

中等專業學校教學用書

電磁測量儀表的 計算與結構

下 冊

阿盧邱諾夫著



機械工業出版社

中等專業學校教學用書



電磁測量儀表的計算與結構

下 冊

結

費 正 生 譯

蘇聯電氣工業部教育局審定為中等技術學校教科書



機械工業出版社

1955

出版者的話

本書係根據蘇聯動力出版社（Госэнергоиздат）出版的阿盧邱諾夫（В. О. Арутюнов）著“電磁測量儀表的計算與結構”（Расчет и конструкции электроизмерительных приборов）1949年版譯出。原書經蘇聯電氣工業部教育局審定為中等技術學校教科書。

本書敘述電磁測量儀表的一般特性、誤差、普通元件的結構和計算以及磁電式、電動式、電磁式、感應式、靜電式等儀表和流比計的結構和計算；也簡單地論述了自動記錄儀表和電阻器。本書除供動力和電器方面的中等專業學校作教科書或教學參考書外，同時也可用作工程技術人員的參考書。

譯本分上下兩冊出版，上冊包括第一章至第五章，下冊包括第六章至第十三章。

〔電磁測量儀表的計算與結構〕下冊勘誤表

頁數	行 數	不 對 的 字 句	對 的 字 句
14	倒 7 小標題	2 整流式儀	2 整流式儀表
44	倒5公式	$\frac{0.5\beta_w - \gamma_t}{\beta_o}$	$\frac{0.5\beta_w - \gamma_t}{\beta_o}$
60	倒 1	可以決定繞組的最有利的重量	可以決定繞組的最有利的重量。
91	倒 1	的情況下可以認為	的情況下可以認為：
157	表中 第9、10欄	有些小數點未印出來	第一個數字後都有小數點
158	表中 第 4 欄	有些小數點未印出來	第二個數字後都有小數點
158	表中 第6、9欄	有些小數點未印出來	第一個數字後都有小數點

書號 0706

1955年3月第一版 1955年3月第一版第一次印刷
787×1092¹/₁₈ 201千字 印張9¹/₉ 0,001—4,100冊

機械工業出版社（北京盛甲廠17號）出版

機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可證出字第008號

定價（8）1.30元

目 次

第六章 附變換器的磁電式儀表

1 熱電式儀表	5	2 整流式儀表	14
63 熱變換器的裝置	5	68 整流器的特性和結構	14
64 熱變換器的結構	7	69 整流式儀表的線路	16
65 熱電式儀表的測量機構和線路	8	70 整流式儀表的誤差	20
66 熱變換器的計算	10	71 振動式整流器及其應用	21
67 熱電式儀表的誤差	12		

第七章 電動式儀表

1 電動式儀表的基本特性和結構	24	差	41
72 基本特性和運用範圍	24	80 伏特計的計算	44
73 測量機構的結構	24	81 電動式安培計的內部聯接線路和誤差	46
74 轉動力矩	27	82 安培計的計算	49
75 標度尺特性	31	3 鐵磁電動式儀表	52
2 電動式儀表的內部聯接線路和計算	32	83 測量機構的結構	52
76 電動式瓦特計的內部聯接線路和誤差	32	84 轉動力矩和標度尺特性	53
77 三相互特計	38	85 鐵磁電動式儀表的內部聯接線路和誤差	55
78 瓦特計的計算	40	86 鐵磁電動式儀表的計算	60
79 電動式伏特計的內部聯接線路和誤差			

第八章 電磁式儀表

1 非共振電磁式儀表	62	91 電磁式儀表的計算	71
87 測量機構的基本特性和結構	62	2 共振電磁式儀表	73
88 轉動力矩和標度尺特性	66	92 赫茨計的結構	73
89 內部聯接線路	68	93 赫茨計的計算原理	74
90 電磁式儀表的誤差	69	94 赫茨計的誤差	78

第九章 感應式儀表

1 單磁通感應式儀表	80	98 單磁通式儀表的誤差	85
95 概論	80	2 多磁通感應式儀表	86
96 測量機構的作用原理和結構	81	99 感應式瓦時計主要零件的結構	86
97 轉動力矩和標度尺特性	82	100 感應式瓦時計的力矩	89

101 瓦時計的負載曲線.....	93	103 驅動元件的計算.....	97
102 瓦時計的附加誤差.....	94	104 轉動力矩和反作用力矩的計算.....	102
3 瓦時計測量機構的計算	97		

第十章 靜電式儀表

105 測量機構的基本特性和結構.....	105	107 轉動力矩和標度尺特性.....	109
106 聯接線路和保護方法.....	107		

第十一章 流比計

1 普通特性和理論	112	118 具有變化空氣隙的鐵磁電動式流比計.....	127
108 作用原理和應用範圍.....	112	119 具有兩個共軸框架的鐵磁電動式流比計.....	129
109 流比計的理論.....	114	120 鐵磁電動式補償流比計.....	130
110 測量範圍.....	117	121 電動式和鐵磁電動式流比計的聯接線路.....	131
111 流比計的誤差.....	118	4 電磁式流比計	134
2 磁電式流比計	119	122 測量機構的裝置和結構的原理.....	134
112 測量機構的結構.....	119	123 電磁式流比計的原理.....	136
113 測量機構的計算.....	121	124 測量機構的計算.....	138
114 磁電式流比計的聯接線路.....	123	125 電磁式流比計的聯接線路.....	141
3 電動式流比計	124		
115 裝置原理和基本型式.....	124		
116 測量機構的結構.....	125		
117 電動式流比計的理論和計算.....	126		

第十二章 自動記錄儀表

126 概論.....	143	129 記錄的矯正法.....	145
127 記錄方法.....	144	130 驅動機構.....	146
128 圖表形狀.....	145	131 測量機構的結構特性.....	148

第十三章 電阻器

132 電阻器的元件.....	150	情性力矩.....	156
133 電阻線圈.....	150	3 ПЭ 和 ПЭЛЛО 牌號導線的某些數據	157
134 轉換裝置.....	152	4 MKSM (公尺, 公斤, 秒, 馬格) 單位制和CGSM₀ (公分, 克, 秒, $\mu_0=1$) 單位制的相互關係.....	159
135 電阻箱線路和電阻串.....	154	索引.....	160
附錄.....	156		
1 電磁測量儀表的內部損耗.....	156		
2 電磁測量儀表某些零件對O—O軸的			

