(感应式訊号轉換器)	29
§2—4 电容轉換器	31
§2—5 热电轉換器	33
§2—6 同位仪式訊号轉換器	34
第三章 訊号放大元件	37
§3—1 前言	37
§3—2 磁放大器	37
§3—3 继电器及继电器式放大器	44
§3—4 相敏整流放大綫路	52
§3—5 电机放大器	54
第四章 执行元件	59
§4—1 前言	59
§4—2 他激直流电动机	59
§4—3 两相感应式电动机(两相异步电动机)	62
第五章 自动調整系統的基本动力学特性——传递函数, 頻率特性, 过渡函数	66
§5—1 前言	66
§5—2 系統的強迫振蕩和頻率特性	72
§5—3 用实验方法研究元件或系統的特性	77
§5—4 自动調整系統的典型环节	79
§5—5 环节的連結及其連結后的传递函数和頻率特性	98
§5—6 单环系統的传递函数, 頻率特性, 多环系統的传递函数, 頻率特性	104
§5—7 系統的靜差誤差, 靜誤差与放大系数的关系	118
附: 典型环节的方程式与特性一览表	

目 录

第六章 綫性自动調整系統的稳定性

§ 6—1	前言	1
§ 6—2	劳斯-古尔維茨稳定判据	5
§ 6—3	乃魁斯特稳定判据	9
§ 6—4	对数頻率特性稳定判据	17
§ 6—5	稳定域的划分	21

第七章 用頻率法研究綫性系統的品质

§ 7—1	前言	29
§ 7—2	自动調整系統在非周期輸入作用下的过渡过程	31
§ 7—3	在单位阶跃函数作用下过渡过程的決定	33
§ 7—4	閉环系統的实頻特性与相应的过渡过程的一些性质	35
§ 7—5	閉环系統实頻特性的繪制	37
§ 7—6	利用梯形实頻特性, 求过渡过程的近似方法	42
§ 7—7	由頻率特性的形状間接評價系統的品质	46

第八章 校正方法及綜合

§ 8—1	引言	58
§ 8—2	串联校正的一些方法	60
§ 8—3	并联校正的一些方法	65
§ 8—4	按給定技术要求綜合校正裝置的提法	67
§ 8—5	最佳过渡过程所对应的传递函数和頻率特性	69
§ 8—6	求希望对数幅頻特性的方法	72
§ 8—7	校正裝置的綜合方法	77
§ 8—8	常用的校正裝置(校正元件)	81
第八章附录	按照数幅頻特性近似計算相頻特性的公式	87

第九章 非綫性自动調整系統

§ 9—1	引言	89
§ 9—2	相平面法的基础	91
§ 9—3	相平面法应用举例	97
§ 9—4	諧波綫性化法的基础	102
§ 9—5	諧波綫性化法应用举例	108

第一章 緒 言

§1—1 自动化在生产技术上的作用和意义

自从1958年大跃进开始，在我国各地，全面地开展了一个以机械化、半机械化、自动化半自动化为主的技术革新技术革命的运动以来；全国涌现出无数的先进人物和先进事例，为提高劳动生产率，减轻劳动强度，节约原料和改善产品品质，做出了伟大的贡献。

在生产中实现机械化和自动化，是发展生产力的有力手段，是现代化生产技术发展的基本方向，所谓机械化，是在生产过程中使用机器或机械装备代替人们的笨重体力劳动，人们只需要花费少的体力来进行操纵和管理，而自动化是机械化的高级发展形式。它是建立并利用生产机械、控制设备和能源部分组成的系统，这种系统不需要人直接参加工作，而只是起着监督、维护的工作。

自动机械的发明虽已有一二百年的历史，但是自动化的蓬勃发展还只是廿年来事。特别是在最近十年来，在各个生产和科学部门，都日益显出它的威力和重要性。

例如：在电力工业中，利用自动调节器来保证供电的频繁和电压保持恒定。在化学工业中需要许多能对温度、压力、流量、液面高度等进行自动控制的装置。在冶金工业中的送料、加温、和轧钢等都采用了许多自动化装备。地质工业中的探矿，钻探也有大量的自动设备。在机械工业中的加工、运输、包装、检验、从单机自动化到车间的全盘自动化更是种类繁多。在原子能工业中，为了防止辐射的损害，可以说是一步也离不开自动装置。相反地倒可以说，由于自动技术的高度发展，在一定程度上促进了原子能工业的发展。

对航空工业来说，它是最早采用自动装置的部门之一，特别是随着航空工业的飞跃发展，宇宙飞行已经成为现实，对装备的自动化就提出了更高的要求。例如早在廿年以前，航空发动机自动器和飞机自动驾驶仪，就达到相当完善而普遍应用的地步。而目前已经从过去的单独自动装置，变成自动领航仪，无线电装置，雷达装置，瞄准器和火炮自动器等，共同组成许多复杂的自动系统；完成象自动起飞降落，自动搜索敌方目标进行追踪，自动瞄准和自动轰炸等复杂的动作。不仅如此，在现代的飞机和航空器本身，为了正确完成航行任务，从飞行参数的测量，坐舱温度、压力、湿度的调节，高空氧气的供给，仓面的操纵，起落架的收放，电网照明的管理，通讯设备的操作，都在不同程度上进行了高度的自动化，来减轻值勤人员的疲劳，和克服体力不足的缺陷。

自动技术在目前已发展成为一种严密的科学部门，而且在最近几年已经显出了质变。在过去，一个自动控制装置，只能使被控制的对象，按预先给定的规律来动作。在目前，就有可能由自动装置自己找出被控制对象的最佳工作状态，而且自动地保持这种最佳工作状态。例如过去的一般自动驾驶仪，都是按一定型别的飞机的气动力特性来设计的。但是飞行时，大气参数是在改变的，低空和高空也大不相同。如遇飞机表面结冰时气动力特性变化也就更为激烈。这种自动驾驶仪，就不能适应外界状态改变的影响，自动地找出最优工作状态，并保持这种状态。而新型的自动器，就要解决这类有实际意义的现实问题。

自动化的基本科学问题是：1.自动控制理论的研究，它探讨各种自动系统的结构。应用、

分析和設計的問題。2. 自动元件的研究。它探討組成自动系統的元件的構造、应用、特性的分析和設計以及加工的問題。並且在已有成就的基礎上，創造出特性更為優良，以及完全新型的元件，來滿足自动化日益高漲的要求。

§1—2 自动調整系統的構造

在各种生产过程以及技术设备中，常常需要使其中的某些物理量（例如温度、电压、轉速等等）保持常数（或者接近于常数）或者让它们按照給定的規律变化。要滿足这种需要，应该对生产机械或技术设备进行及时的調整，以抵銷外界的扰动的影响。这种調整除了可以由人工进行以外，还可以由机械设备自动来进行即所謂自动調整。

