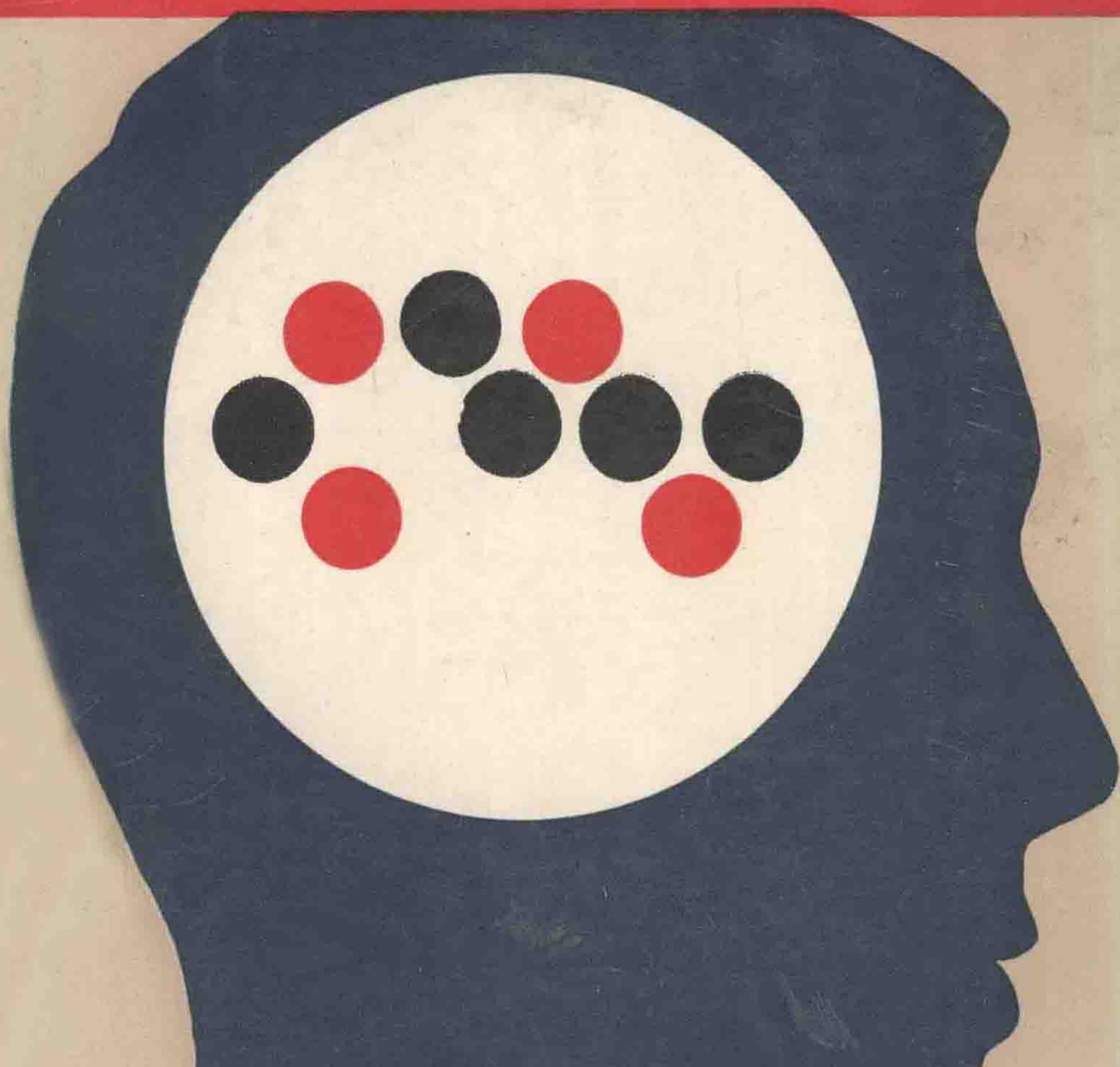


工業儀器

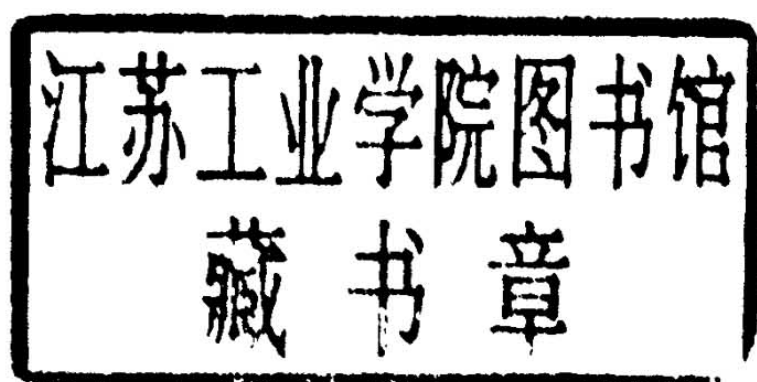
周澤川・徐展麒著

科學技術叢書 / 三民書局印行



工 業 儀 器

周澤川・徐展麒 著



三 民 書 局 印 行

行政院新聞局登記證 局版臺業字第〇二〇〇號

中華民國六十年九月初版
中華民國七十年七月四版

工業儀器

基本定價肆元壹角壹分

版權所有
翻印必究

印刷所	出版者	發行人	著作者
三民書局股份有限公司	三民書局股份有限公司	劉振強	周澤麒

臺北市重慶南路一段六十二號
郵政劃撥九九九八號

序

近數十年來工業儀器製造的技術有驚人的進步，將來會有更驚人的發展，在近代的工業界，尤其是化工廠製造程序工業儀器成爲不可或缺之一環，因此必須有一批受過良好訓練的工程技術人員執行各工業儀器的製造，操作與修護。

本書專爲五年制專科學校學生而編成的教科書，全書共分六章因工業儀器繁多，不能一一介紹。本書僅介紹較常用而普通的儀器之基本理論與應用。

撰寫本書時，筆者假定讀者已修過物理，化工計算及單元操作並略譜微積分等基本數學。本書亦可供四年制大學部學生及工業界作參考之用。

筆者才疏學淺，匆促草成，謬誤之處必所難免，敬祈海內外先進，不吝指教，俾再版時，得以更正，無限感激。

周澤川于臺南 六十年八月

工業儀器目錄

序

第一章 溫度測量儀器

1-1 膨脹式溫度儀器.....	4
1-2 電阻溫度儀器.....	17