第六章 附變換器的磁電式儀表

磁電式測量機構的特徵是功率消耗非常小，小到可以用十微瓦或一微瓦來計算。沒有其他型式的電磁測量儀表（靜電式除外）可以在這方面比得上磁電式儀表。磁電式儀表同時以高靈敏度和高準確度著稱。在這方面也是所有其他型式的機構所不及的。因此，自然會想到用這種型式和某種變換器配合來測量交流電。要在很高的頻率下測量而其他型式的儀表一般不能用時，這就特別重要，因為在很高的頻率情況下，測量機構的線圈具有很大的電抗，使所研究的過程在很大的程度上發生偏差。

熱電偶、整流器和電子管均可用作變換器。磁電式測量機構和一個或幾個熱電偶相配合而成的磁電式儀表稱熱電式儀表。磁電式機構和各種整流器的組合稱整流式儀表，以前稱檢波式儀表。磁電式機構和電子管組合稱電子管式儀表。

熱電式儀表主要在高頻率之下測量時採用，因為這種儀表的示數與頻率的關係很小，而接入交流電路內的熱電偶電阻對所研究的現象影響比較小。整流式儀表的應用範圍是中頻和更高的頻率（達 10~20 仟赫茨）。這種本身消耗小的儀表可以接入功率較小的電路內，以保證相當高的測量準確度。整流式儀表通常是複用的，既可用於直流，又可用於交流。

利用電子管的電子管式儀表不僅可以用作變換器，也可以用作放大器，它能測量非常小的電壓，並且幾乎沒有消耗。在無線電裝置中，電子管式儀表用得很廣。電子管式儀表的線路是特殊的；它們大部分用作放大器或整流器，單純地用來測量的比較少。電子管式儀表的測量機構和普通的磁電式測量機構沒有區別。因此本書不研究電子管式儀表的線路。

1 熱電式儀表

63 熱變換器的裝置 一個或幾個熱電偶稱熱變換器。在待測電流所產生的熱量作用下，熱電偶裏產生了熱電動勢。熱電動勢決定於待測電流的強度。測量熱電動勢的磁電式測量機構可以直接用待測量的單位來刻度。

根據待測交流電流產生的熱量對熱電偶工作端（所謂熱銲接頭）傳導的方法，熱變換器分接觸式和非接觸式兩種。在接觸式中，電流沿加熱器 AB （圖 164a）流過，而由兩種不同的金屬 M 和 N 組成的熱電偶的熱銲接頭 C 就銲在或緊貼在加熱器上。熱電偶的冷端 $a-b$ 和測量機構相聯接。

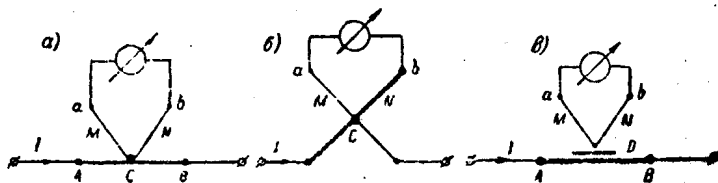


圖 164 熱變換器的線路

接觸式熱變換器常把兩種不同的金屬固接成十字形，如圖 164b 所示，因此這種變換器也叫做‘熱叉’。在接觸式熱變換器中，工作端 C 處不是點，而是有某些長度的。因此，假如把這種變換器接入電路，則流經測量機構的不僅是熱電動勢引起的電流，還有由於電流 I 在工作端所佔的長度內電壓降所引起的電流。這種情況在直流電中使得示數和電流方向有關，而在交流電中，由於測量計的電感而出現附加誤差。因此，附有接觸式熱變換器的儀表通常在交流電中進行刻度。

非接觸式變換器(圖 164a)就沒有這個缺點，因為熱銲接頭不與加熱器 AB 接觸，而和它有一些距離，中間用絕緣而導熱的隔離層 D 隔開。因而，熱並非直接而是通過對流和輻射傳到熱電偶上去的。因此，工作端的溫度決定於它與加熱器間的距離以及熱變換器的位置。為了減小這種關係，並使儀表示數有很大的穩定性，在這種熱變換器中，用絕緣物質(如軟熔玻璃)使熱銲接頭與加熱器牢牢地固接在一起。這種方法雖保證了示數保持不變，但由於熱變換器總質量增加而使熱能增加。

非接觸式變換器的很大的優點是可以由幾個串聯的熱電偶(圖 165a)。這種熱電偶組叫熱電池組。要想用接觸式熱變換器來構成熱電池組，必須設法使直流電路和交流電路分開，如圖 165b 所示。這種聯接不但複雜，並且示數和頻率有關。

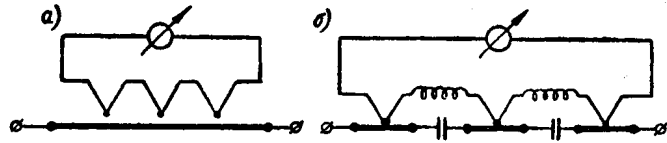


圖 165 熱變換器組成的熱電池組：a) 非接觸式；b) 接觸式

圖 166a 所示為由直接加熱的熱電偶聯成的橋式線路，在這線路中，熱電偶的熱電極本身就是加熱器。在線路中，橋的每一個臂包含四個(可以是任何數)熱電偶，並

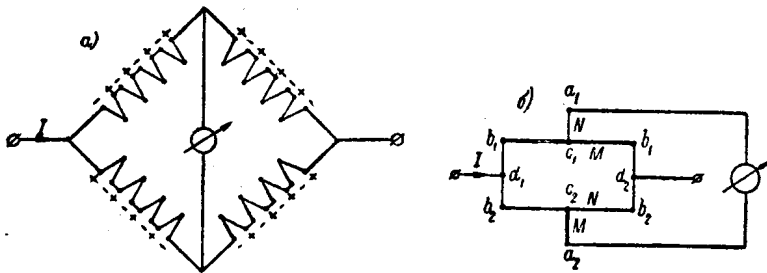


圖 166 熱變換器的橋式線路

使它們的熱電動勢相加(在圖 166a 中，熱電動勢的方向用 + 和 - 來表示)。交流電流不會流入測量機構，因為電橋的四個臂的電阻都是一樣的。同樣，熱電動勢產生的直流電流也不會流入交流電路中去。為了在熱電偶的工作端和自由端(換句話說，即熱端和冷端)間建立必要的溫度差，把冷端接在導熱良好的大塊的黃銅或紫銅上，而熱電偶的工作端在空氣中，即在導熱不良的介質中，因而易於加熱。可惜待測電流直接流經熱電偶的工作端，因而產生所謂別里契(Пельть)效應。別里契效應是這樣：當電流從一種金屬流到另一種金屬去的時候，根據電流的方向而在這兩種金屬的銲接處

