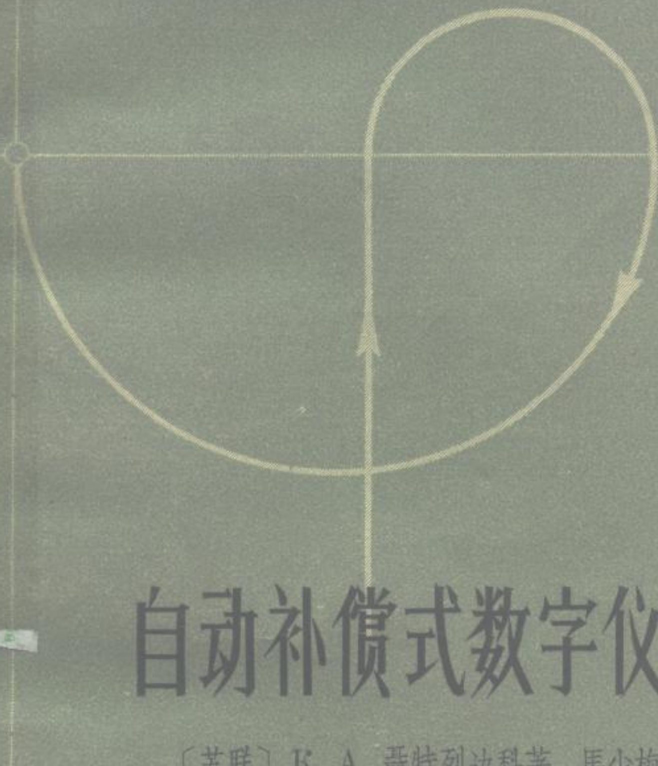
自动化丛书



自动补偿式数字仪表

〔苏联〕К. А. 聶特列边科著 馬少梅譯

上海科学技术出版社

自动化丛书 12

自动补偿式数字仪表

〔苏联〕К. А. 聂特列边科 著
馬少梅 譯 詹紀鴻 校

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书內容包括自动学及远动学的理論、自动装置、元件和仪器的結构及应用等。丛书选題主要取自苏联及其他国家的有关資料，也包括国內編写的专題論著。本丛书由“自动化丛书編輯委員会”主編。

本书討論按位自动平衡式数字伏特表、欧姆表和安培表的設計原理，主要研究二进制編碼补偿仪表，即把电压、电流和电阻轉換为二进制或二-十进制比較代碼的仪表。

书中介紹了作者近几年来的研究成果，其中某些成果还是第一次发表。

本书可供从事自动控制、自动測量和計算技术的工程技术人員参考。

ЦИФРОВЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ КОМПЕНСАТОРЫ

К. А. НЕТРЕБЕНКО

Госэнергоиздат · 1961

自动化丛书(12)

自动补偿式数字仪表

馬少梅 譯 詹紀鴻 校

自动化丛书編輯委員会主編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

商务印书館上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印張 5 24/32 排版字数 126,000

1963 年 7 月第 1 版 1963 年 7 月第 1 次印刷 印数 1—4,500

統一书号 15119·1738 定价(十二) 0.68 元

原　　序

过去一个时期，电工测量的主要形式是在仪表中将测得的电量变为机械位移，即指示仪表中指針的轉动，自动記录电位計中滑綫变阻器滑臂的移动等。在这种情况下，为了使测量結果以数字形式表示出来，不得不經过某些补充方法，如在刻度上讀数，即确定指針在刻度系統上的位置；或者測量出記录仪表上表示被测量的曲綫的纵坐标。

近几年来，以数字形式直接輸出測量結果的仪表已广泛地应用。这些数字可用普通十进制数碼表示在仪表的面板上。但是一般都用各种专用断續（数字）电碼将結果表示出来。数碼可以直接送到訊息遙傳綫上去，也可以送到自动計算机或控制机中去。

数碼轉換器，即常称之为数字測量的仪表，能应用于各种实驗室和生产上的測量。采用数碼轉換器可以将許多測量与检查过程完全自动化，而且使測量速度提高。如果按阶梯式平衡原理設計数字仪表（自动补偿式数字仪表），还可以大大提高測量精度。

