

126275

電工材料

楊學濬著



对

龍門聯合

江南大学图书馆



91103806

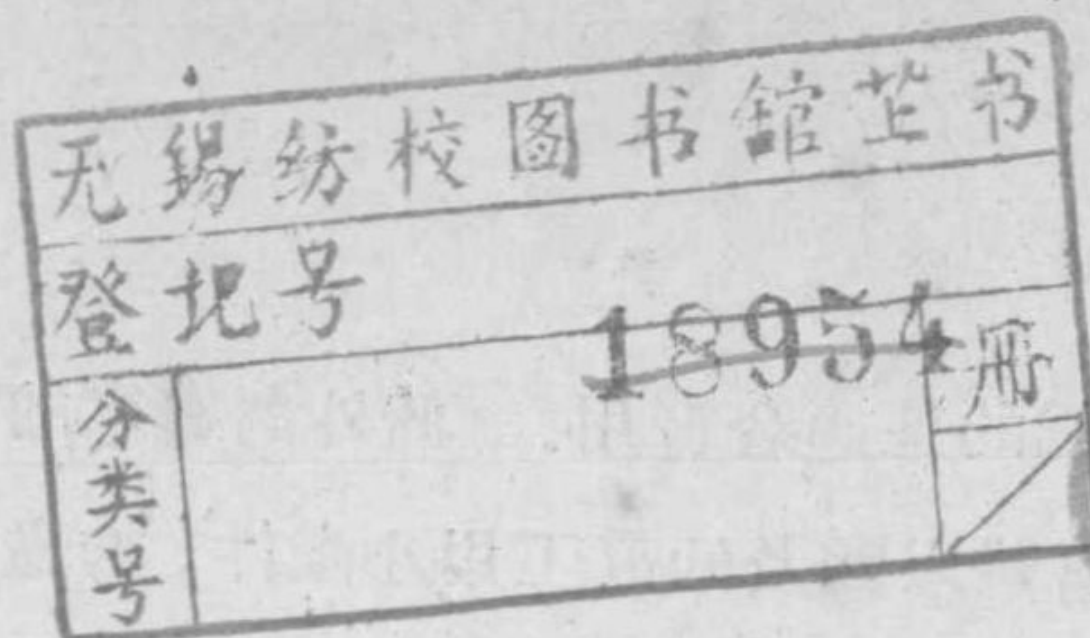
7112/084

電 工 材 料

楊 學 濬 著



龍門聯合書局出版



序

電工材料一科，包括的範圍相當廣泛，舉凡物理、化學、金屬學、熱工學、電工學等均有所涉及，所以必須具有前述學科的基本知識，始能進而研究電工材料，其中尤以化學及熱工知識的需要，更較殷切。近日電工技術人員，對於化學及熱工知識研求的興趣，相當冷淡；要知一個電工技術人員，對於所處理的業務，並不是永久不變的。我國的電工業並不希望永遠停留在運用上，在抄襲上，而是要費一費腦筋來研究改進及發明。但研究改進發明，並不是一件輕而易舉的工作，除儀器設備及參考資料在有形的方面是要充實以外，無形工具——知識——的充實，亦是切要的。換句話說，如欲對某一機件某一設備加以研究改進發明的話，勢必對此機件或設備的操作特性，運用特性及材料特性，有深刻的了解後，始能作到圓滿的地步。操作及運用的特性，基於電工理論及實用上的研討，姑且不論。研討材料性能的主要項目，乃是材料的性質，製造程序中的變化，及價格等。而電工業所用材料，無論是導電，絕緣或磁性材料，影響於其性質及製造中變化的條件，不外製造手續、機具精良程度、時間、溫度、熱變化及所含雜質的種類分量等，而尤以後數種的影響為最大。為分析鑑定成分的多少，為了解加熱變化的情形，必須藉重於化學及熱工技能；為研究製造手續的改造，價格的減低，尤須依賴化學及熱工的知識。如化學及熱工知識不夠，電工材料的研究，不見得能有深刻的造詣，讀者請善為體會此意。