產生附加加熱或附加冷卻。因此，熱電動勢也隨電流方向而不同，這就不容許附有橋式線路變換器的熱電式儀表在直流電中刻度。

圖 1666 所示的橋式線路沒有這個缺點，橋的四個臂由兩個加熱器 b_1b_1 和 b_2b_2 形成，加熱器是用兩種不同的金屬 (M 和 N) 做的。與測量機構相接的那兩個橋的頂端由兩個熱電偶的工作端 c_1 和 c_2 組成；其他的兩個頂端 (d_1 和 d_2) 是兩個比較大的金屬塊，待測電流就從那裏引入。熱電偶的自由端在一邊是 a_1b_1 ，在另一邊是 a_2b_2 。假如 c_1 和 c_2 二點正好在加熱器 M 和 N 的幾何中心，則交流電流不會流到測量機構的電路中去，而直流電流也不會流到交流電路中去。除此之外，待測電流不會從一種金屬流到另一種金屬去，因而也就沒有別里契效應。由於構造簡單和利用價值高，圖 1666 的線路在熱電式儀表中用得最廣。

64 熱變換器的結構 在其他條件相同的情況下，熱變換器產生的熱電動勢決定於熱電偶工作端和自由端的溫度差。而溫度差決定於電流強度。在所需溫度差相同的情況下，對大電流來說，應使加熱器具有較大的截面積，而對小電流而言，剛好相反，應使它具有較小的截面積。可是，要把加熱器做得比一定的尺寸還小實際上是不行的，同時，在小電流的情況下，我們不可能得到足夠的溫度，因為熱流小，發散到空氣中去的熱量相對地比較大。因此通常把小電流熱變換器放在真空中(圖 167)，並稱為真空式熱變換器(以別於空氣式)。在電流很大的情況下，剛好相反，必須克服熱流過大的困難。為此，熱電偶常備有散熱片，如圖 168a 所示。

圖 1686 所示為按圖 1666 的線路聯接的熱變換器的結構。圖中，兩個大黃銅塊 $A-A$ 用來把電流引入熱變換器，而端鈕 $B-B$ 則與測量儀表相連。熱電偶多用錫接法錫在加熱器上，有時也用硬錫料鑲錫。

熱變換器可以是內附的，也可以是外附的。在外附熱變換器的情況下，熱變換器放在測量儀表外殼之外，它用一種特殊規格的導線和儀表相連。

熱電偶的熱電極材

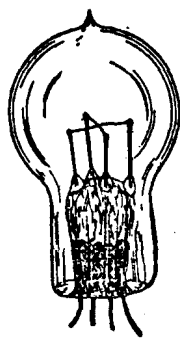


圖167 小電流真空式熱電偶

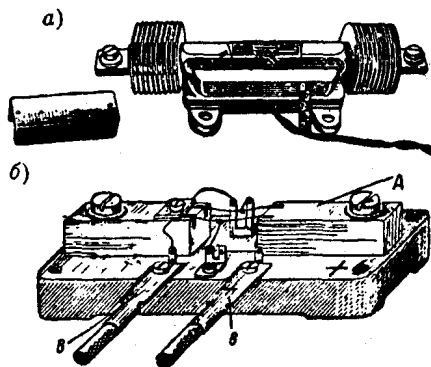


圖168 按圖1666線路聯接的熱變換器的結構

表 10

熱電偶的材料	最大的容許加熱溫度(°C)	最大溫度時的熱電動勢(毫伏)
鐵—康銅(50%銅和50%鎳)	600	30
鎳鎘合金(10%鎘,90%鎳)—康銅	600	40
鎳鎘合金—鎳銅合金(55%銅和45%鎳)	600	49
錳銅—康銅	200	10
金鈦鉑合金(60%金,30%鈦,10%鉑)—鉑鎢合金(90%鉑,10%鎢)	1000	46

料應滿足一定的要求,主要是:高的熱電動勢,熱電特性的不變性,高的容許加熱溫度,高的機械強度,拉成細導線和薄帶條的可能性。最常用的熱電偶及其特性列在表 10 中。

爲了使儀表承受一些過載(通常是50~100%),額定溫度應比容許溫度小二分之一到四分之三。據此,與儀表全偏轉相應的熱電動勢通常在 2~25 毫伏的範圍內。

加熱器的材料要儘可能地經得住高溫,並具有高電阻係數。否則,就必須把加熱器做得很薄。最常用的加熱器材料是:康銅,鎳鉻合金,金鈹鉑合金,鎢。表 11 列出了某些金屬的數據。

表 11

65 熱電式儀表的測量機構和線路計算和試驗證明,熱變換器中熱電偶的工作端和自由端的溫度差,大概地和電流平方成正比。變換器中所用材料的熱電動勢與工作端和自由端的溫度差成正比。因此,

材 料	容許加熱溫度(°C)	電阻係數(歐姆公厘 ² /公尺)	每增10°C的溫度係數(0~100°)(以百分率計)
康銅	500	0.50	-0.01~0.04
鎳鉻合金(Хромель)	1000	0.68	+0.5
鎳銅合金	600	0.47	-0.15
鉑鎢合金	1300	0.34	+0.75
金鈹鉑合金	1000	0.36	+0.2
鉑	1300	0.11	+3.5
鎢(在真空中)	3000	0.056	+4.5
鎳鉻合金(Нихром)	1000	1~1.1	+0.1~0.4