1-3 熱電高溫儀器.....	32
1-4 光學高溫儀器.....	46
1-5 輻射高溫儀器.....	54

第二章 壓力之測量

2-1 壓力測量之基本觀念.....	63
2-2 測量壓力的儀器.....	83
2-3 真空度的測量.....	121

第三章 流量的測量

3-1 簡介.....	147
3-2 流量測量之基本概念.....	149
3-3 流孔板流量儀器.....	162
3-4 細腰管，流動噴嘴及皮氏管差壓測定機構.....	195
3-5 差壓儀器.....	205
3-6 面積流量計.....	215

2 工業儀器

3-7 體積流量計及流速計.....	221
--------------------	-----

第四章 液體及固體之位面測量

4-1 直接機械式液面測量儀.....	230
4-2 間接機械式液面測量儀.....	239
4-3 汽力式液面測量法.....	243
4-4 電子式液面測量法.....	250
4-5 原子式液面測量儀.....	252
4-6 超音波液面測量儀.....	253
4-7 固體高度之測量.....	254

第五章 物理化學特性之測量儀器

5-1 重量比重及黏滯度之測量.....	262
5-2 濕度分析儀器.....	289
5-3 氣體分析儀器.....	303
5-4 酸度分析儀器.....	315
5-5 光譜分析儀器.....	323
5-6 其他工業分析儀器.....	364