尽管被調整的物理量（温度、电压、轉速等等）是各式各样的，自动調整系統的構造也可能有很大的差別，然而，这些不同的自动調整系統中，無論如何，总有一个共同的目标，那就是用机械調整來代替人工調整。为了弄清这种代替为什么可能，以及究竟是怎樣代替的，首先，值得我們考虑一下的是，在人工調整中，到底人担任了那些工作，或者说人起了些什么作用。

既然談到調整，那末总有一个希望达到的目标，也就是說，总有一个理想情况，通常把它叫做給定值。而在調整过程中，常将需要控制的某一物理量称被調整量。例如以他激直流电机的速度調整系統來說（图1—1），我們需要电动机 M 保持什么样的速度，事先是知道的（給定值）；其次这个电动机 M 在任何时候的实际轉速也应该通过測量知道，調整人員的任务是：借助于测速发电机 T_r ，測量实际轉速，然后把实际轉速和給定轉速比較。倘若电动机的轉速比給定值高，我們就調整电子管放大器的輸入电压（即移动电位計的电刷减小輸入电压），使电动机 M 的轉速降低到給定的轉速。倘若电动机的轉速比給定轉速低，就增加电子管放大器的輸入电压，使电动机 M 的轉速上升到給定值。

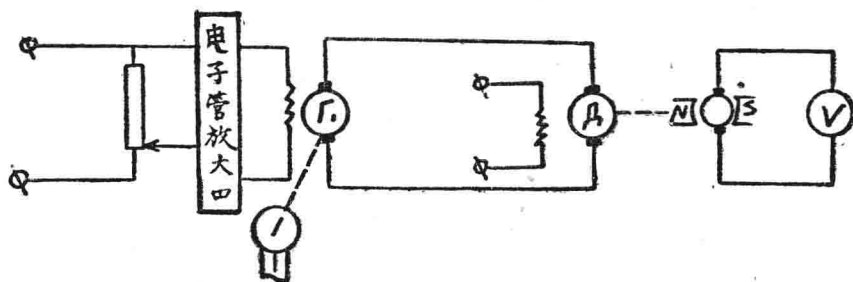


图1—1 开环的直流电动机控制系統

由此可见，在人工調整中包含着这样几个步骤：

- (1) 測量被調整量（实际的轉速）；
- (2) 将所測得的被調整量的值和給定值进行比較得出誤差；
- (3) 根据誤差的性质來轉化为調整动作。

因此，倘若要用自动調整代替人工調整，那末，在自动調整系統中，必須包含三种机构，即：1. 測量机构；2. 比較机构；3. 执行机构。同时，由于在人工調整中，将被調整量和給定值进行比較是靠調整人員來进行，因此，关于給定值的問題，只要調整人員心中有数就行了。而在自动調整系統中則必須將給定值在系統中具体的体现出来，从而自动調整设备还

应该引入给定值的设备，我们把它称为命令机构（标定元件）。

在此系统里，电动机的转速是被调整量，在未受外界因素影响前的转速便是给定值。

图1—1所示的系统各元件间的相互关系，可用方块图表示如图1—2

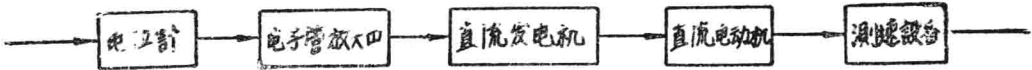


图1—2 图1—1所示系统的方块图

把上面人工调整电动机转速的系统改结成图1—3所示的系统的連結型式，就可以达到自动调整电动机的转速的目的。

图1—3所示的他激直流电动机转速调整系统，力图维持电动机 M 的转速为一恒值。图1—3所示， ΘMY 为电机放大器，它供电给电动机 M ，电动机的转速由测速发电机 T_R 来测量，测速发电机的电势正比于其转速，放大器的输入电压 U 是电压 U_0 与测速发电机电压 U_{TR} 的差值，($U=U_0-U_{TR}$)，这电压值经放大器放大后，加在电机放大器的激磁绕组上。如果由于某一外界因素的影响，而使电动机的转速改变了，则测速发电机的电势也起相应的改变，因而引起电机放大器激磁电压的改变，电动机的端电压也相应的改变，这样使电动机的转速，回复到接近于原来的（未受外界因素影响前）转速。自动调整就是这样进行着。在这一系统中，测速发电机 T_R 是测量元件，测速发电机 T_R 两端与放大器输入端相连接的导线是比较机构，放大器是放大元件；电机放大器是执行元件。其中测速发电机 T_R ，电位计 Π ，放大器……等组成设备称调整器。用它来执行调整动作。电动机 M 是受调整器所控制的设备称为调整对象。调整对象和调整器一起称为自动调整系统。

到这里，自动调整系统的基本原理便很清楚了。它和人工调整一样，也是由测量元件，测量了被调整量，把它和给定值比较得出误差，然后由误差经过放大元件加以放大来控制执行元件，发出调整动作，从而达到减少误差的目的。

图1—4所示为系统的方块图。

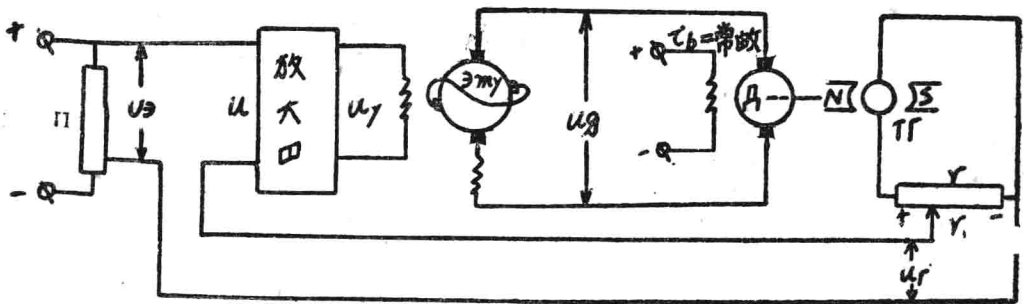


图1—3 他激直流电动机自动调速原理图

从图1—4所示系统的方块图，可以看出：自动调整系统的各种机构是按照一定的顺序，一个影响一个，周而复始循环不已。因此自动调整系统的特点：在于它是，调整器作用于调整对象上，而调整对象又加到调整器上，形成一个封闭的回路，对应于这样的闭合回路称闭环自动调整系统（简称闭环系统）。