測量機構框架中的直流電流爲:

$$I_0 = \frac{E_T}{r} = \frac{kI^2}{r}。$$

式中 E_T ——熱電動勢; I ——待測交流電流的有效值;
 r ——測量機構電路的全電阻; k ——待測電流和熱電動勢的比例係數。

由此,磁電式測量儀表(比較第 58 節)指針的偏轉角爲:

$$\alpha = \frac{Bsw}{W} k \frac{I^2}{r} = cI^2。 \quad (148)$$

因而,熱電式安培計的標度尺有平方特性:標度尺開端的分格很緊密,末端的分格則很寬。

標度尺要有平方性,必須假定:熱變換器的加熱器電阻不隨待測電流而變。其實,這個電阻是會因加熱器被待測電流加熱而改變的。因此,根據加熱器材料溫度係數的大小,標度尺特性是會或多或少地與平方性有所不同的。

假如該材料的溫度係數是正的,則隨着待測電流增加,加熱器的電阻也增大,而我們所得的標度尺分格放寬得快些。反之,假如溫度係數是負的(例如康銅的溫度係數),則熱量增加得慢些,而標度尺的分格也放寬得慢些。

必須着重指出,和均勻標度尺比較起來,不均勻標度尺使熱電式儀表的誤差提高了。實際上,對(148)式微分得:

$$d\alpha = 2cIdI。$$

因爲全偏轉角 α_n 是在額定電流 I_n 的情況下到來的,它等於:

$$\alpha_n = cI_n^2, \quad \text{則} \quad \frac{d\alpha}{\alpha_n} = \frac{2I}{I_n} \times \frac{dI}{I_n}。$$

但 $\frac{\alpha}{\alpha_n}$ 是測量機構的單位誤差 γ_{an} ，而 $\frac{dI}{I_n}$ 是整個熱電式儀表的單位誤差。因此

$$\gamma_{an} = 2 \frac{I}{I_n} \gamma_{In}, \quad \text{或} \quad \frac{\gamma_{In}}{\gamma_{an}} = \frac{1}{2 \frac{I}{I_n}}。$$

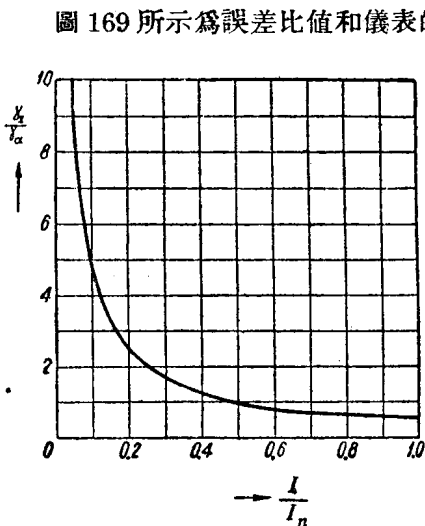


圖 169 熱電式儀表的誤差曲線

圖 169 所示為誤差比值和儀表的相對示數（以額定電流的分數表示）的關係曲線。由曲線可見，誤差 γ_{In} 在標度尺各處不是常數：在趨近標度尺零標值時，它增長得很快。假如測量儀表的摩擦誤差是標度尺長的 1%，則當示數等於額定值的 30% 時，整個熱電式儀表的單位誤差是 1.67%，當示數等於額定值的 20% 時，單位誤差是 2.5%。這就是說，想構造熱電式儀表時，譬如 1.0 級儀表，即在標度尺工作部分的長度內（待測量額定值的 25~100%）單位誤差不超過 $\pm 1%$ 的儀表，我們所應取的測量機構，它的基本誤差至少要小一半（當 $\frac{I}{I_n} = 0.25$ 時， $\frac{\gamma_{In}}{\gamma_{an}} = 2$ ）。

這種情況給測量機構的計算增添了附加條件：在其他條件相同的情況下，熱電式儀表的測量機構應比類似的磁電式儀表好些。實際上供給儀表電路的熱電動勢通常很小。當儀表在滿標值時，它是 2~25 毫伏。因而熱電式儀表的測量機構應該是靈敏的毫伏計，它在框架電路的電阻比較低的情況下工作，以便在測量機構中得到相當大的電流。

以前曾證明（第 51 節），毫伏計繞組的最有利重量等於活動部分結構重量的一半，此時的最高品質係數等於〔第 58 節(122)式〕：

$$A_{cmax} = \frac{kc\sqrt{10^3BsU\sqrt{r_0}}}{(r_0+r_1)\rho Gk\sqrt{\gamma k_g \rho}}。$$

就與熱變換器一道工作的毫伏計的情況而言，我們應用熱電動勢 E_T 來代替 U ，而在附加電阻 r_1 上應加上熱電偶電阻 r_T 。假如在儀表框架上的電壓降 U_0 用熱電動勢 E_T 來表示，即：

$$U_0 = \frac{E_T}{r_0+r_1+r_T} r_0，$$

則 A_{cmax} 應用下式表示：

$$A_{cmax} = \frac{kc \times 10^{-3}Bs}{\rho Gk\sqrt{\gamma k_g \rho}} \times \frac{U_0}{\sqrt{r_0}}。$$

$\frac{U_0}{\sqrt{r_0}}$ 值就是熱變換器給予測量機構的功率 P_0 的平方根。因此，電阻 r_0 和 (r_1+r_T) 應選擇得使測量機構分担的功率最大。這種情況在 $r_0=r_1+r_T$ 的條件下是會發生的。熱變換器則要計算得儘可能給與外部電路較大的功率。