在實用上及理論上，對某一種類絕緣材料，如欲作詳盡的研究，均可以有一部洋洋大觀的書籍出版。本書寫作的最初動機，是作為學生的學習課本，在寫作之初，就因為資料的複雜龐大，先訂出一個約束的範圍。理論方面、試驗方面，能由其他科目找到的，均略而不列。只選擇較為有關的略加複習，專門着重在分類、製法、性質及用途上。性質

運用的高深理論，亦多淺嚐輒止，爲的是適合實用。此外對有名的成品，成品的規範尺寸，以及其他書籍難以顧及的電工用小配件，均盡量收納，亦不過是爲了實用的方便而已。所以作爲學生學習及工作人員參考用書，或作爲介紹電工材料普遍性知識的用書，著者已盡了最大的努力，當然距離完善還相當遙遠。希望閱讀諸君多加指導批評，俾使此書能完全達到實用的目的，則著者幸甚。

書內名詞均係選用前教育部所頒佈的標準名詞，或習慣用的名詞。實難以找到中文名詞的，則保存原文或由著者自擬名詞，並附原文，以待先進的賜正。電線電纜的規範，多選用米制規範，附在書後，以作參考，大多祇輔以近似的中國規範，乃因至今利用米制規範的仍佔有廣大的羣衆，俟將來人民政府有正式規範訂定後，再行更正。

本書在寫作過程中，蒙業師王董豪教授始終鼎力維護，纖維材料蒙崔崑圃教授，磁性材料蒙葉培大教授，構築及潤滑材料蒙孫竹生教授，導電材料蒙郭佾先生等校閱指正，並得河北工學院 1950 及 1951 級，北洋大學 1950 及 1951 級同學時供意見，協助製圖，得有很多的改正及幫助，謹誌敬謝之意。

著者識 一九五〇、八、一。

總 論

電工材料一名詞，乃專指電工業中所應用的各種材料而言，更就學術上來說，是以在電路中直接或是間接所需要的物料為主，而研究其性能、組織、製法、類別和用途的學科。宇宙間的物質，能用在電工業的非常繁多，但是在效率和性質上來講求，自必有一個相當的限制，換句話說，就是要用效率和較高的性質限制，來尋求適宜的電工材料，本書就是根據此原理，並且把要研究的材料，按照應用目的的不同分作下述六類：

- a. 導電材料——是電流通路所用的材料，亦就是用作良導體的材料，銅、鐵、鋁等金屬屬於此類。
- b. 電阻材料——是在電路中，為調整電流用的，或是藉電阻而發生熱能用的材料，如錳、德銀、鎳鉻線等金屬屬於此類。
- c. 絕緣材料——是使電路與其他設備隔絕所用的材料，如雲母、橡膠、瓷器、絕緣油漆、脂類等屬之。
- d. 磁性材料——是用來作為發電機、電動機、變壓器等電機的磁場鐵心，和各種繼電器 (Relay)、電計器 (Electric Meters)、電話機等所必需的永久磁鐵所應用的材料。如鐵、鈷、鎳以及各種磁性合金、矽鋼皮等均屬此類。
- e. 潤滑材料——是轉動電機運行時所必需的潤滑減摩材料，如潤滑油、油膏 (Grease) 等均屬此類。
- f. 構築材料——是電路的支架材料，如電機電具的外框，和支架所需的鐵材、木材、石材和混凝土等類材料均屬於此類。

上述六種材料，任何一種都是電工業上所不可缺少的，換句話說，電工業全賴上述各種材料才能完成其任務，所以我們要想成為電工技術者，不能僅知電學理論就算滿足，更應該進而研究各種材料的一般知識。

近世科學界人士對工業用材料的研究非常努力，種種優秀的材料已經絡續發明，而尤以電工材料的發明為最，因之電機電具和種種電工設備的改良亦獲益非淺，為要推進異日電工業的發展，電工材料的研究將更為重要。

