

高等学校交流讲义

自动元件及装置

天津大学工业企业电气化自动化教研室编

只限学校内部使用



中国工业出版社

前 言

自动元件及装置课程是在学完了物理、电工基础、电磁测量、电机学和工业电子学等课程后学习的。有些元件已经讲过，不再重复。例如光电元件、电子放大器、离子器件、检测仪表及一般用微电机等。对于控制用微电机，本书只从拖动的观点出发来研究其外特性。另外象计算元件、校正元件以及手控或半自动电器等将分别在计算技术和电力拖动自动控制课程中讲授，亦未列入。

自动元件及装置课程是为自动学和生产过程自动化两门课程服务的技術基础课，它的内容应满足上述两门课程的基本要求。但为了使学生在深入掌握基本元件的同时，获得完整的概念和较为广泛的基础知识，在所选的材料中除了经常使用和迅速发展的自动元件外，还包括了与自动元件领域的系统性和完整性有关的内容。

为了便于学生联系实际，书中介绍了元件的应用及产品型号。由于篇幅限制，各种元件的结构参数和特性参数的表格和曲线均未编入。书中介绍了一些需要自制和有条件自制的元件的设计方法，以便进行设计制造。

书中内容编排的方法是从元件在系统中所处位置出发，分为敏感元件、中间元件和执行元件三部分。这样不但有助于学生对于各类元件功用的理解，同时还配合了专业课的需要，使学生对自动控制系统概念更加清晰。

“自动元件及装置”课程是一门新设置的课程，限于编者水平，并且迫于时间，未能和兄弟院校共同研究，因此书中难免有不妥之处，深望各兄弟院校对本书提出宝贵意见，以资再版时修订。意见请寄至天津市天津大学动力工程系工业企业电气化自动化教研室。

編 者

1961年5月

目 录

緒論.....	5	第六章 运动元件.....	154
第一篇 敏感元件		§6-1 小功率继电器.....	154
第一章 机械量变换器.....	11	§6-2 直流电磁继电器.....	159
§1-1 位移变换器.....	11	§6-3 交流电磁继电器.....	163
§1-2 应力变换器.....	36	§6-4 极化继电器.....	170
§1-3 速度变换器.....	47	§6-5 步进分配器.....	177
§1-4 加速度变换器.....	50	第七章 自动装置用微电机.....	179
§1-5 流量变换器.....	53	§7-1 运距传输用电机.....	179
第二章 热变换器.....	55	§7-2 旋转变压器.....	195
§2-1 热电偶.....	55	§7-3 电机放大机.....	200
§2-2 电阻式热变换器.....	61	§7-4 测速发电机.....	213
§2-3 电感式及电容式热变换器.....	66	§7-5 执行电动机.....	218
第二篇 中间元件及执行元件		第三篇 自动装置	
第三章 放大器.....	67	第八章 尺寸自动检查装置.....	233
§3-1 概論.....	67	§8-1 概論.....	233
§3-2 磁放大器原理.....	69	§8-2 继电器式的检查装置.....	234
§3-3 磁放大器的反饋.....	79	§8-3 电感和电容式检查装置.....	237
§3-4 磁放大器的設計.....	92	§8-4 光学及光电式线路.....	241
§3-5 磁放大器的接綫.....	113	§8-5 电場式变换器.....	244
§3-6 介质放大器.....	119	第九章 温度测量和电子调节器.....	245
第四章 稳定器.....	123	§9-1 温度测量.....	245
§4-1 非线性元件稳定器的工作原理.....	124	§9-2 自动电子电位計及自动平衡电桥.....	251
§4-2 半导体稳定器.....	125	§9-3 电子调节器.....	261
§4-3 铁磁稳定器.....	129	第十章 同位素、超声波和紅外綫在自动化中的应用.....	275
§4-4 炭质调整器.....	137	§10-1 放射性同位素的应用.....	275
第五章 电变换器.....	139	§10-2 超声波的应用.....	280
§5-1 频率变换器.....	139	§10-3 紅外綫的应用.....	287
§5-2 相位变换器.....	143		

緒 論

1. 自动化系統和自动元件

自动化系統是由各种不同結構，不同职能的元件所組成的。利用它們，可以代替工作人員的工作，达成自动化系統的自动控制、自动檢測和自动調节作用。

現在用一个简单的例子來說明自动化系統的工作情况。图 0—1 是一个电阻炉的自动化系統。电阻炉內的热能是由电能 I^2R 变换得到的，而热能亦即电能的大小可以用变阻器改变电流 I 加以調节。为了保持炉內温度恆定，若用手动控制，就要根据溫度計的指示，人为的改变变阻器接触位置，以改变电流。这样操作無論在控制的准确度、及时性和可靠性上，都得不到滿意的保障，而且也增加了工作人員的劳动强度。

若改用自动化系統，如图所示，用热电偶以反映炉內温度的高低，它发出的信号电势，经过放大装置的放大，加在执行电动机端子上。由执行电动机拖动变阻器的动触点，以調节电流。这是一种閉环的自动調节系統，当炉內温度升高时，热电偶輸出热电势加大，经过放大，使电动机向某一方向旋轉，减少电流，相应地温度下降。当炉內温度降低时，电动机反轉，以增加电流和温度。