第六章 自動控制儀器

6-1 簡介.....	385
6-2 直接操作控制儀器.....	386
6-3 間接操作控制儀器.....	391
6-4 控制閥.....	403

第一章 溫度測量儀器

在自然界中，可以發現許多有關於「溫度」的現象，譬如；雪或冰之溶解；河水之結冰以及人體感官對於冷熱的感受是。「溫度」這個名詞我們可以簡單地下個定義：溫度是一個物體之「冷」或「熱」程度的表示。

「溫度」在工業上佔有極重要的角色，也是最常遇的變數之一；有如人體必須在適當溫度才能感覺舒適。所以，隨着應用條件之不同，所設計之溫度測量儀器種類繁多，不勝枚舉。溫度測量儀器之設計，有利用流體或固體之膨脹原理者；有利用電學或光學之原理者；有簡單如水銀溫度計，有複雜如自動調節電流之電勢差溫度儀等。吾人在一一詳述之前，必須先明瞭如何制定溫度之標準。

將兩個密封的系統以熱接觸，則兩者之特性將有變化，高溫者失去熱量給於低溫者，最後兩者之特性保持一定不變，此謂之為熱平衡 (*Thermal Equilibrium*)。若兩者熱接觸後，其特性均未有變化時，即表示兩者溫度相同。

一物體之溫度改變時，其體積，顏色或電阻性 (*Resistivity*) 也隨之改變。因之，依其與溫度變化之關係制定溫度之標準。今就以電阻性隨溫度之變化為例：選擇一物體其電阻性與溫度成正比者或線形關係者 (即 $R=R_0(1+\alpha t)$)，以水在 1 大氣壓下之凝固點 (冰點) 和沸騰點 (蒸汽點) 為兩個溫度標準點，各定為 0°C 和 100°C ；將此物體各與冰點或蒸汽點達成熱平衡，如此可以定出在冰點的電阻 R_0 和蒸汽點之電阻 R_{100} ，之後，從 0°C 到 100°C 之間分劃成 100 刻度，則每一刻度溫度變化之電阻變化度為： $[(R_{100}-R_0)/100]$ ，如

此欲測溫度之物體可由其電阻之大小或刻度讀數得知其實際溫度。

熱之傳送 (*Heat Transfer*) 有三種方式：

1. 傳導 (*Conduction*) —— 有如電傳導，於固體之一端加熱，則熱向另一端流動傳送，使另端溫度也隨之上升。

2. 對流 (*Convection*) —— 流體流動時，藉熱質點之運動而傳熱之現象。

3. 輻射 (*Radiation*) —— 某受熱物質，因內部之能位變化而有射線自分子發出，將輻射能傳送出去。

幾種常用之工業溫度標度有：

1. 華氏標度 (*Fahrenheit Scale*) —— 縮寫為 $^{\circ}F$ 。此標度以 $32^{\circ}F$ 為冰點，以 $212^{\circ}F$ 為蒸汽點。

2. 攝氏標度 (*Centigrade Scale*) —— 縮寫為 $^{\circ}C$ 。此標度以 $0^{\circ}C$ 為冰點，以 $100^{\circ}C$ 為蒸汽點。

3. 開爾文標度 (*Kelvin Scale*) —— 縮寫為 $^{\circ}K$ 。亦名攝氏絕對標度 (*Centigrade Absolute Scale*)。以 $273.16^{\circ}K$ 為冰點， $373.16^{\circ}K$ 為蒸汽點。

4. 雷金標度 (*Rankine Scale*) —— 縮寫為 $^{\circ}R$ 。亦名華氏絕對標度 (*Fahrenheit Absolute Scale*)。以 $491.69^{\circ}R$ 為冰點， $671.69^{\circ}R$ 為蒸汽點。

5. 列氏標度 (*Réaumur Scale*) —— 縮寫為 $^{\circ}R'$ 。此標度以 $0^{\circ}R'$ 為冰點， $80^{\circ}R'$ 為蒸汽點，適用於酒精工業。