目 錄

第一編 導電及電阻材料

第一章 導電用金屬

總 說	1
第 1—1 節 銅	2
第 1—2 節 鋁	11
第 1—3 節 鋼和鐵	14

第二章 電 線

第 2—1 節 線規及直徑測量	19
第 2—2 節 絞線	23
第 2—3 節 銅線	26
第 2—4 節 鐵線及鋁線	30

第三章 絕緣電線及電纜

第 3—1 節 絕緣電線	34
第 3—2 節 電力用絕緣線	36
第 3—3 節 電訊用絕緣電線及紮線	43
第 3—4 節 電力用電纜	44
第 3—5 節 電訊用電纜	48

第四章 特殊電線及電線試驗

第 4—1 節 特殊電線	51
--------------	----

第4—2節	銅合金線	52
第4—3節	電線試驗	54

第五章 特殊導電材料

第5—1節	接觸點用金屬	59
第5—2節	接合材料	59
第5—3節	鋁線的接合材料	68
第5—4節	熔線	75

第六章 電阻材料及電阻導電雙性材料

第6—1節	金屬電阻材料	79
第6—2節	非金屬電阻材料	84
第6—3節	電阻導電雙性材料	85
第6—4節	電照及真空管材料	90

第二編 絕 緣 材 料

第七章 絕緣材料總說

第7—1節	絕緣材料的分類	96
第7—2節	絕緣材料的性質	99

第八章 天然固體絕緣材料

第8—1節	雲母	110
第8—2節	人造雲母及雲母模製品	117
第8—3節	石棉	119
第8—4節	石材	125
第8—5節	木材	126

第九章 陶質絕緣材料

第 9—1 節	玻璃	128
第 9—2 節	電工用玻璃	130
第 9—3 節	瓷器	131
第 9—4 節	絕緣器	134
第 9—5 節	其他瓷器製品	145
第 9—6 節	絕緣器的試驗	146

第十章 橡膠類絕緣材料

第 10—1 節	橡膠	150
第 10—2 節	軟橡膠的應用	160
第 10—3 節	其他橡膠製品	163
第 10—4 節	樹膠類	166

第十一章 絕緣油,漆,脂類

第 11—1 節	礦物油	169
第 11—2 節	瀝青類	177
第 11—3 節	油脂	181
第 11—4 節	蠟類	186
第 11—5 節	樹脂類	189
第 11—6 節	絕緣油漆	204

第十二章 纖維絕緣材料

總	說	216
第 12—1 節	動物纖維	217
第 12—2 節	植物纖維	219
第 12—3 節	人造纖維	224

第 12—4 節	絕緣用紙	226
第 12—5 節	纖維素製品	234

第十三章 其他絕緣材料及製品

第 13—1 節	絕緣劑	236
第 13—2 節	可塑性蛋白質	240
第 13—3 節	絕緣模製品	240
第 13—4 節	焙克萊膠模製品及積層製品	246
第 13—5 節	紮帶	252
第 13—6 節	空氣	255

第三編 其他材料

第十四章 磁性材料

第 14—1 節	磁材特性	260
第 14—2 節	純金屬及合金磁性材料	266
第 14—3 節	矽鋼皮	278
第 14—4 節	永久磁鐵	289

第十五章 潤滑材料

第 15—1 節	潤滑材料的分類	297
第 15—2 節	電機用潤滑料	298

第十六章 構築材料

總	說	303
第 16—1 節	鋼鐵材料	303
第 16—2 節	木材	310
第 16—3 節	水泥及混凝土	317

附 表 (38 種)

第一編

導電及電阻材料

第一章 導電用金屬

在導電材料裏，如按廣義的範圍解釋，凡是許可電流通過的材料，都可以包括在內，因之上面所指的導電材料包括用作電阻體的材料和用作導電體的材料。如按狹義的意義來說，導電材料是專指使電流容易通過的材料而言，即單指用作導電體的材料，而電流不易通過的材料稱為電阻材料，本書就是依據這個方法來區分的。