从这个简单的自动化系統中，可以看到，它包括了多种独立的元件，如热电偶、放大装置、执行电动机等等。換句話說，每一个元件都是自动化系統的一个組成部分，它們在自动化系統中实现某种指定的职能。这些元件叫作自动化系統的元件，简称自动元件。

自动元件由于它所处位置或担任的任务不同，可以简单的归納为三种。即：1) 敏感元件；2) 中間元件和 3) 执行元件。仍以上图为例，图中热电偶就起了敏感元件的作用，用它来感觉或反映被控制量——温度的变化，并发出与被控制量成正比的信号。从工作原理看，热电偶是将热量变为易于测量的电量的元件，故又称为热变换器。变换器亦称作发送器，是一种将任何控制的物理量变换为另一种形式的参量的设备。变换前的量可以是位移、压力、流量、水位、高度、温度、气体含量等等。变换后的量应该是一种易于傳送，并便于对下一个元件作用的量。在一般情况下，轉換后的量大多为电量，因为电量符合上面的要求。根据变换前的物理量不同，除了上述的热变换器外，在自动元件中还有机械量变换器、电变换器、磁变换器、光电变换器、声变换器等等。其中大部分是用作敏感元件，一部分用作中間元件。

图 (—1 中的放大装置或称为放大器，它的任务是将前一个元件所发出的微弱信号，放大到能使下一个元件产生动作，它的輸入和輸出量大多数是属于同类型的物理量。放大器是一种中間元件，介乎敏感元件和执行元件之間。承受敏感元件的信号，并傳送与执行元件。所以它的任务是傳送信号和变换信号，使适合于执行元件的需要。常用的

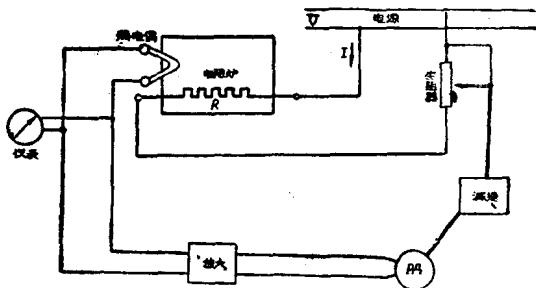


图 0—1 电阻炉自动化系統

中間元件除放大器外，還有繼電器、遠距傳輸元件、遙控元件、計算元件、變換器等。

繼電器一般設置在變換器或放大器後面，利用變換器或放大器輸出信號來控制它的動作。繼電器的功用兼有放大和時間控制的特性，但它與變換器不同，變換器的輸出連續的反映輸入量的變化，而繼電器只有兩種穩定情況——接通知開斷，輸出量只反映某一個輸入量值。

如果自動系統中兩個相鄰元件有一定的空間距離，而前一個元件的輸出是位移量，不能用機械方法傳遞命令時，就要利用遠距傳輸元件。這個元件的工作是將位移變為電量，再傳送到遠方，在接收處用接收器將電信號反變為位移。前後兩個位移量應該相等或有一定比例。

在遙控系統中，由於發生信號之處或進行操作之處與中央控制站距離較遠，同時對一個複雜的設備，進行控制和操作，需要用許多信號，這樣傳送許多不同信號到較遠距離，就要求設置許多聯系線路，結果使工作複雜，且耗費大量有用資金。為了簡化系統和節約投資，在兩地之間只設置一個或很少幾個電的通道，多數信號均經過此通道送到控制站。反過來，控制站的許多命令亦要通過此通道送到被控地點。在發送和接收處均設有選擇器，以便選送任何命令和選收任何信號到指定的設備上去。這種設備就是遙控元件。

在現代自動化系統中，常常有計算裝置參加工作。它們對某些參量進行測量，並根據這些參量間的依賴關係作數學上的運算，它的輸出信號就是計算結果，再作用到下一個元件上去。舉例來說，我們想對一個不好測量的 x 量進行控制，但 x 量與 y 、 z 兩量之間有一定的函數關係，就可以對 y 、 z 兩量加以測量，再經過計算裝置根據它們之間的函數關係進行計算，輸出量就代表 x 量。這些進行數學運算的元件就是計算元件。

自動系統最終元件是執行元件，執行元件接受中間元件傳來的命令信號，根據信號對被控制量進行調節。常用的執行元件是電動機，它簡單而方便。此外尚有氣動液動執行元件和電磁鐵適用於不同的工作範圍。

除以上所介紹的三類元件之外，自動系統中還有其他元件。例如用於使系統工作穩定和提高工作品質的穩定元件和校正元件。這兩種元件亦可以視為中間元件。還有各種測量儀表，我們統稱為測量元件，例如電流表、電壓表、溫度表等。其使用目的是顯示系統工作情况，以利監護人進行監督。這種元件是系統的輔助元件。

2. 自動元件的一般特性

自動元件是自動化系統的有機組成部分已如前述，因此，自動化系統的品質高低，在很大程度上決定於自動元件性能的優劣。自動元件因為它的結構和職能不同，特性就各有差異。各種元件的不同特性將在各章中分別加以討論。但各種自動元件亦有共同的特性。例如變換係數、誤差和慣性作用。這三種共同特性是衡量自動元件品質的主要指標，現在此作一總括的介紹：