以上所述之五種標度之相互關係如下：

$$F = \frac{9}{5}C + 32 \quad (1-1)$$

$$C = \frac{5}{9}(F - 32) \quad (1-2)$$

$$K = 273.16 + C \quad (1-3)$$

$$R = 459.69 + F \quad (1-4)$$

$$R' = 0.8 C \quad (1-5)$$

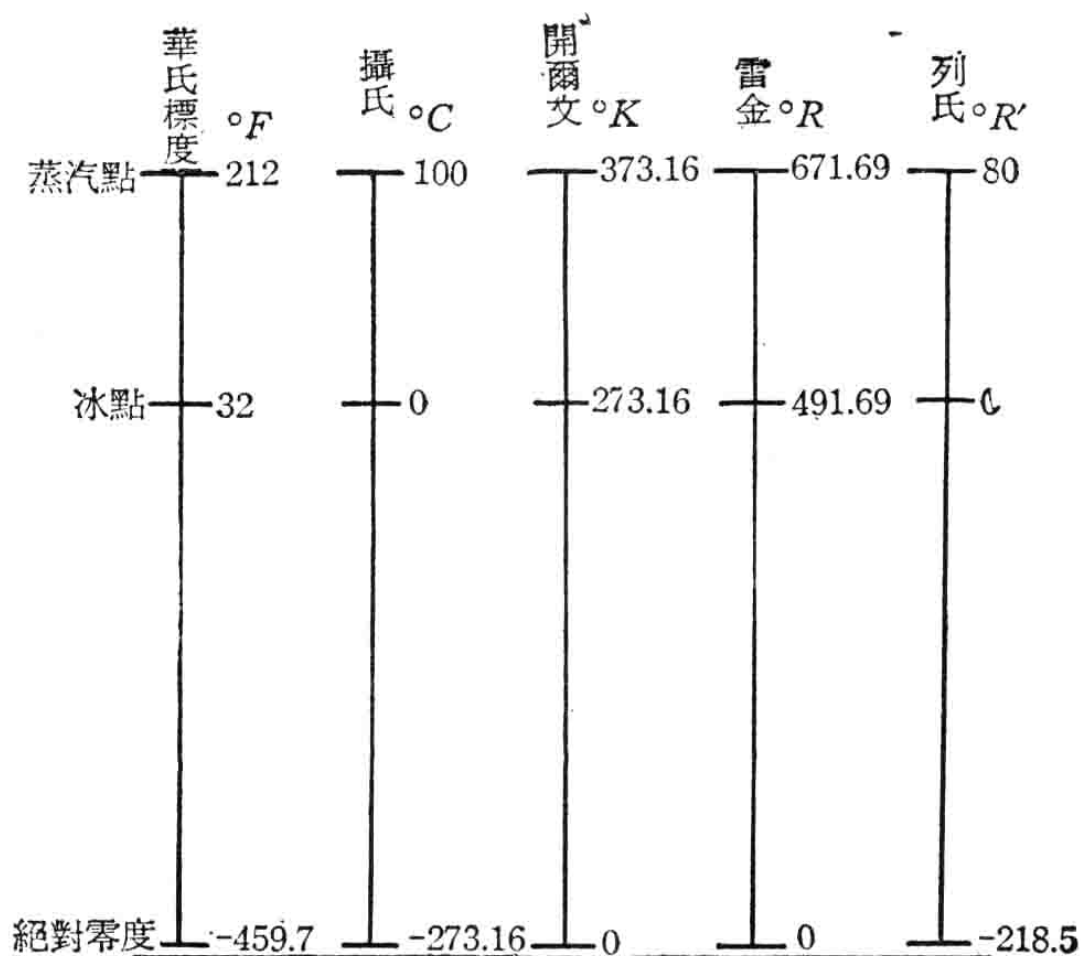


圖 1-1 五種溫度標度之相互關係

致於本章所述之工業用溫度測量儀器可分為下列五大類：

I. 膨脹式溫度儀器 (*Expansion Thermometer*)。

1. 水銀溫度計 (*Mercury-in-glass Thermometer*)。

2. 氣體膨脹溫度計 (*Gas Expansion Thermometer*)。

3. 汽壓膨脹溫度計 (*Vapor-Pressure Thermometer*)。

4. 液體膨脹溫度計 (*Liquid Expansion Thermometer*)。

5. 金屬膨脹溫度計 (*Metallic Expansion Thermometer*)。

II. 電阻溫度儀器 (*Resistance Thermometer*)。

III. 熱電高溫儀 (*Thermo-electric Pyrometer*)。

IV. 光學高溫儀 (*Optical Pyrometer*)。

V. 輻射高溫儀 (*Radiation Pyrometer*)。

§ 1-1 膨脹式溫度儀器

§ 1-1-1 水銀溫度計

工業用水銀溫度計與實驗室內所用之溫度計之構造極為相似，即為一圓形或其他形狀之玻璃管，管之中部為一內徑極小之毛細管，其下端與一裝滿水銀之膨脹球莖相連；兩者所不同者，乃工業用之溫度計在玻璃球莖及玻璃管外罩以金屬保護套，以免受意外損害，並添加固定裝置，可使之固定於待測溫度之處所。溫度計可彎成各種角度，以適合不同的需要，然其應用原理是一致的，即利用水銀體積受熱膨脹，受冷收縮的原理。