数碼轉換器在生产过程綜合自动化中的应用范圍最广。

一般都是把測量各种各样的电量与非电量轉換成測量电压、电流和电阻，因此，在所有数碼轉換器当中占特別重要地位的是数字伏特表、数字安培表和数字欧姆表。

本书目的是介紹按阶梯式自动平衡原理工作的电压、电流和电阻的数碼轉換器；叙述各种补偿式数字伏特表、安培表及欧姆表的設計原理，并将它們有系統地綜合起来。对二进

制数碼自动补偿仪表予以特別重視。

本书大部分材料是根据作者在1956~1959年間完成的研究結果編写而成的，其中某些結果还是第一次发表。

目　录

第 1 章
概 論

1. 补償綫路举例

連續刻度的电位計綫路

图 1*a* 所示最簡单电位計綫路是一切自动与非自动补償器的原始图。图中包括指零檢流計 G、基准电源 E 和刻度分压器。这种綫路可用来測量輸入电压 U_{BX}。

移动分压器上的滑臂可改变平衡电压，直到它等于輸入电压 U_{BX} 时为止。滑臂移动的方向取决于$(U_{BX}-U_{yp})$的符号并且由檢流計指示出来。当 U_{BX} 和 U_{yp} 相等时，經过檢流計的电流及檢流計上的电压都等于零。U_{yp} 的数値可在分压器刻度上讀出。

作为訊息轉換器的电位計綫路

由电源 E 和分压器組成的平衡电路是一种将滑臂位移变为电压的轉換器。对于这种电路，机械位移是輸入；位移的特性可用傳遞系数 μ 表示。傳遞系数可在分压器上讀出。电压 U_{yp} 起着輸出的作用，其数値为

$$U_{yp}=\mu E \tag{1}$$

如果在平衡电路中加上指零器及根据指零器訊号控制平衡电路而使电压 U_{BX} 和 U_{yp} 相等的装置，所得系統在平衡状

态时可用下式表征：

$$U_{\text{вх}}-\mu E=\varepsilon \tag{2}$$

式中，ε 为接近于指零器灵敏阈的极小値。

当 $\varepsilon=0$ 时，式(2)变为

$$U_{\text{вх}}=\mu E \tag{3}$$

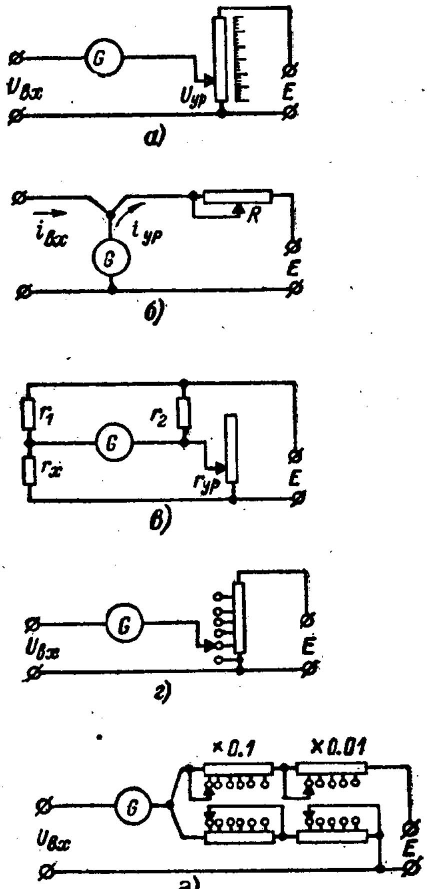


图1 补偿線路示例

此式与式(1)近似，但输入值是电压，而输出值是 μ。

电流补偿线路

图1б所示线路由指零检流计、可变电阻 R 及基准电源 E 组成。它可用来测量输入电流 $i_{вх}$。

电源 E 和刻度电阻 R 組成的平衡电路把电阻滑臂的位移轉換为电流。

在可变电阻上最好有对应于电导的刻度。当平衡电路輸出端短路时，通过輸出端的电流可用下式計算

$$i_{yp}=EG_{eд}\mu \tag{4}$$

式中 $G_{eд}$——单位电导；

$EG_{eд}$——单位电流；

μ——按刻度讀数的滑臂坐标。

用式(4)还可确定补偿线路处于平衡状态时的电流 i_{yp}。因为檢流計两端电压等于零，所以可认为平衡电路輸出端短路。

整个平衡电路(图1б)可用下式表示

$$i_{вх}=EG_{eд}\mu \tag{4a}$$

此式与式(4)近似，但输入是电流 $i_{вх}$，而輸出是平衡元件刻度上的讀数 μ。

平衡电桥——补偿装置的变型

图1в所示为测量电阻用的一种最簡单电桥。这种电桥也可看成是訊息轉換器：輸入电阻 r_x 轉換为平衡元件的坐标 μ。

在图1в中，根据下式实现轉換

$$E\left(\frac{r_x}{r_1}-\frac{\mu R_{eд}}{r_2}\right)=\varepsilon \tag{5}$$

式中 $\mu R_{eд}$——平衡元件的电阻；

μ——平衡电阻的讀数；

r_1 和 r_2——固定电阻；

ε——接近于指零器灵敏区电压的极小值。

当 $\varepsilon=0$ 时，可得

$$r_x=\frac{r_1}{r_2}\mu R_{\text{eд}} \tag{6}$$

与前述各綫路一样，这里将 r_x 轉換为 μ 的过程是用反操作元件进行的，即将机械坐标 μ 轉換为电阻 $r_{\text{yp}}=R_{\text{eд}}\cdot\mu$。