(1) 變換係數

1) 變換函數 任何元件都具有輸入量和輸出量；兩個量之間存在着一定的函數關係——線性的或非線性的。這種輸出量和輸入量之間在全部變化過程中的函數關係，稱為變換函數。

設 x 代表輸入量； y 代表輸出量，則變換函數可以用下式表示：

$$y=f(x). \quad (0-1)$$

此式表示只有一級变换的情况。在自动化系统中一級变换的情况很少，大多数是多級变换。設每級变换的函数关系用下列各式表示：

$$y_1=f(x); y_2=f(y_1); y_3=f(y_2)\cdots\cdots$$

則总的变换函数为：

$$y_n=f_n f_2 \cdots f_1(x)=f(x). \quad (0-2)$$

式中 $f_1, f_2, \cdots, f_n$ 是任何形式的函数关系，視具体元件的特性而定。現在仍以图 0—1 系统作例，热电偶的变换函数为 $u_1=f_1(t)$ ；放大器为 $u_2=f_2(u_1)$ ；电动机为 $n=f_3(\mu_2)$ ，可以得到电机轉速与电炉温度之間的函数关系为：

$$n=f_3 \cdot f_2 \cdot f_1(t)=f(t).$$

变换函数可以用理論分析列写动态方程式的方法得到。亦可以用实验方法得到。这个量是自动学中主要的参量。它可能是綫性的，亦可能是非綫性的。可能是单值变化的，亦可能是多值变化的。

2) 变换系数 有了变换函数关系后，就可以作出元件的动态特性曲线，此曲线表示出来該元件的自变量（輸入量）和因变量（輸出量）之間的关系。如图 0—2 所示。当元件在某一工作点稳定工作时，例如图中 A 点，相应的輸出量 y_A 和輸入量 x_A 之間的比值，称为該工作点的静态变换系数 K_A ，即：

$$K_A = \frac{y_A}{x_A}. \quad (0-3)$$

当元件工作在变化过程中，例如由 B 点变到 C 点，輸出和輸入量各得到一个增量 Δy 及 Δx ，二者之比称为 B C 間的动态放大系数。即：

$$K_{dyn} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (0-4)$$

这两种变换系数是自动元件的基本特性，它們的值决定于变换函数曲线的形状。如变换函数是非綫性的，則当工作点不同时 K 及 K_{dyn} 值亦在改变。如变换函数是綫性的，則二值相等且等于常数。

变换系数的因次决定于輸出和輸入量的因次，例如图 0—1 系统中热电偶的輸入量为温度 ($^{\circ}\text{C}$)，輸出量为热电势 (TB)，所以变换系数是有因次的，为 (TB/ $^{\circ}\text{C}$)。放大器的輸出輸入同因次，因而变换系数是无因次的。

变换系数是各种元件的共同特性，可以用它来衡量元件的工作质量，但因为各种元件

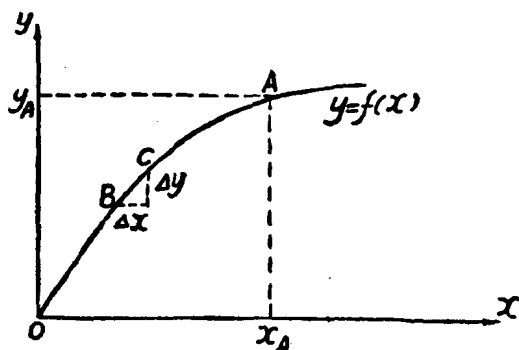


图 0—2

的作用不同, 变换系数就有不同的意义和名称。如放大器称为放大系数, 变换器称为灵敏度等。

3) 放大系数 放大器的输出与输入量之比称为放大系数, 是一个无因次的量。由于被放大的量的不同, 有电流放大系数; 功率放大系数; 电压放大系数等。

4) 灵敏度 变换器的输入与输出增量之比, 称为绝对灵敏度 S_A 。这个量是有因次的。即:

$$S_A = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}. \quad (C-5)$$

有时习惯采用变化的相对量之比表示灵敏度, 称为相对灵敏度。这个量是无因次的。即:

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y/y}{\Delta x/x} = \frac{x}{y} \cdot \frac{dy}{dx}. \quad (C-6)$$

灵敏度越高, 表示变换器性能越好, 亦就是当信号有很小的变化, 可以得到很大的输出量变化, 在实用上价值很大。

5) 稳定系数 稳定器用稳定系数大小表示它的品质。稳定和灵敏两个特性是相互矛盾的, 凡是灵敏度越高的元件, 其稳定的性能越差, 所以灵敏度的倒数就是稳定系数 C 。

$$C = \frac{1}{S} = \frac{y}{x} \frac{dx}{dy}. \quad (C-7)$$

在图 0—3 中有两条曲线 I 及 II, 在曲线 I 的 CD 段上, $\Delta x \approx 0$, CD 段的灵敏度为 ∞ 而稳定系数近于 0。曲线 II 相反, $\Delta y \approx 0$ 的段为 AB 段, 此处灵敏度近于 0 而稳定系数为 ∞ 。