導電材料應具備的主要性質是(a)電阻要小，(b)應用和修配容易，(c)機械強度要高及(d)性質不起變化等四點，而對上述四項性質最為適宜的材料是金屬和合金。在已經發現的種種金屬裏，要選擇適合的導電材料，第一要研究各種金屬的電阻大小。現在經過實驗結果，選擇出十一種電阻較小的金屬來，示如第1—1表。

在第1—1表可以看出來，金屬之中以銀的導電性能為最優秀，如用來作導電材料，當然是很合理想，但是銀的價格太高，不適宜於廣泛的應用。所以目前均選擇導電性能較次的銅來代替，亦有應用更次而價廉的鋁或鐵的。

導電材料的重要性質除前述的導電性能外，還有價格低廉；機械強度高；易於工作；性質不生變化等等，在本章中對導電金屬的研究和以後對導電合金的研究，都是以這幾種性質為基準。

第1—1表 金屬性質表

金屬種類	體積電阻 係數(20°C) 微歐/厘米	比 重 (在 20°C 對 4°C 的水)	體積電阻係數 的溫度係數 (20°C)	線膨脹係數 (每°C)×10 ⁶ (20°C)	熔解點 (°C)
銀 Ag	1.62	10.5	0.0038	18.9	960.5
銅 Cu	1.69	8.9	0.00393	16.6	1,083
金 Au	2.40	19.3	0.0034	14.2	1,063
鉻 Cr	2.60	7.1	—	8.2	1,615
鋁 Al	2.62	2.7	0.0039	23.03	660
鎢 W	5.48	19.3	0.0045	4	3,370
鋅 Zn	6.10	7.14	0.0037	33	419
鎳 Ni	6.90	8.9	0.006	12.8	1,452
鐵 Fe	10.00	7.86	0.005	11.7	1,535
鉑 Pt	10.50	21.45	0.003	8.9	1,755
錫 Sn	11.4	7.35	0.0042	20	231.85
鉛 Pb	21.9	11.37	0.0039	29.1	327.5
汞 Hg	95.8	13.55	0.00089	—	38.87

第1—1節 銅

(一)銅的性質

銅是電工業最重要導電金屬，電阻值很小，並且有高度的鍛性和碾延性，所以很容易加工。其密度因物理的狀態而異，平均值是 8.9。在 1083°C 熔解，熔解時呈海綠色，若再加熱則蒸發為一種特別的綠色火焰而燃燒，到 2310°C 則沸騰。銅在熔解狀態時容易吸收氫氣，氧氣，一氧化碳和二氧化硫等氣體，而在凝結時放出體外，因此留有氣孔，所以銅鑄品不免多孔而粗糙，但是銅中如含有鉛，則在熔解時可以排出二氧化碳及蒸汽，能稍除去上述的弊病。

銅露置於普通空氣中，表面漸漸氧化。變為血紅色的一氧化銅 (Cu₂O)，甚至黑色的二氧化銅 (CuO)，惟這種作用只限於其表皮，不但對性質毫無影響，且因而生有保護作用，和鐵或鋼的因氧化而侵蝕脫落

大不相同。但是放置在潮濕地點，或是有碳酸氣的地點，則其表面生有綠色的鹽基性碳酸銅，亦就是所說的綠銹。銅常被二氧化硫所侵蝕，放在稀鹽酸或是稀硫酸中，則徐徐熔解，在熱濃硫酸中即生有亞硫酸氣體而熔解，更容易熔解在硝酸中。

銅的電導係數 (Conductivity) 與其化學的純度關係很大，和物理的性質亦略有關係，如冷壓和硬抽銅的電導係數約減少 2% 乃至 4%，抗張強度則增長很多。銅接合普通多用焊接，焊接的溫度約在 240°C ，鍛接則較為困難，因為銅在接近熔解點溫度，性質既硬又脆，很容易破碎的原故。