普通工業用水銀溫度計之溫度指示範圍，為 -38 至 $650^{\circ}F$ 。

(水銀之凝固點為 $-38^{\circ}F$ ，沸點為 $675^{\circ}F$) 欲測高溫時，於水銀上充以高壓——自 30 psi 至 300 psi 之壓力，視溫度之指示範圍而定——之乾燥氮氣，則其溫度可測至 $1000^{\circ}F$ ，並以石英替代普通玻璃以免發生軟化變形的現象。

附帶一提，工業用水銀溫度計之反應速率，即溫度計內之水銀與計外待測流體的溫度達到熱平衡的趨勢，視待測溫度流體之性質，流速及水銀溫度計之大小質料而定。在球莖與金屬保護套之間裝水銀或其他熱傳導係數較大之流體，即可增加熱量傳導之速度，其反應時間大概為 0.01 分至數分鐘不等。

綜合上述，可略明水銀溫度計之優劣點，今比較之，並略述如何糾正其劣點：

水銀溫度計之最大優點為價格低廉，使用便利，無需繁雜的校正手續，然其劣點仍為數不少：

1. 指示不夠準確，刻度小不易精確地被讀出。由於物體皆易隨溫度之變化而變致計內毛細管或球莖之玻璃體積有了變動，因而造成了根本上的指示誤差。此缺點可略予以糾正，使其偏差大為降低，即將溫度計分由數種膨脹係數不同之玻璃組成之。

2. 水銀之膨脹係數隨溫度之升降而有些微變化。

3. 溫度之指示範圍不大。然可於水銀加高壓改良之。

4. 水銀柱上升時，水銀上之氮氣壓力亦隨之受壓迫而升高，致管壁膨脹，水銀收縮，因而使溫度指示較低，然此問題並不太嚴重。

5. 球莖插入待測溫度流體的深度，常易導至嚴重錯誤。因為未浸入流體內之段，當水銀上升超過流體液面後有熱量之散失，造成所謂「插入誤差」，因此，最好將整個溫度計插入流體內，然如此測量溫度困難太多。故另有一校正法如下式所示：