图1—2所示的方块图，它不是一个封闭回路，对应此方块图的系统叫做开环自动调整系统（简称开环系统）。从图上可以看出它仅有调整器作用于调整对象上，调整对象作用于调

整器上由人参与构成的。此系统属于人工调整系统。

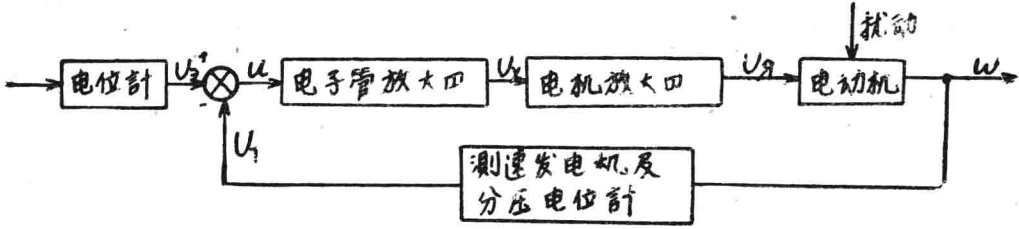


图1—4 直流他激电动机自动调整系统方块图

今后为了分析或者设计一个自动调整系统方便起见，常常不是用它的方块图及原理图，而是用结构图。

自动调整系统的结构图——用方块及其他一些符号来表示系统的基本元件对信号的传递及变换过程的原理图。

任何自动调整系统都是由调整对象和调整器所组成的。通常自动调整器根据其工作任务和控制系统的完善程度包含有或多或少的各种不同的组成部分，一般来讲总是由下列这些基本元件组成的（图1—5）。

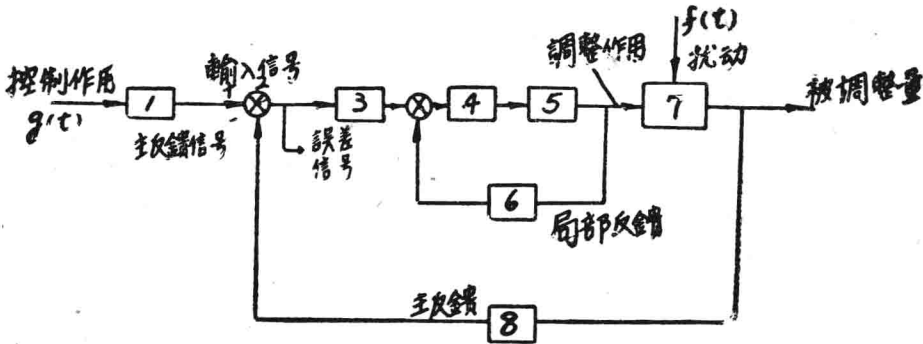


图1—5 自动调整系统的基本元件

图中：(1)控制元件或者叫作标定元件 1：它的作用是产生有用的输入信号（控制量）；

(2)感受元件或者叫比较元件 2：它在比较输入信号和主反馈信号的基础上，发出原始控制信号或称误差信号。

(3)串联变换元件或者叫串联校正元件 3：用来把原始控制信号加以适当变换，以便使系统具有所需要的动力学性质。

(4)放大元件 4：它可以把串联校正装置输出端所产生的控制信号加以放大；

(5)执行元件 5：产生调整作用加在调整对象上；

(6)并联校正元件 6：（局部反馈）用来使系统具有所需要的动力学性质；

(7)调整对象 7：被调整器控制的设备；

(8)主反馈元件 8：它所产生的信号和被调整变量有一定的函数关系。

按照惯例，我们把加在调整系统感受元件上的作用叫做输入信号。或者叫做自动调整系统的输入量。把被调整量叫作输出量。从系统输出端引来加在它输入端的信号叫做主反馈信号，若主反馈信号与控制信号同号叫做正反馈，反馈信号与控制信号反号叫做负反馈。自动

調整系統一般都採用負反饋。而輸入信號和主反饋信號的差叫作誤差信號。

圖中箭頭表示信號的傳輸的方向。而箭頭僅指向一個方向，表示作用只能沿一個方向前進，這樣的系統稱單向作用系統，這是由系統元件的性質所決定的。例如有一感受元件，它是一個用來測量任何容器中溫度的電阻溫度計，容器溫度的變化會影響溫度計的電阻值，但是溫度計電阻的變化卻不會影響容器溫度。因此，作用只是沿從容器到溫度計，這樣一個方向進行的。大多數的自動調整系統都具有這種單向作用特性。單方向性在於輸入信號不會直接通過感受元件 2，對主反饋信號產生重大的影響，而只能沿一定的方向（例如圖 1—5 所示順時針方向）通過整個系統產生這種影響。

另外從結構圖上可以看出除了控制作用外 $[g(t)]$ ，還有擾動作用 $[f(t)]$ ，很顯然，調整系統對於上述兩種作用 $[f(t)]$ 及 $[g(t)]$ 的反應是很不相同的。控制作用決定被調整變量的變化的函數，而擾動作用應該盡量少去影響被調整變量的變化（即破壞控制作用與被調整量之間函數關係的函數）。

我們還應該注意到控制作用與擾動作用加入系統的地方不同。控制作用 $g(t)$ 只能通過感受元件 2 加在系統上（圖 1—5）而擾動作用可以加在系統的任一點上，包括感受元件在內。一般多加在調整對象上。

研究一下圖 1—3 所示的系統，其中電位計 Π 是標定元件，它產生的輸入信號是由其中引出的電壓 U_0 ，測速發電機 Γ_r 是主反饋元件電子管放大器是放大元件，電機放大器可以看作執行元件，它產生的調整作用乃是電動機的電樞電路的電流，直流電動機以及它所聯結的負載可以看作調整對象。（被調整量是電動機的轉速）控制作用 $g(t)$ 由電位計 Π 給出，擾動作用是電動機 Π 負載力矩的變化。應該注意，把系統的各具體元件歸入上述某一類型中，都是有條件的，這要看是否便於問題的研究，例如在剛才所舉的例子中電機放大器可以看作執行元件，但是也可把它看作放大元件。

§1—3 自動調整系統的分類

按照不同的觀點，自動調整系統可有各種不同的分類方法。

（一）按照控制量的特點可以分成三類：

（1）自動鎖定系統，其中控制量是恆值，這類系統使被調整量保持恆值或基本上保持恆值。圖 1—3 所示的電動機調整系統便是這類系統的一個例子，在這例子中控制量 U_0 保持為恆值。（它只有在重新調整時才可能改變）被調整量（電動機的轉速），也基本上保持恆值。

（2）隨動系統：這類系統中控制量是事先不能確切給定的時間函數，而被調整量是按照控制量變化的。

例如圖 1—6 所示之系統便為隨動系統之一例。

當發送電位計與接收電位計的電刷處在相應的位置時，整個系統處在平衡狀態。如果控制軸以任意規律變化，則由這兩個電位計組成的電橋不平衡，於是在放大器的輸入端出現電壓，從而使電動機轉動，電動機經過減速器驅動接收電位計的電刷按照控制軸變化規律來變化。