爲了構成與小電流熱變換器相串聯的熱電式伏特計，可接入無感附加電阻，而儀表直接以伏特來刻度。在伏特計中，通常採用電流在幾十毫安左右的真空式熱變換器。

也可以利用熱變換器來構成熱電式瓦特計。這種瓦特計具有能在高頻率下測量功率的優點。圖 170 所示為接入熱變換器來測量功率的線路之一。圖中，電流互感器 T_1 和電壓互感器 T_2 連接得使它們的次級電流 I_2 和 i 在加熱器 P_1 中相加，而在加熱器 P_2 中相減。磁電式測量機構的框架 A 連接得使能測量由兩個熱電池組產生的熱電動勢 E_1 和 E_2 之差。這二個熱電動勢可以寫成：

$$E_1 = k(I_2 + i)^2 \quad \text{和} \quad E_2 = k(I_2 - i)^2。$$

可是，電流 I_2 和 i 相應地與負載電流 I 和網壓 U 成正比。因此，儀表所測量的電動勢差 $E_1 - E_2$ 為：

$$E_1 - E_2 = k(k_1 I + k_2 U)^2 - k(k_1 I - k_2 U)^2 = 4kk_1k_2 UI = cP。$$

換句話說，儀表的示數將與功率 P 成正比。製造這種儀表的主要困難在於不易選擇兩

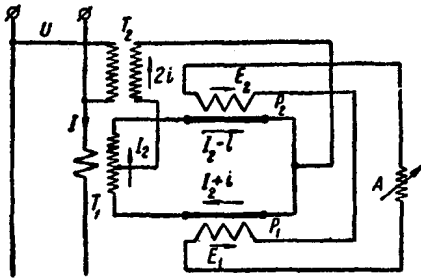


圖 170 熱電式瓦特計的線路

個完全一樣的熱變換器，因為它們之間特性的差異會引起顯著的誤差。除此之外，因在線路中有互感器存在，所以在高頻率的情況下，就出現附加誤差。在一系列特殊的情況下，這種瓦特計畢竟是能够在高頻率下測量功率的唯一儀表。

66 熱變換器的計算 正如我們曾看到的那樣，在大部分的場合下，熱電偶的工作端

是用加熱器中所產生的熱來加熱的。加熱器是流通待測電流的導線或金屬帶。假如熱電偶的工作端直接和加熱器相連，則熱電偶工作端的溫度等於加熱器的溫度。在同樣的情況下，當熱電偶與加熱器相隔絕時，工作端的溫度與加熱器的溫度成正比，而比例係數則決定於加熱器的結構和熱電偶與加熱器導線的相對位置。我們如知道了熱電偶工作端的加熱溫度和製造熱電偶的熱電極材料，則根據曲線或表（見表 10），很易找到在加熱器中電流額定時熱電偶產生的熱電動勢。因此，變換器的計算最後在於選擇加熱器的尺寸和材料，以便在熱電偶工作端放置的地方得到一定的溫昇。

當然，必須把熱變換器計算得在一定的材料之下得到最大的熱電動勢。因此，在選擇了加熱器的材料並規定了某種安全係數（根據過載能力的條件）後，我們再確定最高的溫度，熱變換器的加熱器必須根據這種溫度來計算。因為溫度隨電流平方而增高，所以，對一定的材料而言，工作溫度是其最高容許溫度除以過載因數的平方後所得之數。例如，假如加熱器用金鈹鉑合金線（見表 10）製成，它的容許溫度為 1000°C ，如過載因數為 1.5，則工作溫度等於 $\frac{1000}{1.5^2} = 445^{\circ}\text{C}$ 。由此，很容易找到熱電偶或熱電池組的熱電動勢。

這樣一來，加熱器的尺寸應這樣選擇：當加熱器中的待測電流達額定值時，產生出給定的熱電動勢。

由一根金屬線組成的加熱器的計算可以根據下面的見解來進行。

從這根金屬線中取加熱器的某一分段 dx 。當電路處於穩定狀態時，該分段將因

熱量輸入和輸出的結果而處於某種熱平衡，它的溫度也將由熱平衡來決定。

由於電流 I 通過該分段而於其中產生的熱量，按楞茨-焦耳定律計算為：

$$Q_1 = 0.24I^2 r_Q,$$

式中 r_Q ——該分段的電阻，在溫度 Θ 的情況下，它可以用下式來計算：

$$r_Q = \frac{\rho dx}{q} (1 + \beta_Q \Theta).$$

式中 β_Q ——溫度係數； ρ ——材料的電阻係數； q ——加熱器的截面積。

直接由周圍空氣導散的熱量與該分段的表面積和溫度成正比：

$$Q_2 = \delta \Theta p dx,$$

式中 p ——加熱器截面積的周長； δ ——空氣的導熱係數。

由於輻射而輸出的熱量用下式來決定：

$$Q_3 = b\sigma(T^4 - T_0^4)p dx,$$

式中 T, T_0 ——相應為加熱金屬線和空氣的絕對溫度；

b ——不完全輻射係數，它可以取 0.6；

σ ——斯提方-保利茨曼(Стефан-Больцман)常數，它等於

$$1.38 \times 10^{-12} \frac{\text{卡}}{\text{公分}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{度}^4}。$$

除此之外，必須注意由鄰近的導線的較熱部分流入所研究的部分的某些熱量 Q_4 ，和由所研究的部分流入導線的比較不熱的部分的某些熱量 Q_5 。

當加熱器的該分段輸入的熱量和輸出的熱量相等時，便達到熱平衡，用公式來表示為：

$$Q_1 + Q_4 = Q_2 + Q_3 + Q_5。$$

由上式也可求出導線該部分的未知溫度。假如對導線的所有分段都進行這種計算，並找出沿導線長度的溫度曲線，則可以決定最高的溫昇，它通常在導線的中心。

可以用近似的解法：假設：第一，忽略 Q_4 和 Q_5 （即由相鄰的導線部分輸入和輸出的熱量）；第二，認為輻射損失（ Q_3 ）不與溫度四次冪之差成正比，而與溫昇 Θ 的一次冪成正比，即 $Q_3 = b\sigma k \Theta p dx$ 。第一個假設對導線中段來說與事實相當接近，熱電偶剛好放在那個地方，同時，導線愈長，與實際情況接近的程度愈大。下面是對所得結果的修正方法。第二個假設也是可以的，因為在通常發生的溫度（300~400°C）情況下，輻射損失比較小，所以它在計算方面雖很不準確，但對最後結果的影響不大。在這些假設的情況下，熱平衡方程式可以有如下的形式：

$$0.24I^2 \frac{\rho}{q} (1 + \Theta \beta_Q) - \delta \Theta p - b\sigma k \Theta p = 0。$$

從上式解得 Θ ：

$$\Theta = \frac{0.24I^2 \rho}{pq \left(\delta + b\sigma k - \frac{0.24I^2 \rho \beta_Q}{pq} \right)}。 \quad (149)$$