$$\Delta = a \cdot n \cdot (T - t) \quad (1-6)$$

其中： Δ = 加於溫度計上指示數之校正值。

a = 玻璃管內水銀膨脹係數。

攝氏溫度計為 0.00016

華氏溫度計為 0.00009

n = 液面以上露出之度數

T = 溫度計上指示的溫度

t = 水銀溫度計液面以上露出部分之平均溫度。

舉例：

溫度計指示溫度 $T = 85^{\circ}C$

溫度計浸入至 $20^{\circ}C$ 處，則露出液面之上度數 $n = 65^{\circ}C$

露出部分之平均溫度 $t = 38^{\circ}C$

$$\therefore \Delta = 0.00016 \times 65 \times (85 - 38) = 0.49$$

故此水銀溫度計之正確指示應為 $85 + 0.49 = 85.49^\circ \text{C}$

6. 長期使用後，水銀溫度計之體積常因之而略為改變。

7. 水銀溫度計不宜應用於溫度變化激烈，驟昇驟降，或外界溫度常易變遷之處。

§ 1-1-2 氣體膨脹儀器：

一切膨脹式溫度記錄儀器均由下列五部分所組成：

1. 金屬球莖——其中充以流體，如水銀，酒精以及各種氣體等等。該球莖表面面積與體積之比愈大，金屬厚度愈薄，及金屬導熱係數愈高則其靈敏度愈大。

2. 毛細管——將金屬球莖與儀器相連。毛細管通常長度不超過 200 呎；毛細管太長，除因費用昂貴外，其阻力亦隨其長度而增加，反應之落後提高，指示自不易求其準確。

3. 儀器內之作用機構 (*Actuating Mechanism*) 如巴登管、螺形管等。其目的為將球莖受熱後所產生的壓力經毛細管後轉變為直線位移，使能將變數加以記錄或指示。

4. 增加作用機構移動距離之連桿及記錄筆。

5. 記錄紙轉動機構。

圖 1-2 所示為此五部分相互連接之實際圖。

氣體膨脹儀器所應用的原理係根據查理定律 (*Charles' Law*)，即假使氣體之體積保持一定常數，則溫度與氣體之壓力成正比，這是假設該氣體為理想氣體，其關係如下：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{或} \quad PV = nRT \quad (1-7)$$