图1в所示电桥綫路，其結构与图1a所示电位計綫路相似。使这些綫路处于平衡状态的方法以及对指零器的要求也几乎沒有差别。因此，将电桥綫路以及电位計和电流补偿装置一起认为是补偿綫路的变型是合理的。

一位断續刻度式补償綫路

上述补偿綫路中的平衡电路具有連續刻度，即坐标 μ 能够在最小值与最大值之間得到任何值。

如果将平衡元件做成分段电阻的形式，并用分段开关代替滑臂，則可得到有断續刻度的补偿綫路。图1г所示电位計綫路就是一个例子。

与分段电阻开关的每个位置相应的仍是某一坐标 μ，但这个坐标仅取一定的断續值。

图1г为有一个开关的断續平衡电路，称做一位式电路，它与下述多位式电路有所区别。

多位断續刻度式平衡电路

若要得到 N 个不同的 μ 坐标，在一位式电路中必須采用有 N 个位置的开关，并且要用不少于 N 个分段的电阻器。例如，要保証 0.1% 的測量与轉換精度，就需要有 1000 个位置的开关。因此，一位断續系統是不方便的。

实际上可应用与計数系統相同的設計原理，以获得具有很多断續位数、且間隔很小(即 μ 的邻近坐标間隔不大)的轉换器。

如果有三位数，每位数又都可填写上 0、1、2、…、9 中的一个数，那么就可写出从 0 到 999 的任何一个数。同样，也可以联結三个一位平衡电路，以便在第一位数中从 0 每隔 0.1 到 0.9、在第二位数中从 0 每隔 0.01 到 0.09 及在第三位数中从 0 每隔 0.001 到 0.009 而改变 μ。所得三位电路使能每隔 0.001 从 0 到 0.999 改变 μ 值，同时也可改变与 μ 成比例的电参数。具有两个十进制数位的电位計綫路如图 1∂ 所示。

二进制分压器式自动电位計

在图 1a 中，如果将电位計綫路的滑綫变阻器改为十进制分压器(图 1∂)，就成为将电压轉换为十进制数碼的装置。如要在电桥綫路中(图 1в)得到十进制数碼，只要将平衡元件 U_{yp} 做成断續刻度的电阻箱形式等等就可以了。

如果采用二进制刻度式轉换器作为平衡电路，则可得到二进制数碼式补偿仪表。下面举几个例子。

图 2a 是四个二进制刻度的自动电位計綫路(位数是根据预定精度而选定，可达 10～15)。平衡过程由分压器完成，这种分压器与图 1∂ 所示分压器类似，系由两个同时换向的同型电阻箱組成。此外，图中还有一个沒有开关的电阻 r，它等于最低位的电阻值。电源 E 两端間的整个阻抗固定不变，并且等于

$$8r+4r+2r+r+r=16r \tag{7}$$

这是因为每一位中永远有一个电阻被接通，而另一个电阻被短路。位于图下部的电阻箱 $R_{\text{нижн}}$ 及与它成比例的輸出电压 U_{yp} 用下式計算

$$R_{\text{нижн}}=(8x_1+4x_2+2x_3+x_4)r \tag{8}$$

$$U_{\text{ур}}=\frac{R_{\text{нижн}}}{16r}E=E\left(\frac{1}{2}x_1+\frac{1}{4}x_2+\frac{1}{8}x_3+\frac{1}{16}x_4\right) \tag{9}$$

在此式中，如果第 k 級下面的开关閉合，上面的开关断开，则 $x_k=0$；如果下面的开关断开，上面的开关閉合，则 $x_k=1$。

当綫路处于平衡状态时，$U_{\text{вх}}=U_{\text{ур}}$，而对于輸入电压，可按式(9)写为

$$U_{\text{вх}}=E\sum_{k=1}^{4}\left(\frac{1}{2}\right)^k x_k \tag{9a}$$

此式中的 x_k 值决定着平衡綫路中的开关状态，这种状态就代表輸入电压的二进位数碼。

分压器系由继电器 A_1、A_2、… 的触点 $Л_1$、$Л_2$、… 来控制。

并联平衡电路式补偿綫路

图2б所示为电流补偿綫路的断續方案。图1б中的电阻 $R_{\text{ур}}$ 用二进制刻度电导箱代替。与图1б的另一区别是图2б的輸入端还接有一个电阻 R_v，这样就可以用此綫路作伏特表。