係數 k 可從下式決定：

$$k = \frac{T^4 - T_0^4}{T - T_0}。$$

導熱係數 δ 可從下式決定：

$$\delta = \frac{\lambda_1}{d} \psi,$$

式中 λ_1 ——空氣的熱傳導，由圖 1716 的曲線來決定； d ——加熱器導線的直徑（公

分); 係數 ψ 在 0.5~2.0 範圍內, 而平均溫度 T_{med} 等於:

$$T_{med} = k_m T_0$$

式中 k_m —— 係數, 由圖 171a 的曲線來決定。

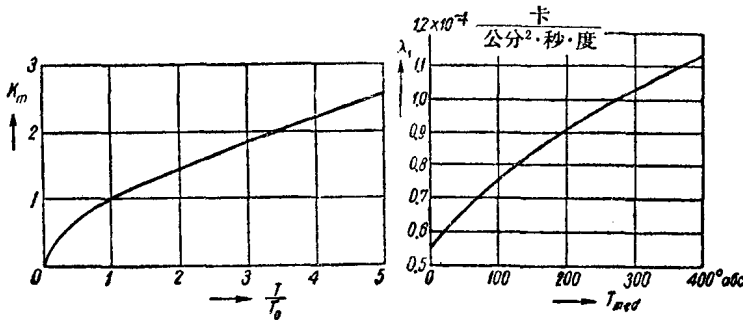


圖171 決定係數 k_m 和空氣熱傳導的曲線

由於採用了上面所說的近似解法, 根據上式計算出來的導線溫昇 Θ 較實際情況略高。

爲了得到更準確的結果, 所得的 Θ 值應乘上修正係數 k_0 , 此修正係數 k_0 可根據 $k'l$ 的乘積從圖 172 的曲線來決定, 這裏 l 爲導線的長度, 以公分計, 而 k' 可按下式計算:

$$k' = \sqrt{\frac{0.24I^2\rho}{q^2\lambda\Theta}}$$

式中 λ —— 導線材料的導熱係數 $\frac{\text{卡}}{\text{公分} \cdot \text{秒} \cdot \text{度}}$; q —— 導線的截面積 (公厘²);

Θ —— 溫度, 按(149)式計算。

在(149)式上乘以修正係數 k_0 (圖172), 求出得到溫度 Θ 的電流 I :

$$I = \sqrt{\frac{(\delta + b\sigma k)\Theta pq}{0.24\rho(k_0 + \beta q\Theta)}}$$

根據導線的不同的溫度 Θ 、截面和材料, 先按 $k_0 = 1$ 用上式算出電流 I , 然後再按圖 172 的曲線決定的 k_0 值加以修正。

根據目前生產上最通用的材料的數據, 列表或畫成曲線, 假如溫度 Θ 和加熱器的長度 l 已給定的話, 我們就可以從中選擇必要的導線截面。

67 熱電式儀表的誤差 熱電式儀表測量機構的誤差和磁電式測量機構的一樣, 但在計算示數誤差時, 必須把標度尺的不均勻性(見第 65 節)考慮進去。決定線路誤差的因素主要有三種: 周圍溫度變化的影響, 長時期接入電路的影響和待測電流頻率變化的影響。

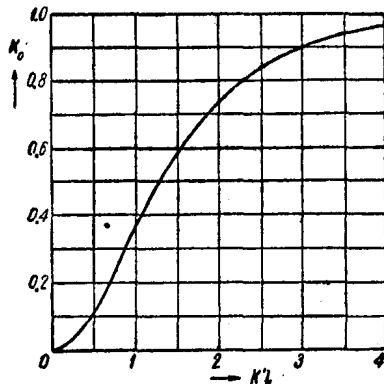


圖172 決定修正係數 k_0 的曲線

周圍環境溫度變化所引起的誤差主要是因測量機構電路(直流電路)的電阻變化而引起的, 因爲當周圍環境的溫度增高時, 變換器的熱電偶的加熱端和冷卻端同樣的

溫昇幾乎並不改變溫度差 $\Theta_{\max} - \Theta_0$ ，因此熱電動勢保持不變。

利用第 27 節所述的方法，以(148)式為基礎，很容易算出由於直流電路的電阻變化而引起的誤差：

$$\alpha = \frac{Bsw}{W} k \frac{I^2}{r}, \quad \text{由此 } I^2 = c_1 r \alpha,$$

但是，這裏的 r 等於測量機構的繞組電阻 r_0 (包括彈簧電阻的銅的部分，見第 48 節)，熱電偶電阻 r_T 和附加電阻 r_1 之和，即 $r = r_0 + r_1 + r_T$ 。

對上式取對數值，得：

$$2 \ln I = \ln c_1 \alpha + \ln(r_0 + r_1 + r_T)。$$

對上式左右兩邊微分，並把當溫度變化時彈簧彈性的變化同時近似地為測量機構空氣隙中的磁通變化所補償這一點考慮進去，則得：

$$2 \frac{dI}{I} = \frac{\beta_0 r_0 + \beta_T r_T}{r}。$$

式中 β_0 —— 測量機構繞組的溫度係數，包括彈簧的‘銅的部分’ (第 48 節)；

β_T —— 熱電偶電阻的溫度係數。

因為 $\frac{dI}{I} = \gamma_t$ 就是儀表示數的溫度誤差，則：

$$\gamma_t = \frac{1}{2} \times \frac{\beta_0 r_0 + \beta_T r_T}{r}。$$

因為比值 $\frac{\beta_0 r_0 + \beta_T r_T}{r}$ 是直流電路的總溫度係數 (見第 55 節)，則用 β_r 來代表這個係數，得：

$$\gamma_t = \frac{1}{2} \beta_r,$$

即由於直流電路的電阻變化而引起的熱電式儀表的溫度誤差等於該電路的溫度係數之半。

熱電式儀表接入線路時間長短的影響在於：儀表的示數隨變換器接入待測電流電路的時間長短而異。變換器的加熱器尺寸通常不大，因而熱容量不大，譬如和變換器的大金屬塊比較，它就加熱得非常快。因此，熱電偶的工作端和自由端的溫度差將隨熱變換器各部分被待測電流加熱的程度而變。在這種情況下，可能看到兩種符號的誤差，這要看在下述的兩種現象中，哪一種是主要的而定。假如熱電偶很短，則冷卻端的溫度逐漸上昇，熱電動勢和儀表的示數則隨而減小了。這種現象比較少見。由於熱變換器各部分的溫度昇高，熱電偶工作端的溫度便上昇，而比較薄和長的自由端却差不多保持着和接入時相同的溫度，這種現象多得多。因此，熱電動勢增加了，而示數也增大了。