(2) 误差

在输入量变化过程中, 理论上的输出量变化和实际值总是有一些出入, 这是因为实际工作与理论计算之间有一些误差产生。产生误差的原因很多, 大体上可以归纳为以下各项。

1) 计算时所用公式是近似公式;

2) 作曲线时不够准确, 或者把曲线用近似的直线代替;

3) 元件中的干摩擦、气隙的变化和材料陈老现象等因素, 事先很难估计;

4) 制造的不合要求;

5) 增量和减量曲线本来不是同一条曲线, 但设计时取用平均曲线;

6) 有些因素为了设计简便而忽略不计, 例如电枢反应; 漏磁; 失灵区; 一部分较小的参量等;

7) 外在因素的影响, 例如温度、湿度和电压的变化; 外磁场和外电场影响等。

由于以上各原因, 使实际的输出量与设计值不同。设实际输出量为 y' , 则 y' 与设计输出量 y 之差, 称为绝对误差。即:

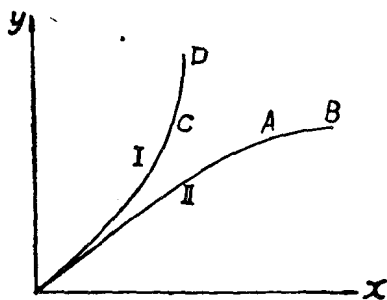


图 0—3

$$\Delta y = \pm (y' - y). \quad (0-8)$$

绝对误差和实际输出量之比,称为相对误差,以 $\alpha\%$ 表示:

$$\alpha\% = \frac{\Delta y}{y'} \times 100\% \quad (0-9)$$

如绝对误差 Δy 不变,实际输出量越大时,相对误差越小。这是一个较有意义的量,只有绝对误差大小并不能反映元件的品质。

绝对误差和最大输出量 y_{max} 之比,称为最大相对误差:

$$\beta\% = \frac{\Delta y}{y_{max}} \times 100\% \quad (0-10)$$

当 Δy 恒定时, β 值亦不变。此值常用以衡量元件工作的准确度。

以上所谈的变换系数和误差,完全是针对一个开环系统说的。如果系统是闭环的,有反馈加入工作。变换系数和误差都要改变,此点在自动学中将要介绍。

没有任何元件和系统能保证没有丝毫误差产生而完全能符合理论的要求。因为有误差存在,而有些误差并不是固定不变,要随客观条件不同发生变化,这样就使元件的特性产生失灵区域。设理论上 $y=f(x)$ 关系如图 C-4 的曲线 I。当 $x=x_0$ 时,输出量 $y=y_2$ 。但因为有误差存在,设最大误差的变换函数曲线为 II,则当 $x=x_0$ 时,输出量 y 为 y_1 到 y_2 之间的任何量,视具体条件而定。如果下一个元件要求的最低参量为 y_2 ,能绝对保证得到输出量 y 的输入量已不是 x_0 ,而是 x_2 ,在 x_0 到 x_2 之间任何 x

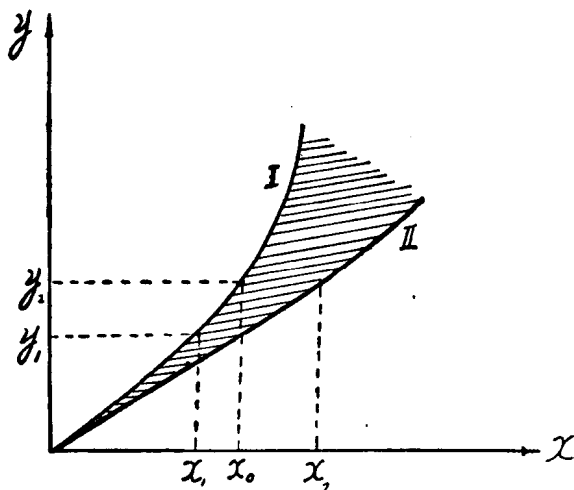


图 0-4 灵敏限度

值均不能保证得到准确的输出值 y_2 。这个区间称为灵敏度界。同理要得到严格的小于 y_1 的输出, x 应该等于 x_1 , x_0 到 x_1 之间亦是灵敏度界。现在可以给灵敏度界一个定义,就是“输入量 x 在某一区间变化,所引起输出量 y 的变化恰恰等于误差时, x 变化的区间就是灵敏度界”。在 x_1 和 x_2 之间, $y_1 < y < y_2$, y 值随误差不同而变化,是一个 $y=y_1 \sim y_2$ 的不稳定区,称为不灵敏区。

(3) 惯性作用和动态误差

输出量的变化在时间上不能与输入量变化相吻合的现象称为惯性作用。用图 C-5 作说明,图中两条曲线是以热电偶测量温度时,热电偶所感受的温度和媒质实际温度的变化曲线。因为热传导有惯性,所以热电偶的温度变化永远滞后于媒质温度的变化,此作用称为惯性作用。另外,输出量 y 在动态过程中(例如 y_{dyn})与同样输入 x 值下的静态值不同,二者之差称为动态误差。