象图2б这样的补偿綫路在文献中常有叙述[14, 27, 71~74]，这种綫路广泛地应用在各种数字仪表中。

【注】图1б和图2б中电流 $i_{\text{вх}}$ 和 $i_{\text{ур}}$ 上的箭头代表电流方向。在下述綫路中，箭头不再代表普通电路中的电流方向，而代表只有一个規定作用方向元件中的訊号方向。按此原则，图1б和图2б上的箭头都应指向指零器。

图2в所示为近似二进制刻度式电位計綫路。輸入电压 $U_{\text{вх}}$ 与小电阻 r 上的电压 $U_{\text{ур}}$ 平衡。經过輸出电阻 r 的电流 i 和电阻 r 上的电压，近似地与并联电导箱的电导成比例；电导是由二位开关預先定好的。

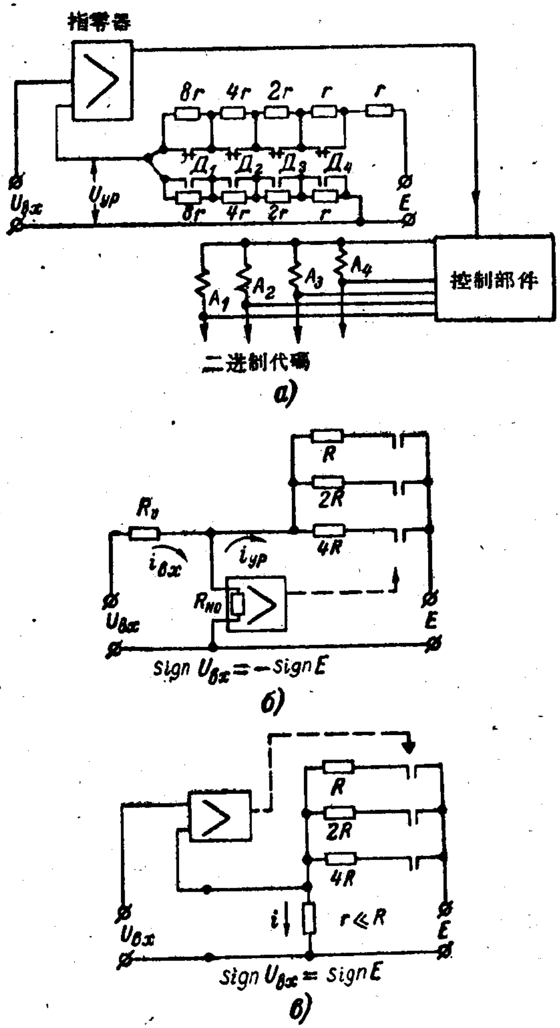


图2　二进制数碼补偿綫路示例❶

a—串联分压电位計綫路；　б—并联譯碼电流綫路；
в—电位計近似綫路

❶　图中 sign 为"符号"之意.——校注

2. 比较数碼

在一般情况下，所謂 n 位数碼，是指变量 x_1、x_2、…、x_k、…、x_n 的組合系統，其中每一个变量可用两个或更多的值。經常用的代碼主要有两种：十进制代碼和二进制代碼。

在十进制代碼中，每一个变量具有 0、1、2、…、9 这十个值中的任何一个。在二进制代碼中，变量只有 0、1 两个值。

在补偿式数字仪表中所用的代碼应是权衡比較代碼。亦即，变量 x_k 的組合系統与被測值 Y 之間的相应关系可用下式确定

$$Y(x_1、\cdots、x_n)=Y_{\text{ед}}\sum_{k=1}^{n}a_kx_k \qquad (10)$$

式中 $Y(x_1、\cdots、x_n)$——相应于已定代碼（即变量 x_k 的組合系統）的电量值；

$Y_{\text{ед}}$——与 Y 值测量单位选擇有关的比例系数；

a_k——編碼方法所固有的某一常数。

常系数 a_k 可称作位的权系数。对于十进制編碼法，其权系数可用下式計算

$$a_k=a_0\cdot 10^{-k}=a_0\left(\frac{1}{10}\right)^k,\quad k=1、2、\cdots、n \qquad (11)$$