（3）循序調整系統（仿型調整系統）。在這類系統中控制量是預先給定的時間函數，而被調整量是根據預先給定的規律而變化的。

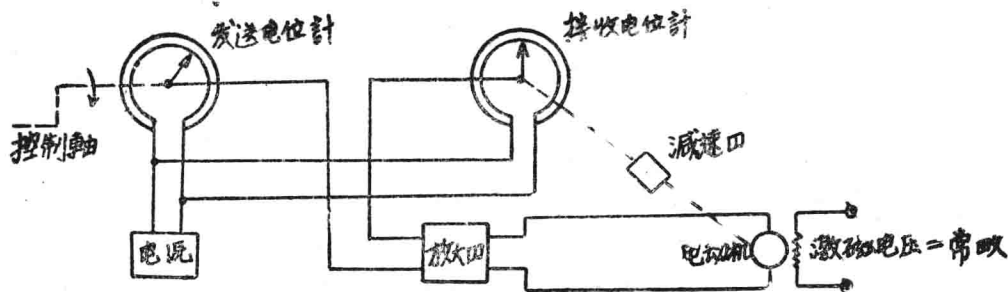


图 1-6

图1-7所示，是程序调整系统的例子。

在这例子中需要调整的是用来进行热处理的炉子的温度，这温度随时间的变化是由程序给定装置 2 造成的，调整器的敏感元件不断比较炉子的实有温度与按程序装置所规定的应有温度（预先给定的时间函数）相比较，如二者不相对应，调整器就改变实有温度使它对应于程序装置的给定温度。此一过程进行如下：

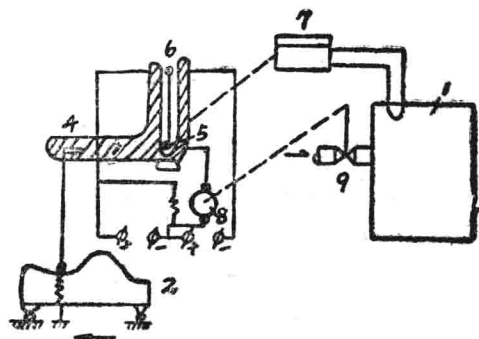


图 1-7

程序给定装置 2 由一机构（图中未画出）带着按图中箭头所示方向移动，炉子的温度随时间的变化是借助于此装置 2 来给定的。给定的温度变化由沿凸輪盘滑动的滚輪 3 及其連杆而传送给 L 形的杠杆 4，后者是繞着軸 5 移动的，在杠杆 4 的垂直孔隙中放有指示炉子实际温度的指针 6，它与测量仪表 7（通常是自动电动計）有机械的或电气的联系。若实有的温度与给定温度不相适应，那末，指针 6 就和杠杆 4 的一个触头相接触，从而接通电动机 8，使它向适当的方向转动（向使有实有温度相适应的方向转动），电动机 8 的转动使调整机构 9 作用而使炉子的温度向需要方向来改变，当炉子温度与给定的温度变化相对应时，指针 6 位于杠杆 4 的两触头中间电动机就停着不动，因此，在整个变化过程中，炉子温度的变化完全是按给定装置所给定的温度来改变的。因而这系统是属于程序调整系统。

最后应该强调指出的，这三类系统不同之处，是看控制量变化的性质来确定。

自动锁定系统——控制量 = 常数

随动系统——控制量 = 任意的时间函数

仿型调整系统——控制量 = 已知的时间函数

(二) 自动调整系统按照它们在满足一定条件的作用下静态有无偏移或误差，通常可以分成有静差系统与无静差系统两类。

由于各种作用的存在，使得被调整量的给定值与实际值之间一般说来是有差异的。

被调整量的期待值与实际值的差叫作自动调整系统的误差。

我们按照惯例，把被调整量在某一时刻的值和它的作为起点的某一定值之间的差叫作偏移。

为了说明“误差”和“偏移”这两个概念的差别，我们来研究下面这个例子：假设加在调整系统上的控制作用突然变化了某一恒值（图 1-8）。控制作用的这一变化引起被调整

量相应的变化。我们把 BC 这个量叫做被调整量 $x(t)$ 在 t_1 时刻的偏移, 而把 $AC - BC = AB$ 这个量叫作误差 $e(t)$ 。

(1) 在恒定的扰动作用下: 系统有无静差的定义:

如果有一个调整系统, 它的扰动久而久之逐渐趋近于某一恒定的定态值而被调整量的偏移也逐渐趋近于某一恒值, 这个值决定于扰动作用的大小, 那末这个系统叫作对扰动有静差的系统。

如果一个系统的扰动久而久之趋近于某一恒定的定态值, 而被调整量的偏移逐渐趋近于零, 与扰动作用小大无关, 那末这系统叫作对扰动无静差的系统。

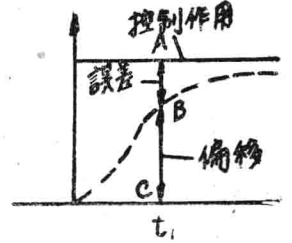


图 1—8 供说明被调整量的误差与偏移所用之图

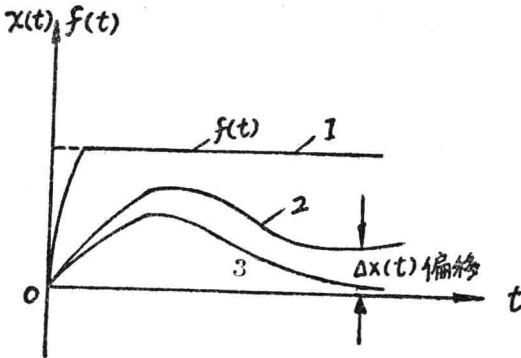


图 1—9 当扰动形如曲线 1 时, 有静差系统的过渡历程曲线 (曲线 2) 和无静差系统的过渡历程曲线 (曲线 3)

图 1—9 的曲线 2 和 3 分别表示当扰动如 1 所示时, 有静差系统与无静差系统中被调整量的偏移在过渡过程中变化的大概情况。

下面以水箱液面高度调整系统为例: 说明系统在扰动作用之下有无静态偏差的工作情况。

增加它的开度, 通过管 T_2 流入水箱的水量便增加, 当水的输入量与输出量相等时, 便达到新的平衡状态, 这时液面的高度不再等于流量增加前的液面高度。

图 1—10 示水箱液面高度的静差调整系统原理图。浮子 1 与阀门 2 用传动杠杆相连接, 当沿管子 T_1 的流量 Q 增加时, 液面随着下降, 浮子也降落, 因而移动阀门,

图 1—10 示水箱液面高度的静差调整系统原理图。浮子 1 与阀门 2 用传动杠杆相连接, 当沿管子 T_1 的流量 Q 增加时, 液面随着下降, 浮子也降落, 因而移动阀门,