為了補償這種誤差，採用兩種辦法。第一種辦法是：使熱電偶的自由端與金屬塊相隔絕，直接將它們放在金屬塊的表面上，或放在和金屬塊相連的特殊零件上。金屬塊的熱傳導要選擇得使被待測電流加熱的金屬塊所引起的加熱器的溫昇和加熱器本身的溫度增高一樣。於是，熱電動勢將與接入時間的長短無關。

第二個方法是阿維爾布赫 (Я.С. Авербух) 提出的，這辦法是：在測量機構的電路

中接入附加熱電偶，它的熱電動勢與原有的相反。這個附加熱電偶的工作端放在被待測電流加熱的金屬塊上，但和金屬塊絕緣。於是，金屬塊由於長期接入而引起的溫昇，將產生補償熱電動勢，這個熱電動勢由於反接的緣故，使儀表的示數減少，所減少的倍數恰好與原有熱電偶熱電動勢由於工作端溫度增高而增加的倍數相同。這種補償熱電偶用在像圖 1686 所示的熱變換器中。

由於待測電流頻率變化而引起的熱電式儀表誤差之所以發生，是因為這種儀表通常在低頻率（50 赫茨）下刻度而又多半用在高頻率一直到射頻的情況下。頻率對熱電式儀表示數的影響主要是由於兩種原因而引起的：因集膚效應而使加熱器的電抗發生變化，和由於在儀表與大地或其他無線電裝置之間存在電容耦合，而在熱電偶電路中出現附加的地電流。

當頻率升高時，加熱器的電阻由於集膚效應而增大，因而，從(149)式可見，熱電偶工作端的溫度也昇高了。熱電動勢也就增大，因而在示數中出現了正的誤差。加熱器的截面愈大，這種誤差也愈大，也就是在大電流儀表中，這種誤差要大些，當安培計的測量範圍減小時，這種誤差也減小。

在小電流變換器中，變換器的電容起着主要的作用，它的高頻率時使一部分電流不經過加熱器，因此使示數有些減小。

所有這些原因會使用於很高頻率的熱電式儀表產生誤差，這誤差有時達很大的值。圖 173 所示為在各種頻率下熱電式儀表的誤差曲線。由這些曲線可見，當頻率在

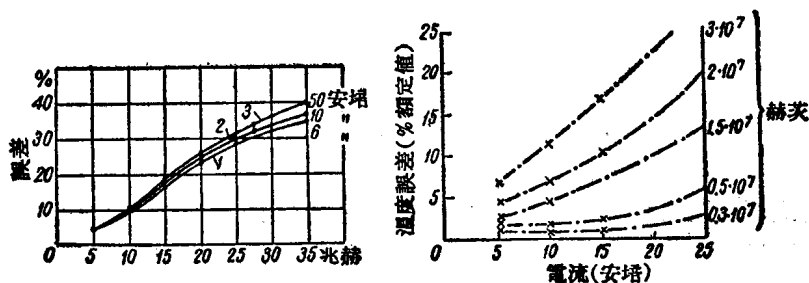


圖173 在高頻率下，熱電式儀表的誤差曲線：a)各種量程儀表的誤差和頻率的關係曲線；b)25安培儀表的誤差和電流的關係曲線

10 兆赫茨以上時，誤差已超出10%，並且它會達到這樣的值：在這種值之下來測量一般說來已沒有意義。

2 整流式儀表

68 整流器的特性和結構 磁電式測量機構和某種整流器相配合的儀表稱整流式儀表或檢波式儀表。在這種儀表中待測的交流電流是先經整流器整流的。

在整流式儀表中，多半採用氧化銅整流器，很少用硒整流器。因此，本書不研究硒整流器。振動機械式整流器（見第 71 節）在整流器中佔有特殊的地位，它和磁電式儀表配合時，不僅可測量交流電流的大小，也可測量其相位。

氧化銅整流器的主要元件是純銅製的薄片，在一定條件下加熱，於其上形成一層

氧化銅。這種薄片具有這樣的特性，電流從一個方向流入時很容易通過，從另一個方向進來時就很不容易通過。換句話說，電流在一個方向（從氧化銅到銅）所流經的電阻比另一個方向的要小很多倍。從氧化銅到銅這一個方向的電阻稱正向電阻，而相反方向的電阻稱反向電阻或關閉電阻。假如在整流器上加上某種正向電壓，即把正極連在氧化銅上，則通過整流器的電流將比在同樣大小的反向電壓下大很多。正向電流和反向電流的比稱整流器的整流係數。這個係數也等於反向電阻和正向電阻之比，今後我們將用 k_r 表示。

理想的整流器有無窮大的反向電阻，而它的正向電阻等於零。振動式整流器（第71節）幾乎完全能滿足這些條件。因而，理想整流器的整流係數等於無窮大。氧化銅整流器的正向電阻也好，反向電阻也好，都有一定的值，因此，它的整流係數不等於無窮大。這兩種電阻都和加在整流器上的電壓有關：正向電阻隨着電壓升高而減小，而反向電阻則增大。由於這個緣故，通過整流器的電流和加於其上的電壓的關係呈一曲線；這種曲線稱整流器的靜特性，它是在直流的情況下畫出來的。圖174所示為整流器之一的這種特性。圖上，為了明顯起見，電壓和電流的負值的比例尺已大為放大。

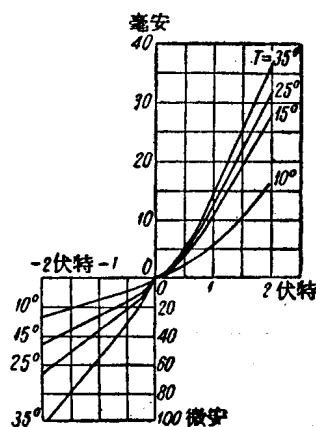


圖174 氧化銅整流器的靜特性

由圖174的曲線可見，整流器的電阻在很大的程度上決定於溫度。兩個方向的電阻溫度係數都是負的，對正向電阻而言，約為10~15%（每10°C），而對負向電阻而言，約為30~50%（每10°C）。