銅的主要性質，除導電性能外，尚有溫度係數，機械性能及熱性質等，現在分段論述如下：

(二) 電導係數和標準銅

商業上對於銅品質的規定，向例是按照純銅的百分率計算，在電工業所用的，則多用電導係數為準。所謂電導係數，乃是某一銅線的電阻係數 (Resistivity) 與標準銅的電阻係數的比，亦就是假定標準銅的電阻係數為 100%，用來和任何銅線的電阻係數作比較。自古以來，提倡採用標準銅的並非一人，創始者是馬奇深氏 (Matthiesen)，當 1860 年時馬氏用當時認為最純的韌銅加以測驗，結果在 0°C 時得有下列數值：

比重——8.89，

電阻——0.141729 歐 (長 1 米重 1 克)，

1.594 微歐 (1 立方厘米)。

有上列性質的銅，馬氏規定其電導係數是 100%。其後銅的精鍊愈為進步，純度亦愈高，各國就當時市場出售的銅加以試驗，證明馬氏的規定已無實用價值，乃在 1913 年德國柏林召開的國際電機工業委員會會議上議決，國際標準韌銅的電阻為：“在 20°C ，長一米，重一克，有均勻一致的圓筒形截面的銅線電阻是 0.15328 歐姆，”為現在軟銅線的標準，與此相同的數值，用各種不同的單位表示如下列：

- a. 875.20 歐 (哩磅),
- b. 1.7241 微歐 (立方厘米),
- c. 0.67879 微歐 (立方吋),
- d. 10.371 歐 (圓米爾, 呎),
- e. $0.017241 = \frac{1}{58}$ 歐 (長一米, 截面積一平方毫米).

上列數值乃由市場上的高級韌銅所測定的平均值。經國際電機工業委員會規定的標準韌銅其他性質如下:

- a. 線膨脹係數, 在 20°C 每增減 1°C 為 0.000017,
- b. 電阻溫度係數在 20°C 每 1°C 為 $0.00393 = \frac{1}{254.45}$.

在 0°C 每 1°C 為 0.00426.

國際委員會並規定商用韌銅的標準, 商用韌銅的電導係數在 20°C 用相當標準銅電導係數的百分比來表示, 測量時並須符合下列標準:

- a. 測驗溫度 t 是在 20°C 的 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 之間, 亦就是在 $10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 之間,
- b. 長一米, 截面積一平方毫米, 溫度升高 1°C 電阻增加 0.000068 歐,
- c. 長一米, 重一克, 溫度升高 1°C 電阻增加 0.0006 歐,
- d. 密度是每立方厘米 8.89 克.

依據上述的標準, 可用下列公式計算商用韌銅的電導係數:

長一米, 截面積一平方毫米韌銅在 20°C 時的電阻

$$= \frac{R_m}{l^2 \times 8.89} + 0.000068(20 - t) \text{ 歐},$$

或長一米重一克韌銅在 20°C 時的電阻

$$= \frac{R_m}{l^2} + 0.0006(20 - t) \text{ 歐}.$$

所以在 20°C 時的電導係數 $g(\%)$ 為:

$$g = \frac{\frac{1}{58} \times 100}{\frac{R_m}{l^2 \times 8.89} + 0.000068(20 - t)} \% \dots\dots\dots (1-1a)$$

或
$$g = \frac{0.15328 \times 100}{\frac{R_m}{l^2} + 0.0006(20 - t)} \% \dots\dots\dots (1-1b)$$

式中 R 代表韌銅在 $t^\circ\text{C}$ 時量得的電阻(歐), m 代表其重量(克), l 代表其長度(米), t 代表測量時的溫度($^\circ\text{C}$)。

國際委員會規定商用韌銅的其他性質如下:

- a. 膨脹係數為每 1°C 0.000017,
- b. 0°C 時每立方厘米的電阻係數為 1.58 微歐,
- c. 體積電阻係數的溫度係數, 每 1°C 為 0.004282.