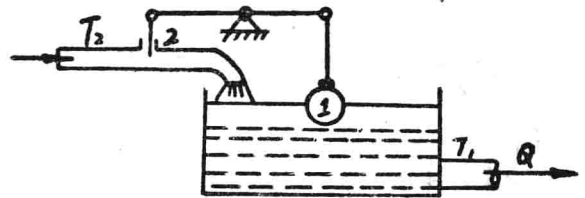


图 1—10 有静差自动调整系统

图中 h 为被调整量 (液面高度) 如果输出量愈大, 阀门开度也就愈大, 因而在平衡状态下液面也就愈低 (图 1—11e)。

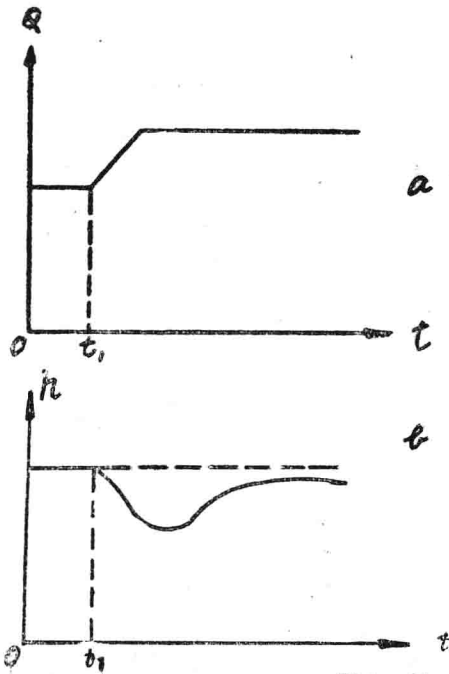
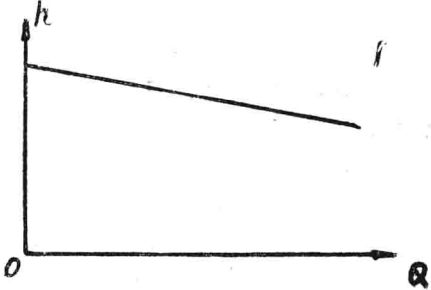


图 1—11 有静差系统调整过程曲线



显而易见，有静差调整系统的特征为：

(a) 系统是在与外加作用相应的被调整量数值下保持平衡，它不可能使被调整量完全等于给定值。（在这例子中系统是在不同的液面高度下保持平衡状态，流量增加后的液面高度不可能等于增加前的液面高度。）

(b) 每一被调整量的数值与调整机构的位置成单值对应关系（在这例子中，液面的每一高度与阀门的每一位置相对应）。

图 1—12 是水箱液面高度的无静差调整系统原理图。当输出量增加（减少）时，浮子降落（上升），电位计的滑臂往上移（往下移），这时电动机开始向开大（关小）阀门以增加（减少）输入量的方向旋转。

很明显，不论输出量多大，平衡状态只可能发生在电位计的电刷位于电位计之中点位置时。

因而无静差系统有下面两个特点：

(a) 系统只有在被调整量等于给定值时才能达到平衡状态（在这例子中为水管输出量增加或减少在平衡状态下液面高度始终保持不变）（图 1—12）。

(b) 调整机构在调整过程终止时可能停留在不同位置，以保证系统的平衡（在这例子中为阀门可以为不同的开度视输出量而定）。

图 1—13 示无静差系统的特性。

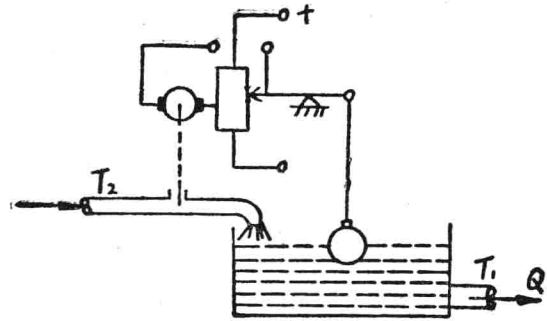
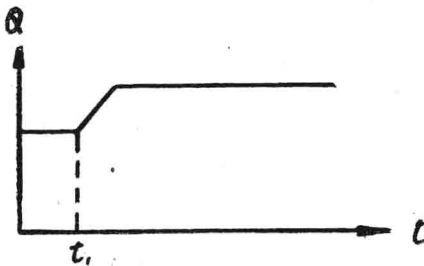


图 1—12 无静差液面高度调整系统

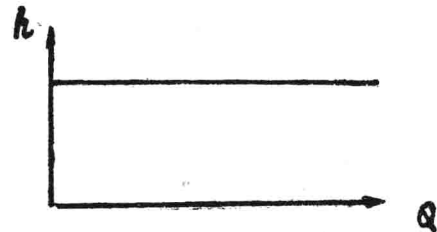
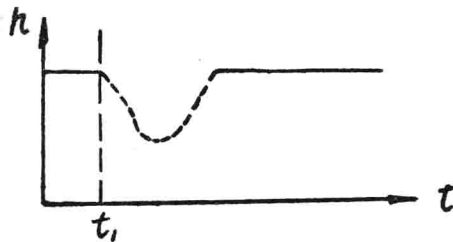


图 1—13 无静差系统的特性

(2) 在恒定控制作用下：系统有无静差的定义

一个自动调整系统当其控制作用久而久之逐渐趋近于某一恒定的定态值，而误差也趋近于恒值，这恒值决定于控制作用的大小，那末这个系统叫作对控制作用有静差的系统。

要是系统的控制作用久而久之趋近于某一恒定的定态值，而误差不论控制作用大小都趋近于零，那末这个系统叫作对控制作用无静差的系统。

图 1—14 的曲线 2 和 3 分别表示当控制作用如曲线 1 所示时，有静差系统与无静差系统

中誤差值在过渡过程中变化的大概情况。

應該強調指出，同一系統，可能对某一扰动是有靜差的而对控制作用是无靜差的，有的又恰好相反。具体讲就是要看作用究竟加在系統的哪一点上。

例如在自动鎮定系統內，控制作用保持为恒定值（它只有在重新調整时才可能改变），問題就在于系統对扰动是有靜差还是无靜差了。

相反地在随动系統中，引人注意的通常是，系統对控制作用是有靜差还是无靜差的問題。

(三)按照調整机构产生的作用的性质：自动調整系統可分为連續調整系統、脉冲調整系統和继电調整系統。

(1)連續調整系統。这种系統中所有元件的輸入量与輸出量之間存在着連續的函数关系。图1—3就是一个連續調整系統的例子，其中电动机电枢电路的电流是放大器輸入端的連續函数。

(2)脉冲調整系統：系統中靠某一特种間歇裝置使系統的作用有周期性的強迫开断，其間歇頻率是恒定的，并且与工作情况无关，調整時間被分开成高脉冲和間歇的間隔，在脉冲時間內，調整过程的进行与連續調整系統相同，而在間歇時間內調整器对系統的作用被強迫停止。