现在用另外一个情况说明元件的惯性。设输入量 x 作一个突变,即突然由零值增到

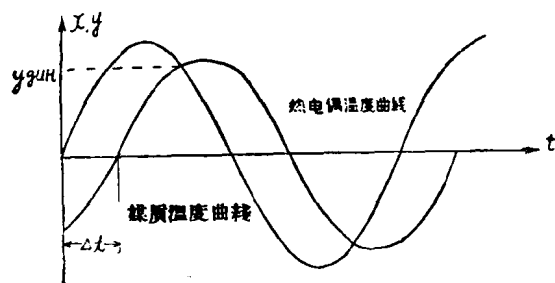


图 0—5

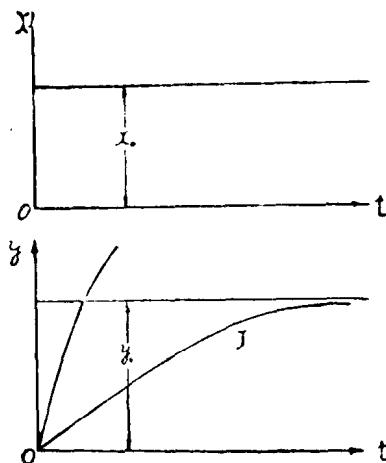


图 0—6

x_0 值。如不考虑静态误差, y 值应该比例的增到 y_0 值。因为系统中有惯性, y 值的增加并不是突变的, 而是缓慢的变化如图中曲线 I , 或是依减幅振荡的规律变化, 如图中曲线 II 。无论那一种情况, y 值的变化总是滞后于 x , 这种情况亦叫作惯性作用。

任何元件均具有一定的惯性, 不能完全避免。但自动控制系统要求动作快速, 自动元件的惯性大大影响自动控制系统的反映速度, 这样每一个元件的惯性作用亦是衡量这个元件质量的重要指标。

第一篇 敏感元件

第一章 机械量变换器

变换器的作用和定义已在緒論中介绍，它是将一种物理量转换为另一种物理量的设备。两个物理量按一定的规律变化，有一定的大小比例关系。换句话说变换后的物理量应该在性质上和大小上能严格地代表被变换的物理量。

在自动控制和遙远控制系统中，被变换的物理量或称为变换器的输入量是任何形式的物理量，而变换后的物理量或称为变换器的输出量由于傳送的方便多为电量。本章要介绍的是以机械量作为输入量，电量作为输出量的变换器，称为机械量变换器。常见的机械量有位移、应力、速度、加速度及流量等，常用的电量为电阻、电感、电容和电势。当非电量的机械量有变化时，通过变换器使输出的电量按同规律比例的变化。

以下为了叙述方便，根据输入量的不同，分为位移变换器、应力变换器、速度和加速度变换器及流量变换器四种，但其中有些变换器对各种非电量来说是具有共性的。

§1-1 位移变换器

位移变换器的输入量为机械部件的位移，输出量是电量，位移包括綫位移和角位移。由于所用的电量不同，位移变换器可以分为以下几种型式：

- 1) 利用电阻 R 的变化以反映位移变化的，称电阻式变换器；
- 2) 利用电感 L 的变化以反映位移变化的，称电感式变换器；
- 3) 利用互感 M 的变化以反映位移变化的，称互感式变换器；
- 4) 利用电容 C 的变化以反映位移变化的，称电容式变换器；
- 5) 利用电势 u 的变化以反映位移变化的，称电势式变换器。

此外继电器亦可认为是一种位移变换器，当动触点位移到一定距离时，与静触点接触，输出参量就有一个突变。利用这种特性可以形成一种位移变换器，称机械式位移变换器，常常应用在自动检查设备中。

1. 机械式位移变换器

机械式位移变换器的基本原理是借被测产品的尺寸误差，转变为某种机械另件的位移量，再利用此位移量以闭合或开断继电器的接触点，送出一定的脉冲信号。它的基本组成部件为位移机构和电触点，由于构造和完成任务的不同，触点可以分为单极限的、双极限的和多极限的三种。

(1) 单极限的机械式变换器简单结构如图 1-1(a)，这种电触点只能量测一种尺寸。图示的结构是当尺寸大于标准尺寸时发出信号脉冲，如将触点移到下方，就变为当尺寸小于标准值时发出脉冲。

(2) 双极限的如图 1-1(b)，此种结构可以同时测量两种尺寸。

(3) 多极限的如图 1-1(c)，可以测量较多的尺寸等级，因而将产品加以分类。

图 (r) 是另外一种，因尺寸不同，短路电阻的不同部分使输出电压改变，亦可以达到

分类目的。

实用上为了增加动作的灵敏度，常常采用杠杆机构传动，以使触点位移比衔铁位移增大一些。变换器输出的灵敏度决定于间隙 δ ，而间隙大小决定于电压。变换器的可靠性、稳定性和准确度决定于触点形状、材料和压力，这一点在第六章中介绍。这种变换器常用的触点材料为钨、钼和钨—钼—钽合金，如用在直流电路，阴极和阳极应该用不同金属，例如阳极用钼—钽合金，阴极用钨或钼制成。