以上所述均為韌銅線的數值, 硬抽銅線的電阻和電導係數平均較韌銅線增減 2.7%。

(三) 電阻溫度係數 (Temp. Coefficient of Resistance)

一般金屬的電阻, 隨溫度昇降而變化, 溫度上昇則電阻增加, 設 R_0 代表 0°C 時的電阻, R_t 代表 $t^\circ\text{C}$ 時的電阻, 二者的關係可以用下式來表示:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) \dots\dots\dots (1-2)$$

式中 α 叫做溫度係數, 最初馬奇深氏對於韌銅所規定的公式為下列的二次方程式:

$$C_t = C_0 (1 + 0.0038701t + 0.000009009 t^2) \dots\dots\dots (1-3)$$

式中 C_t 和 C_0 是 $t^\circ\text{C}$ 和 0°C 時電阻值的反數, 由 (1-3) 式推算所得的電阻公式是:

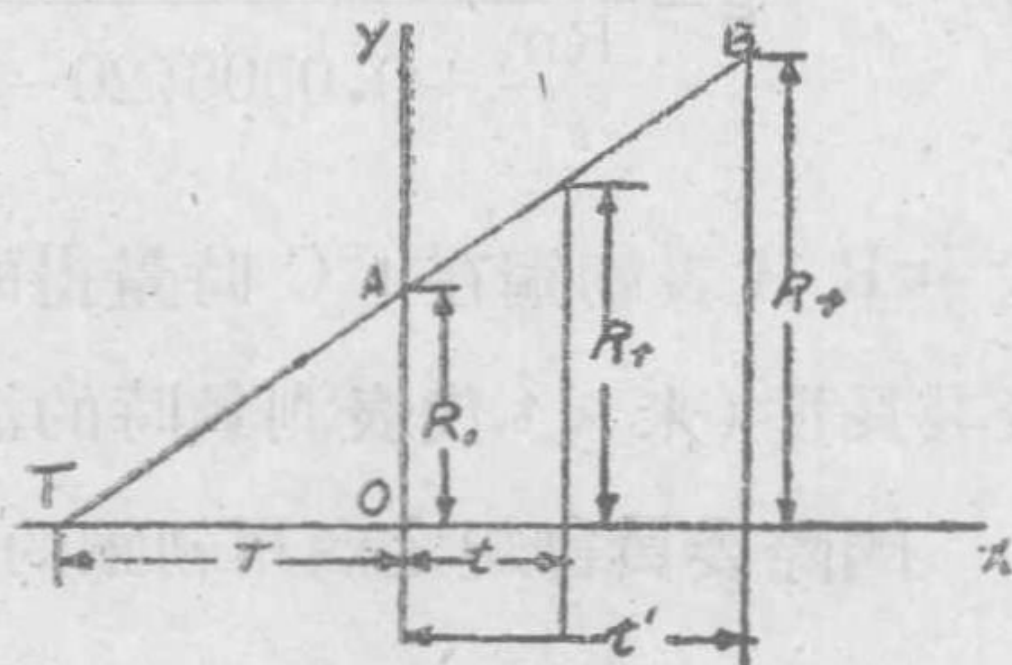
$$R_t = R_0 (1 + 0.00387t + 0.00000597t^2) \dots\dots\dots (1-4)$$

但是上列公式對於普遍應用上很是困難, 所以實用上以使用下列簡單的公式較為方便:

$$R_t = R_0 (1 + 0.0042t) \dots\dots\dots (1-5)$$

在1913年所召開的國際電機工業委員會會議上,更就學術上加以研究,以其所得的結果規定為溫度係數的標準,該會規定“電導係數為100%的標準鉅銅,在溫度 20°C 時,溫度係數每 1°C 為 $0.00393 = \frac{1}{254.5}$ ”。