(3)继电調整系統：这种系統中某一元件的輸出量保持为恒定值，不随輸入量的数值而变化。但它的符号，决定于輸入量的符号。

(四)按系統中是否有附加能源可分为直接和間接調整系統。

在直接調整系統中执行机构的移动是靠敏感元件本身的能量而进行的。图1—10的液面調整系統就是一个例子，其中的閥門是靠浮子的能量而移动的。

在間接調整系統中，执行机构的能量是由附加的动力源供給的，例如图1—12的液面調整系統閥門的移动是由附加的电源供給的。实际工作中主要应用的是間接調整系統。

(五)从使用能量的观点，自动調整系統还可以分为：

- (1)电动系統（机电系統）；
- (2)电子系統；
- (3)风动系統；
- (4)液压系統；
- (5)机械系統等。

§1—4 系統及元件的靜态特性、动态特性及研究动态特性的方法

(一)系統或者元件的靜态特性及其綫性化：

决定系統或者元件所有輸入与輸出量的稳态值变化的关系称为該系統或者元件的靜态特性。一般由下面方程式表示靜态特性：

$$X_{B_{\text{BIX}}} = K X_{B_X}$$

式中： $X_{B_{\text{BIX}}}$ ——輸出量

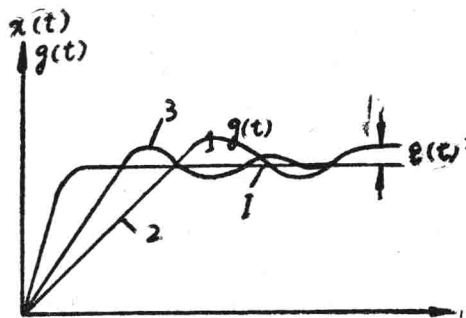


图1—14 当控制作用如曲线1时有靜差系統的过渡历程曲线（曲线2）和无靜差系統的过渡历程曲线（曲线3）

X_{BX} ——輸入量

K ——传递系数

若式中 K 是一个常数，表示輸出量正比例于輸入量，該靜态特性称綫性的。

若式中 K 不是一个常数，表示輸出量不正比例于輸入量，該靜态特性称非綫性的。

而实际的自动調整系統或者自动元件，当严格的考虑所有物理过程时由于鉄磁体的饱和，迟滞电气或机械滞延和于摩擦等存在，描述其輸出量与輸入量間关系的方程式应当写成非綫性方程式。若忽略影响不大的因素以及在某些假定条件下可以认为

$$X_{BYX} = K X_{BX}$$

是綫性关系，式中 K 表示在稳定情况下輸出量与輸入量之比。如果輸入量与輸出量具有不同的物理性质，則传递系数 K 将具有某一量綱，綫性的靜特性曲綫具有直綫形式，該直綫經過坐标原点且与横軸成 $\alpha = \text{tg}^{-1} K$ 角度（图 1—15）。

若 K 不是常数，則此靜态特性是非綫性的。

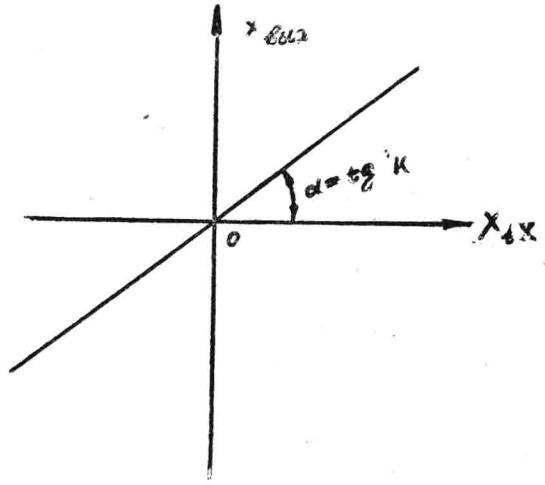
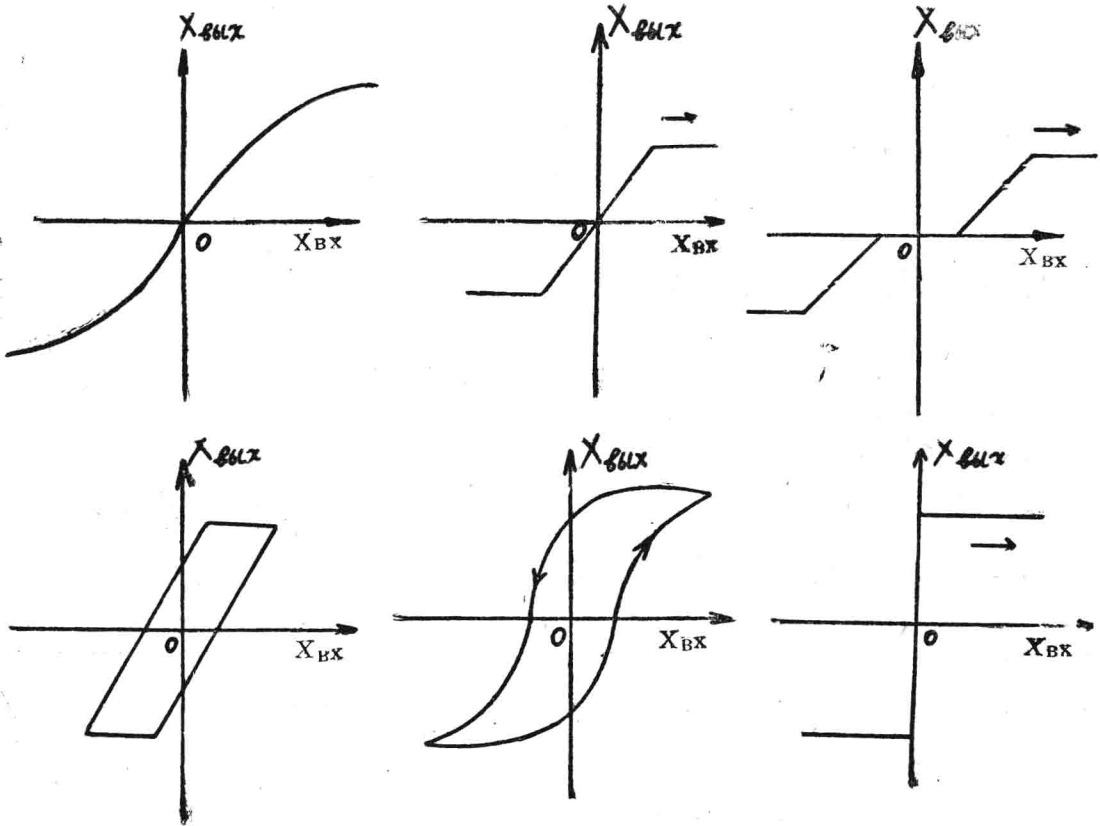