被控电路的功率不能超过 100~150 毫瓦，以免发生火花，因此这种变换器的触点上，以连接小功率设备为宜。如功率超过 100~150 毫瓦，例如分拣机，可以将变换器的触头接到电子管栅极电路中，而将分拣机接到阳极电路中。

2. 电阻式位移变换器

利用位移变化，通过机械结构使电阻器的电阻值改变，因而引起输出电压或电流的变化，是这种变换器的工作原理。下面介绍变阻器式和电解式两种电阻式变换器，其中以前者应用较广。

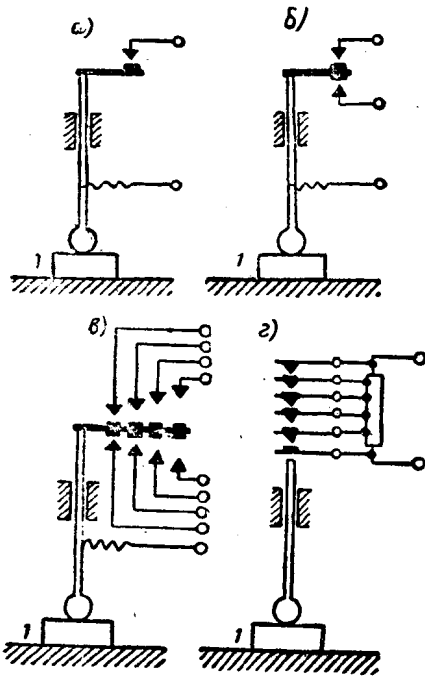


图 1-1 机械变换器型式

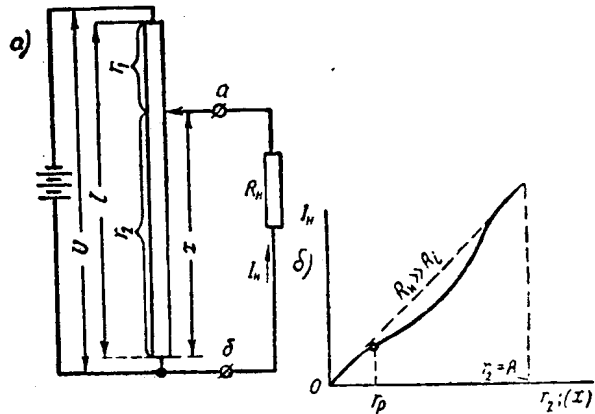


图 1-2 变阻器式变换器

(1) 变阻器式变换器

这种变换器的简单结构和工作原理可以用图 1-2(a) 来说明，它的主要部件是一个变阻器，当由于机械位移作用使变阻器上滑臂移动时， x 改变，因而 r_x 有变化，间接使输出电压 U_{ao} 或电流 I_n 变化，其关系为：

$$U_{ao} = f(x),$$

或

$$I_n = f(x).$$

(1-1)

这样变换器的特性和继电器不同，它不是突变的，而是在位移 x 由零值增加到最大极限值的变化过程中输出量是逐渐在改变的，因而它是连续的变化。

变阻器式变换器的线路联接方法如图 1-3 中的 a~g，上面 (1-1) 式说明输出量和位移 x 成正比，只有当输出端没有接上负载时才正确，当接上负载 R_2 后，特性就有所变化，现在用图 1-3 加以说明。图 1-3(a) 中加上负载后，其电流 I_n 为

$$I_H = \frac{U}{R_1 + R_2} = f_1(R_1) = f_2(x). \quad (1-2)$$

由上式看, 电流与位移 x 的关系不是直线关系, 而近似一个双曲线关系, 这样接法在实用上没有价值。图 6 与 a 不同, 设负载电阻为 R_n (在图中是一个伏特计的内阻), 按等效发电机原理可以求出 R_n 处电流 I_n 为:

$$I_n = \frac{U_{a6}}{R_n + R_i}. \quad (1-3)$$

式中 R_i 为 $a6$ 处等效电阻,

$$R_i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

U_{a6} 为 $a6$ 开路时的电压,

$$U_{a6} = \frac{U R_1}{R_1 + R_2}.$$

将 U_{a6} 值代入 (1-3) 式可得:

$$I_n = \frac{U}{(R_1 + R_2)(R_n + R_i)} R_1. \quad (1-4)$$

式中 $(R_1 + R_2)$ 为常数; 如 $(R_n + R_i)$ 亦是常数, 则 I_n 就和 R_1 成正比, 和 x 也成正比, 其特性是一个线性特性。事实上 R_i 要随 x 的改变而变化, 因此当 x 变化时, I_n 要随 R_1 及 R_i 变化, 它们的关系不是直线关系, 如图 1-2 (6) 所示实线关系, 是非线性的。但如 $R_n \gg R_i$, 则上式可以简化为:

$$\begin{aligned} I_n &= \frac{U}{(R_1 + R_2) R_n} R_1 \\ &= f_1(R_1) \\ &= f_2(x). \end{aligned} \quad (1-5)$$