溫度係數隨溫度和導體的電導係數而變化,如第1—1圖及第1—2表所示,設以OX軸代表溫度,以OY軸代表電阻,就實驗來證明,AB所成的直線,就是表示電阻和溫度的關係曲線,在圖中 R_0 , R_t 和 $R_{t'}$



第1—1圖

代表在溫度 0°C , $t^{\circ}\text{C}$ 和 $t'^{\circ}\text{C}$ 時的電阻, OT為AB延長線與OX軸相交點的負溫度,按圖可解釋為下式:

$$\frac{R_0}{T} = \frac{R_t}{T+t} = \frac{R_{t'}}{T+t'}$$

$$\therefore R_{t'} = \frac{T+t'}{T} R_0 = R_0 \left(1 + \frac{1}{T} t'\right) \dots \dots \dots (1-6)$$

$$\text{或 } R_{t'} = \frac{T+t'}{T+t} R_t = R_t \left\{1 + \frac{1}{T+t} (t' - t)\right\} \dots \dots \dots (1-7)$$

利用上列二式,就可以由 R_0 或 R_t 來推算 $R_{t'}$. 由(1—6)式用 R_0 推算時,參照第(1—2)公式,可知溫度係數是 $\frac{1}{T}$;由(1—7)式用 R_t 推算

時可知溫度係數是 $\frac{1}{T+t}$;所以溫度係數 α 的值,是根據T值的大小變

化的(參照第1—2表),在1913年國際委員會所規定的溫度係數值在 20°C 時每 1°C 是0.00393, T的值亦可以求出如下:

$$\frac{1}{T+t} = \alpha. \quad \therefore \frac{1}{T+20} = 0.00393.$$

$$T = 234.5^{\circ}\text{C}.$$

所以倘以 0°C 為基本溫度,則其溫度係數就是:

$$\alpha = \frac{1}{T} = \frac{1}{234.5} = 0.00427 \dots \dots \dots (1-8)$$

綜合上述(1—4)到(1—7)各公式，計算上均較為複雜，不免時生誤差，國際委員會於是根據(1—7)公式，將前數式簡化成下列公式：

$$R_t' = R_t \left(1 + \frac{t' - t}{234.5 + t} \right) \dots\dots\dots (1-9)$$

式中 t' 和 t 的單位均為攝氏溫度。

第1—2表 電阻溫度係數表

電導係數 (%)	$\alpha_t \times 10^6$						求得的 T 值 (°C)
	$t=0^\circ\text{C}$	$t=15^\circ\text{C}$	$t=20^\circ\text{C}$	$t=25^\circ\text{C}$	$t=30^\circ\text{C}$	$t=50^\circ\text{C}$	
93	344	372	385	359	353	329	253.6
94	399	376	369	363	356	333	250.7
95	403	380	373	367	360	336	247.8
96	408	385	377	370	364	329	245.1
97	413	389	381	374	367	342	242.3
97.5	415	391	383	376	369	344	241.0
98	417	393	385	378	371	345	239.6
99	422	397	389	382	374	348	237.0
100	427	401	393	385	378	352	234.5

溫度係數又因為導體的電導係數不同而異，美國標準局研究的結果，在 10°C 到 100°C 的溫度範圍內，銅的電阻溫度係數與其電導係數成正比，設 α_n 為 $n\%$ 電導係數銅線的溫度係數（每 $^\circ\text{C}$ ）可得：

$$\alpha_n = 0.00393 \times n\% \dots\dots\dots (1-10)$$

(四)銅的機械性質

(1)抗張強度 (Tensile Strength) 銅線的抗張強度因為粗細而不同，粗線的抗張強度較小，細線則較大。韌銅線的抗張強度約為 2250~2800 千克/平方厘米；普遍用 2400 千克/平方厘米 為代表數值。若將銅線強力冷抽，則其強度增加很多，就叫做半硬銅線，其強度可增到 2800~4200 千克/平方厘米。硬銅線的強度則較大，普通約達 3500~4600 千克/平方厘米的數值，細線可更增到 4800 千克/平方厘米。