图 1—15 綫性靜态特性

非綫性的靜态特性曲綫具有的形式是各种各样的，现举出几种比較常见的非綫性靜特性



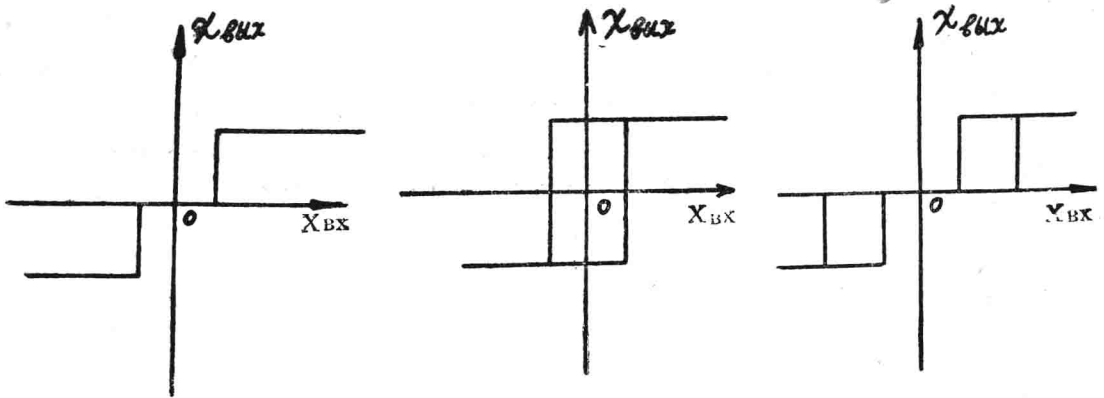


图 1—16 非綫性靜态特性曲綫

曲綫。(见图 1—16)

虽然真实的靜特性都是非綫性,但如果非綫性程度不大和实际上不甚重要,則对于輸入量仅在工作点的邻域內改变时,在該区域內的实际曲綫可用通过工作点的切綫近似地来代替,这样的处理称为靜特性的綫性化。这种方法在数学上便是用台劳公式,將非綫性函数分解为在其变量的某一稳态值的邻域內微增量的幂級数,然后将含有变量的高于一次的各项略去。

綫性化的范围依非綫性特性的形状为轉移,如果非綫性程度很小,那末綫性化范围可以包括系統大多数的工作情况。

通常我們把可以在相当寬广的范围內綫性化的特性,以及綫性化范围对于研究自动調整系統稳定性与过渡历程品质說来无足輕重的特性叫作非根本非綫性特性。

除了非根本非綫性特性而外,还有一些特性,要想保存住它們的特性是决不能綫性化的。

属于这类特性的,是那些不能在輸入量所需变化范围內綫性化的非綫性特性,或是那些不能展成台劳級数的函数。这类特性的另一个特点是:該函数对輸入坐标的一次,二次导数是不連續的。我們把这类特性叫作根本非綫性特性。

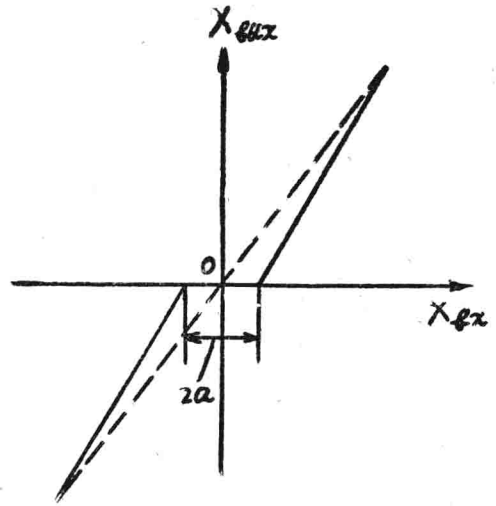


图 1—17

例如图 1—17所示之靜特性进行綫性化在原則上是不合宜的,由于不灵敏区 a ,即輸入量在 $2a$ 区范围内改变时,輸出等于零。但是如果不灵敏区很小,以及它在整个过程中所起影响不大,則一般可以忽略并且特性可改为如虛綫所示的特性曲綫。这是綫性化的一种方法,它是在非綫性元件中略去一些不重要的非綫性因素。

另一种靜特性綫性化的方法是取平均近似值的方法(图 1—18),它是由通过輸入量的額定值 X ,作一平行于纵坐标的直綫。然后通过坐标原点作一直綫,并使面积 A 等于面积 B

則此曲綫便可用通过坐标原点的直綫近似地來代替。

第三方法，对于描写元件的非綫性函数，則利用台劳公式在含有变量的某一穩定值邻域內微增量的幂級数，然后将含有变量的增量高于一次的各项略去便得近似的綫性方程。

在几何上的意义相当于用通过穩定值那一点的切綫來代替在穩定值邻域內的曲綫。

例如，一綫圈，假如其磁鍵是电流的非綫性函数如图 1—19 所示。

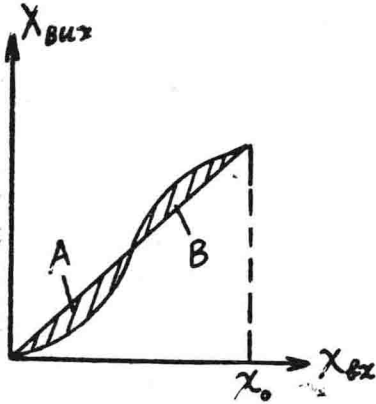


图 1—18

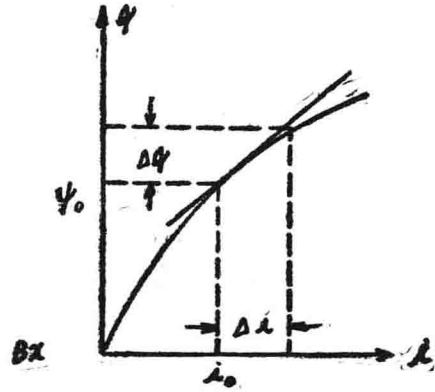


图 1—19

將該函数展开成台劳級数

$$\begin{aligned} \psi(i) &= \psi_0 + \left(\frac{d\psi}{di} \right)_{i=i_0} \Delta i \\ &+ \left(\frac{d^2\psi}{di^2} \right)_{i=i_0} \frac{(\Delta i)^2}{2!} + \dots \end{aligned}$$

如果电流增量很小，則可以取級数的头两项。

$$\begin{aligned} \psi(i) &\approx \psi_0 + \left(\frac{d\psi}{di} \right)_{i=i_0} \Delta i \\ &\approx \psi_0 + L_0 \Delta i \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 $L_0 = \left(\frac{d\psi}{di} \right)_{i=i_0}$ 代表图 1—19 曲綫在坐标 (i_0, ψ_0) 的点上的切綫的斜率，于是

$$\Delta \psi = L_0 \Delta i \quad \text{式中} \quad \Delta \psi = \psi(i) - \psi_0$$

从上式可以看出这时电流与磁通的变化具有綫性关系，这仅仅在輸入和輸出量的变动都是很微小时才可能正确。这里所說的輸入和輸出量的极微小变动，应理解为將函数展开为台劳級数时，这些变量的平方，高次幂以及这些变量的乘积，比起这些变动來要小得多，并达到可以忽略的程度。