在負溫度（-30°，-40°）的情況下，這兩種電阻大到使儀表示數的準確度大為減小的程度。當正溫度在60°C以上時，整流係數下降得非常利害，而在以後溫度減低的情況下，整流特性常常不再恢復了。具有氧化銅整流器的儀表的應用範圍也為上述的溫度範圍所限制。

加在整流器上的反向電壓不得超過4伏特，否則是會把整流器擊穿的。因此，整流器的工作電壓通常不超過1伏特。

根據這個原因，整流器中的電流密度不應很大，使供給整流器的電壓不致過高。通常氧化銅整流器中的電流密度為1~5毫安/公分²。電流密度減小的太過分也是不合適的，因為這等於減低加在整流器端鈕上的電壓，而當電壓很小時，整流係數太低，在這種條件下使用整流器是不利的。

因為整流器的電阻和溫度的關係很大，並且隨時間而有某些變化，所以不可能製造比1.5級更準確的整流式儀表。這是具有氧化銅整流器的整流式儀表的主要缺點之一。

氧化銅整流器的結構是各種各樣的。它們通常有幾個相同的薄片，連接得可以整流兩個交流半波（見第69節）。圖175所示為這種整流器的若干種結構。圖175a所示的結構為有圓形銅墊圈的整流器，墊圈有一面覆上氧化銅。這些墊圈與黃銅導電板和鉛

板一道交替地穿在同一個緊壓螺栓上，用適當的襯管使螺栓和墊圈相絕緣。圖 175*b* 所示為另一種結構，它由在外殼中用彈簧壓緊的正方形薄片狀整流器組成。外殼中填以特殊的油灰，以防止潮氣和灰塵對整流器電阻的影響。圖 175*c* 所示為裝在外殼中的單獨的整流器，該外殼由兩個相互間用浸蠟紙板製的絕緣墊板隔離的半圓筒組成。外殼的兩半相互間是用滾壓聯接起來的，外殼內部有彈簧，用來產生必要的壓力，保證必要的接觸程度。

圖 175*a* 所示為雙整流器的結構，它適於接入圖 176*a, c* 的線路內。圖中，在桿 *C* 上被擰上兩個絕緣的襯管 *P*，襯管內用彈簧 *S* 和螺絲 *K* 緊壓着整流器，螺絲 *K* 備有導電端 *M*，以便接入線路。中間的導電端為桿 *C* 和有一個襯管 *P* 之間的黃銅墊板。

因為儀表中被整流的電流比較小，所以全套整流器所佔地方很小（幾個立方公分），可以把它放在儀表內，甚至尺寸很小的儀表也可以這樣做。

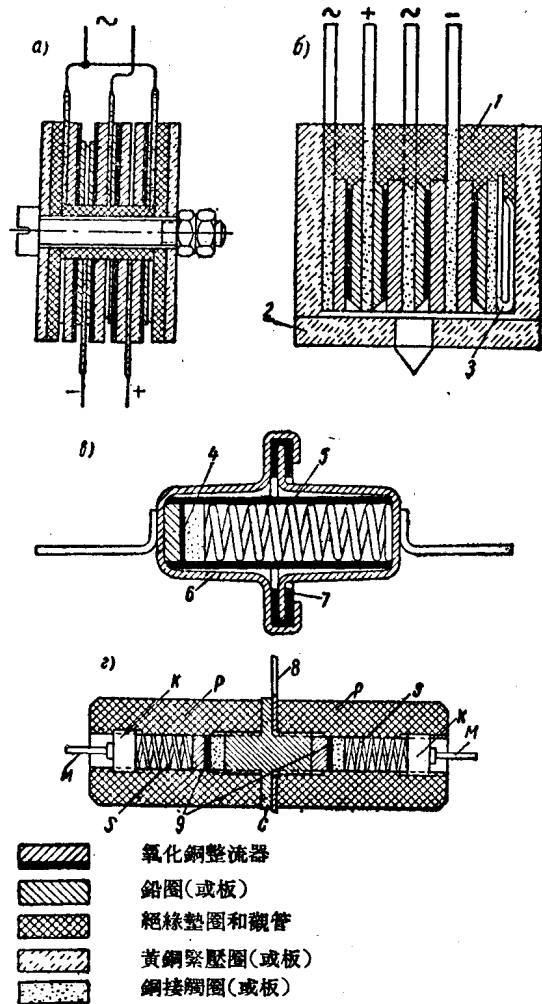


圖175 氧化銅整流器的結構：
a, b—按橋式線路連接的一套；*B*—單獨的整流器；
c—雙整流器。1—油灰；2—外殼；3—彈簧；4—整流器；5—絕緣管；6—外殼；7—絕緣襯墊；8—中間導電端；9—整流器

69 整流式儀表的線路 根據聯接線路和整流式儀表中所用的整流器個數，有半

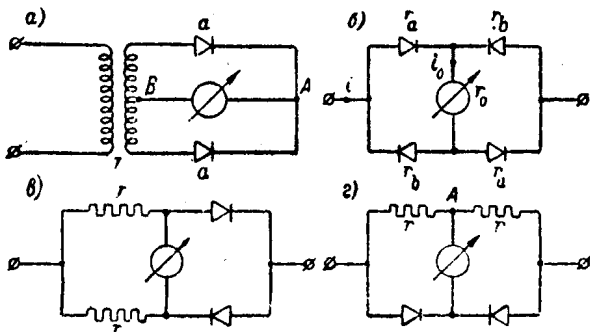


圖176 整流裝置的線路

波整流，也有全波整流。在第一種情況下，在測量機構中只利用一個交流半波，而在第二種情況下利用二個半波。第二個方法的優點很明顯，故目前幾乎總是採用全波整流的線路。圖 176 所示為最流行的整流裝置的線路。在圖 176*a* 的線路中，交流電流進入互感器 *T* 的