就变为线性关系, 如图 1-2(6) 中虚线所示, 这也只是一个理想情况, 实际应用上常常 R_i 不能忽略, 这样就产生非线性误差。

设以 K 代表变阻器单位长度的电阻值, 可以写出下列方程:

$$\left. \begin{aligned} R_1 + R_2 &= R = Kl; \\ R_1 &= Kx; \\ R_2 &= K(l-x). \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式中 l 为全部电阻 R 的长度。

将 (1-6) 式代入 (1-4) 式可得:

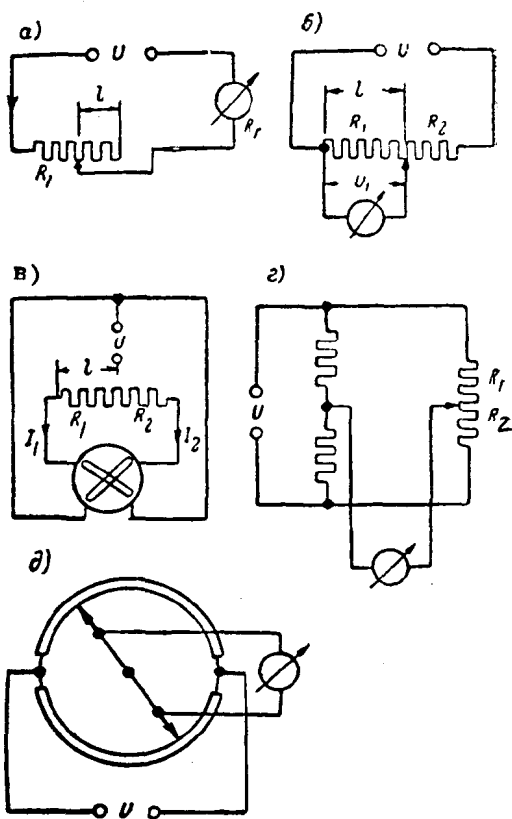


图 1-3 变阻器式变换器原理图

$$\begin{aligned}
 I_n &= \frac{UR}{R(R_n + \frac{R_1 R_0}{R})} \\
 &= \frac{UR_1}{Kl \left[R_n + \frac{K^2(l-x)^2}{Kl} \right]} \\
 &= \frac{U_1}{R_n} \cdot \frac{x}{l} \cdot \frac{1}{1 - \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \frac{R}{R_n}} \quad (1-7)
 \end{aligned}$$

当特性是綫性，亦即当 $R_n \gg R_i$ 时的电流以 I_{no} 表示，則：

$$\begin{aligned}
 I_{no} &= \frac{UR_1}{R R_n} \\
 &= \frac{U K x}{Kl \cdot R_n} \\
 &= \frac{U}{R_n} \times \frac{x}{l} \quad (1-8)
 \end{aligned}$$

两情况相比較，可得电流差值为：

$$\begin{aligned}
 \Delta I_n &= I_{no} - I_n \\
 &= \frac{U}{R_n} \times \frac{x}{l} \times \left[\frac{\frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \frac{R}{R_n}}{1 + \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \frac{R}{R_n}} \right] \quad (1-9)
 \end{aligned}$$

設 x 最大达 $\frac{l}{2}$ ，則不难求出最大誤差相对值为：

$$\left(\frac{\Delta I_n}{I_{no}} \right)_{\max} = \frac{1}{1 + 4 \frac{R_n}{R}} \quad (1-10)$$

由式可見，負載电阻越大，誤差可以越小。

图 1—3(B) 所示是一种利用流比計作为測量器的电路，因为流比計指針的偏轉角度 α 与两电流 I_1 和 I_2 之比成正比，也就是位移 x 的函数，如下式所示：

$$\alpha = f_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) = f_2 \left(\frac{R_1}{R_2} \right) = f_3(x) \quad (1-11)$$

用上式与 (1—5) 式比較，显示这样接法的一个优点，就是不受电源电压波动的影响。有时将变阻器的电阻接成桥式，如图 (r) 及 (d)。这两种接法都有方向性，即输出电压有正有負，在自动控制系统中常被利用，它們的特性如图 1—4。

(2) 变阻器的計算

变阻器的結構形式如图 1—5，在一个絕緣支架 A 上纏以电阻綫，絕緣支架用陶瓷、塑料等絕緣或外附絕緣层的金属制成，后者散热性能較好，可允許較大的負載。支架形状有环状、柱状和盘状。導綫一般可用錳銅、康銅、鎳鉻合金或鉑、金、銀、鈦等合金。选择导体和支架材料时要注意，應該选热膨胀系数相近的导体和支架材料，不然在温度变化