應該注意在上述方法將某一元件的方程式进行綫性化时，只有在包括平衡点在內的綫段內，函数本身和所有的导数都是单值和連續时才可以进行綫性化。

为什么要进行綫性化呢？因为在实际中所有元件或系統都是非綫性的。这样描述系統的方程式也是非綫性的，如果自动調整系統中所发生的过程要用非綫性方程來描述，則被調整量随時間而变化的規律就不可能用解析的方程式写成一般的表达式，这样，为了便于解決問題，需要將某些非綫性方程用近似的綫性方程來代替。也就是說，必須將問題加以綫性化。

(二) 系統或者元件的动态特性的概念及綫性化。

对于具有慣性的元件(或系統)当輸入量改变时并不能立刻引起輸出量相应的改变,而是有一些时延的,这时延决定于这元件进行物理过程的时间,这种輸出量与时间的关系称为元件(或系統)的动态特性。

元件(或系統)的动态特性可以用把时间函数的輸出量 $X_{B\text{BYX}}(t)$ 与輸入量 $X_{B\text{X}}$ 联系起来的微分方程式来确定,对于綫性元件,用綫性微分方程式描述它。这种方程式的最简单形式为

$$T \frac{dX_{B\text{BYX}}}{dt} + X_{B\text{BYX}} = K X_{B\text{X}}$$

式中: T —— 时间常数;

K —— 传递系数。

对于非綫性元件描述其动态特性的微分方程式为非綫性微分方程式最简单的形式为

$$T \frac{dX_{B\text{BYX}}}{dt} + f(X_{B\text{BYX}}) = K X_{B\text{X}}$$

式中: T —— 时间常数;

K —— 传递系数。

$f(X_{B\text{BYX}}) = K_1(X_{B\text{BYX}})X_{B\text{BYX}}$ —— 与輸出量本身有关的函数。

在可綫性化的情况下,可用綫性一次近似方程式来代替。取一个在自动調整系統中常见的如图 1—20 所示的 RL 元件为例

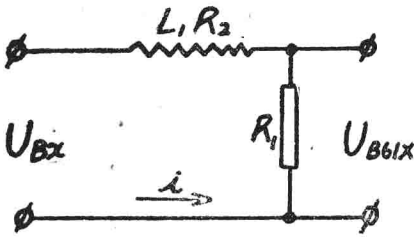


图 1—20

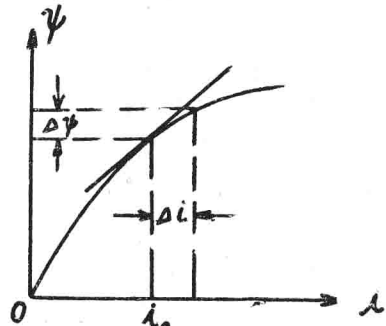


图 1—21

假如元件的綫圈的磁鏈 ψ 跟电流 i 是綫性关系,即 $L = \frac{\psi}{i}$ 是个常数,与电流大小无关,那末,元件的微分方程可如下求得:

$$L \frac{di}{dt} + (R_1 + R_2)i = U_{B\text{X}}$$

又

$$U_{B\text{BYX}} = i R_1$$

于是得

$$T \frac{dU_{B\text{BYX}}}{dt} + U_{B\text{BYX}} = K U_{B\text{X}} \quad (1-2)$$

写成算子形成

$$(T^p + 1)U_{B\text{BYX}} = K U_{B\text{X}} \quad (1-2a)$$

式中

$$T = \frac{L}{R_1 + R_2} \text{ —— 时间常数}$$

$$K = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \text{ —— 传递系数}$$

现在假设元件的磁鏈是电流的非綫性函数象图 1—21 所示,該函数就可以展成級数。

磁通 ψ 跟电流 i 是非线性关系 $\psi = \psi(i)$ 与电流大小有关，那末元件的微分方程式可如下求得：

$$\frac{d\psi(i)}{dt} + i(R_1 + R_2) = U_{BX} \quad (1-3)$$

方程式(1-3)是非线性微分方程式。在可线性化的条件下，可用线性一次近似方程式来代替。

根据公式(1-1)得

$$\psi(i) \approx \psi_0 + \left(\frac{d\psi}{di} \right)_{i=i_0} \Delta i$$

$\left(\frac{d\psi}{di} \right)_{i=i_0}$ 代表图 1-21 上曲线坐标为 (i_0, ψ_0) 的点上的切线的斜率。

$$\text{设} \left(\frac{d\psi}{di} \right)_{i=i_0} = L_0$$

因为 $\frac{d\psi_0}{dt} = 0$ ，所以 $\psi(i) - \psi_0 = \Delta\psi = L_0 \Delta i$ ，所以

$$\frac{d\Delta\psi}{dt} = L_0 \frac{d\Delta i}{dt}$$

$$\text{由} \begin{cases} d(\psi_0 + \Delta\psi) + (i_0 + \Delta i)(R_1 + R_2) = U_{BX} = U_{BX0} + \Delta U_{BX} \\ U_{BX} = U_{BX0} + \Delta U_{BX} = (i_0 + \Delta i)R_1 \\ U_{BX0} = i_0(R_1 + R_2) \end{cases}$$

消去中间变量 Δi 得：

$$(Tp + 1)\Delta U_{BX} = K \Delta U_{BX} \quad (1-3a)$$

式中

$$T = \frac{L_0}{R_1 + R_2}, \quad K = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

上式是线性化后的微分方程式，它是以增量的形式表示的。

线性化方程的系数是跟输入量、输出量的起始值的选择有关。输入量和输出量的增量就是从所选的起始值开始计算的。例如在方程式中 T 同 L_0 有关，而 L_0 又同 i_0 的选择有关。

最后要指出的是，此地强调线性化的原因，是由于目前对于系统的分析和计算方法。只有对用常系数线性微分方程所描述的线性自动系统才有比较完备而且简易的统一解法。在这种系统中，元件的特性必需全部是线性的。虽然可以肯定地说，只要进行足够精密的分析，任何一个自动调整系统和自动元件都是非线性的，幸好大多数的元件（或者系统）经过工程近似之后，都可以看作是线性元件。

不过随着自动控制理论研究的发展，应用非线性性的方法越来越为广泛。因为应用它要比线性方法常常更能深入研究那些由于线性化而被忽略了的因素的影响，更逼近于物理过程的真实情况。

然而，何时需要进行线性化，何时需要看作是非线性性的情况。只有在具体条件和要求明确以后，才能决定。而且这个问题也并没有所谓绝对的准则。

(三) 研究线性系统及线性元件的动态特性的方法——传递函数和频率特性

在目前，研究线性自动系统和元件的方法。特别是从分析系统的要求来说，不是直接在时间域内解描述系统运动状态的微分方程式，因为所要求解特征方程式的根。这对于 5 阶