式中，a_0 为某常数，因而位就以权系数递減的順序排列。这时式(10)可以具体表达为

$$Y=Y_{\text{ед}}a_0\sum_{1}^{n}10^{-k}x_k \qquad (12)$$

在二进制代碼中，权系数或用下式計算

$$a_k=a_0 2^{-k}=a_0\left(\frac{1}{2}\right)^k,\quad k=1、2、\cdots、n \qquad (13)$$

或根据下列原则选擇：用最簡便的方法由二进制代碼轉为十进制代碼。

在前一种情况下，可称为純二进制代碼，与数字 2 相联系的不仅有代碼变量，而且还有权系数，因而式(10)变为

$$Y=Y_{\text{ед}}a_0\sum_{1}^{n}2^{-k}x_k \tag{14}$$

对于继电器式电位計及 $n=4$ 这一具体情况，式(14)在上一节已有了介紹❶。

后一种情况下，可称为二-十进制代碼。这种代碼的編排方法在后面将有詳細介紹。

代碼的断續性

式(10)只是对需要編碼的变量 Y 中某些值 Y_i 才能成立；对于十进制編碼法，$\{Y_i\}$ 集含有 10^n 个单元；对于二进制編碼法，$\{Y_i\}$ 集含有的单元数不超过 2^n。

在进行十进制編碼及純二进制編碼时，Y_i 邻近的数值，亦即能被准确編成代碼的数值，其間距是相等的。这一距离称为代碼的断續性。

对于 n 位十进制代碼，式(10)所表达的总和值，其断續性等于 10^{-n}。对于 n 位二进制代碼，其断續性等于 2^{-n}。与此相对应的 $\{Y_i\}$ 集，其断續性分别等于 $Y_{\text{ед}}\cdot 10^{-n}$ 及 $Y_{\text{ед}}\cdot 2^{-n}$。

【例】

(1) 权系数为 $a_1=\frac{1}{2}$；$a_2=\frac{1}{4}$；$a_3=\frac{1}{8}$ 的三位二进制代碼，能准确地将 0、0.125、0.250、0.375 直至 0.875 值編成代碼；其断續性为 0.125。

对于此代碼，式(10)可以写作

---

❶ 即 $U_{\text{вх}}=E\sum_{k=1}^{4}\left(\frac{1}{2}\right)^k x_k$. ——譯注

$$Y_i = Y_{\text{ед}}\left(\frac{1}{2}x_1+\frac{1}{4}x_2+\frac{1}{8}x_3\right)$$

如果再加上第四位，其权系数为 $\frac{1}{16}$，则断續性减少一半，即等于0.0625。用所得的四位代碼可以每隔0.0625将0、0.0625直至0.9375編成代碼。

(2) 权系数为 $a_1=0.4$；$a_2=0.2$；$a_3=0.2$ 的三位二进制代碼，能准确地将0、0.2、0.4、…、0.8編成代碼。

这时式(10)可以写作

$$Y_i = Y_{\text{ед}}(0.4x_1+0.2x_2+0.2x_3)$$

在这种情况下，对于某給定值 Y_i，用此式排列权系数的方法并非是单一的。例如，数0.2可用代碼010表示，也可以用代碼001表示。为了使代碼和需要編碼的值之間保持单一关系，还要加上某些其他限制。

(3) 二进制双位代碼的权系数为 $a_1=0.1$ 和 $a_2=0.3$。用这一代碼可以表示下列各数：0、0.1、0.3、0.4。这里的断續性不是固定不变的，它或者等于0.1，或者等于0.2。

二-十进制代碼

权系数为8、4、2、1、0.8、0.4、0.2、0.1的八位二进制代碼，可作为采用二-十进制代碼的簡单例子[22, 45]。用这种代碼可以每隔0.1将从0～16.5的数值編成代碼。这时总和值 $(8x_1+4x_2+2x_3+x_4)$ 立刻就定出第一个十进制数碼，而总和值 $(0.8x_5+0.4x_6+0.2x_7+0.1x_8)$ 乘以10后得出第二个十进制数碼。同样还可以編出其他二-十进制代碼。每一种代碼都可用 A_1、A_2、A_3 和 A_4 这四个正整数表征，这四个正整数的选擇原則是使綫性組合

$$S = A_1x_1+A_2x_2+A_3x_3+A_4x_4 \tag{15}$$

能够获得从0到9之間的任一整数值；因为是二进制代碼，数 x_k 等于0或1。这时前四个二进制数位的权系数

$$a_k = a_0A_k;\quad k=1、2、3、4 \tag{16}$$