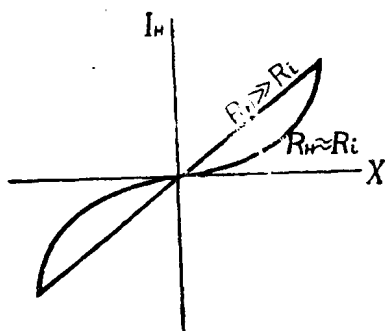


图 1-4 变阻器式变换器特性

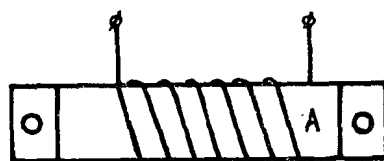


图 1-5 变阻器结构

时可能伤及导体。在缠绕导线时，对导线所施拉力亦应事先加以计算，以在最高或最低温度下，导线不致松散或涨断为度。

1) 导线计算

设 R 为给定的变阻器电阻值（欧姆）， $R = \rho \frac{l_p w}{S}$ 。

ρ 为电阻系数（欧姆·毫米²/米）

l_p 为每匝平均长度（米/匝），

S 为导线面积（平方毫米）， $S = \frac{\pi d^2}{4}$ ， d 为导线直径（毫米），

w 为匝数， $w = \frac{l}{fd}$

l 为绕组总长度（毫米），

$f = \frac{d_1}{d}$ = 占空系数，一般可取为（1.05~1.1），

d_1 为导线外径，即加绝缘层后导线直径（毫米）。

$$R = \frac{4 \rho l_p}{\pi d^2} \cdot \frac{l}{fd};$$

故得导线直径为：

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \rho l_p l}{\pi f R}} \quad (1-12)$$

各部尺寸见图 1-6。

2) 按允许温升校验直径

导线的抗张强度公式如下：

$$P = ES(\alpha_k - \alpha_{np})(\theta_1 - \theta_2). \quad (1-13)$$

式中 E 为导线材料的弹性模数，公斤/厘米²，

α_k 及 α_{np} 为支架及导线的线膨胀系数，

θ_1 为在周围介质温度最高时，支架发热温度的上限，

θ_2 为在周围介质温度最低值所决定的支架温度的下限。

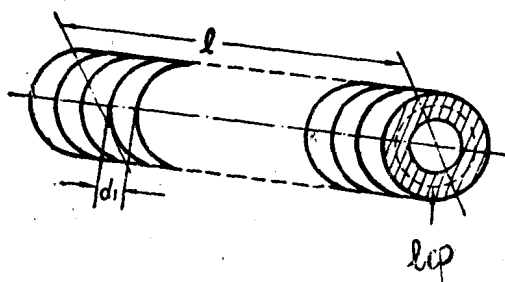


图 1-6 变阻器尺寸

导线的抗张应力 p 为:

$$p = \frac{P}{S} = E(\alpha_k - \alpha_{np})(\theta_1 - \theta_2).$$

要求抗张应力 p 应 $\leq$ 导线的弹性限度 σ_y ,

$$\text{故: } \sigma_y > E(\alpha_k - \alpha_{np})(\theta_1 - \theta_2).$$

根据导线的机械强度所决定的最大温升为:

$$\theta_1 \leq \frac{\sigma_y}{E(\alpha_k - \alpha_{np})} + \theta_2. \quad (1-14)$$

设 θ_{OM} 代表周围介质的最高温度, 因为由于机械强度限制允许导线的温度为 θ_1 , 所以导线的最大温升为:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_{OM}.$$

在允许的温升下每匝导线发散的热量 H 为:

$$H = \mu S \Delta\theta. \quad (1-15)$$

式中 μ 为导线散热系数, 单位为 (瓦/厘米²·°C), 对空气中的绕组而言, 可认为 $\mu = (1 \sim 1.4) \times 10^{-3}$ 瓦/厘米², 此值随温度略有变化, 可近似地认为 $\mu = 0.24 [1.2 + 0.003(\theta_1 - 35^\circ)] \times 10^{-3}$ (瓦/厘米²·°C)。

S 为导线表面面积 (平方厘米), $S = K \pi d l_{cp}$, 式中 K 是一个系数, 是因为导线表面有一部分不与空气接触, 因而减少有效散热面积所加的系数, 一般取 $K = 1 \sim \frac{1}{2}$, 视具体结构而定。

$$\text{因此: } H = \mu K \pi d l_{cp} \Delta\theta. \quad (1-16)$$

在允许温升限制下, 设允许通过的最大电流为 I , 此电流在每匝导体中产生的热量为:

$$\begin{aligned} H' &= 0.24 I^2 R \\ &= 0.24 I^2 \frac{\rho l_{cp}}{\pi d^2 / 4} \end{aligned} \quad (1-17)$$

为了使导线不致发热过度, 应该维持 $H' \leq H$ 这一条件, 即:

$$\begin{aligned} \frac{0.24 I^2 \rho l_{cp}}{\pi d^2} &\leq \mu K \pi d l_{cp} \Delta\theta; \\ I &\leq \sqrt{\frac{\mu K \pi^2 d^3}{0.96 \rho} \Delta\theta} = I_{on}. \end{aligned} \quad (1-18)$$

用 (1-12) 式求出导线直径后, 应该用 (1-18) 式计算允许电流 I_{on} , 用 I_{on} 值校验实际电流对选定的导线是否适合。

3) 计算绕制时导线应具有张力

设绕制时周围介质温度为 θ_0 , 为避免最低温度时导线的弛松, 所加的预应力为:

$$P = pS = ES(\alpha_k - \alpha_{np})(\theta_0 - \theta_2). \quad (1-19)$$