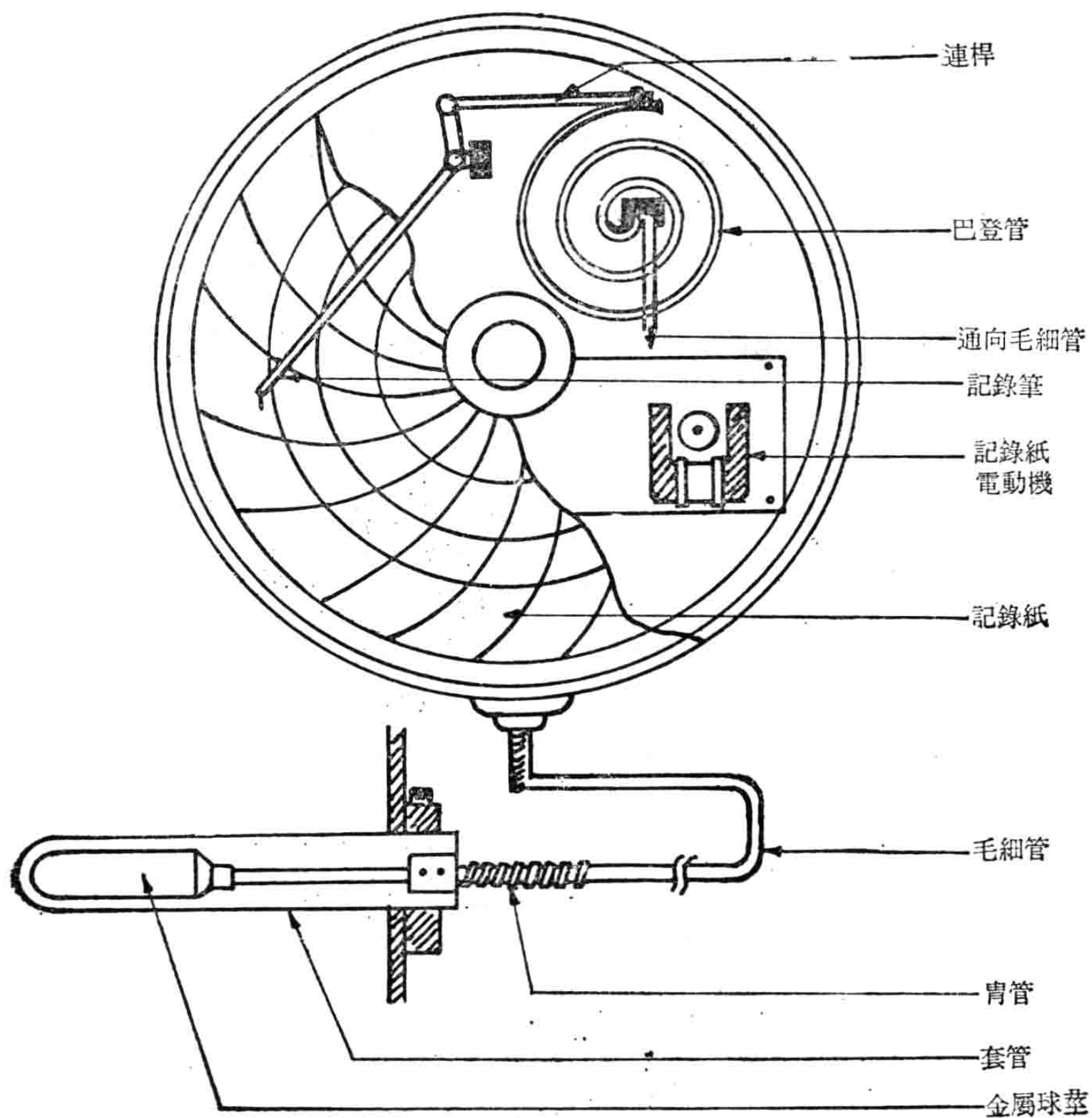


圖 1-2 膨脹式溫度儀器之構造

若非理想氣體則有凡特瓦耳 (Van der Waal) 之修正式:

$$\left(P + \frac{n^2 a}{V^2}\right) (V - nb) = nRT \quad (1-8)$$

式中, P = 氣體壓力, T = 絕對溫度, V = 氣體體積, R = 氣體常數, n = 摩爾 (moles) 數。

工業上常用爲膨脹之氣體有 N_2 , H_2 , O_2 , CO_2 及空氣等，其中以 N_2 應用最多。

氮氣膨脹溫度儀之溫度指示範圍爲 $-200^\circ F$ 至 $800^\circ F$ ，但在高溫易有漏氣現象而造成儀器的指示誤差，故最好勿使球莖侵入高溫之流體中或時間過久。

利用氮氣爲膨脹氣體有下列之優點：

1. 氮氣爲一惰性氣體，與金屬無任何化學反應。
2. 黏度低。
3. 膨脹係數高。
4. 比熱低。
5. 製造易，灌注方便。

氣體膨脹儀器與液體膨脹儀器相同，均受四周溫度變化效應之影響，使作用機構隨四周溫度之變動而有變化，由此造成誤差。消除此種誤差有下列數法：

1. 使球莖之體積與作用機構及毛細管之體積和之比保持極高，則後者僅佔球莖內氣體體積之一極小部分，如此其因四周溫度變化所產生的誤差當不致如何太大。然其困難尚多：如球莖體積過大，成本提高，安裝不便。又作用機構過小，作用動力必減少。毛細管內徑太小，必增加落後時間。

2. 利用正負相消的原理，在作用機構與記錄筆相接之連桿上添加一雙金屬片如圖 1-3a，或添加一與儀器內作用機構完全相同的另一套作用機構，然位移之方向相反，如圖 1-3b，當四周溫度變化時，圖 1-3a 之雙金屬片或 1-3b 之溫度補償器亦受其影響而告伸縮或位移方向相反而抵消了原作用機構之位移，使溫度之指示不受四周溫度的影響。

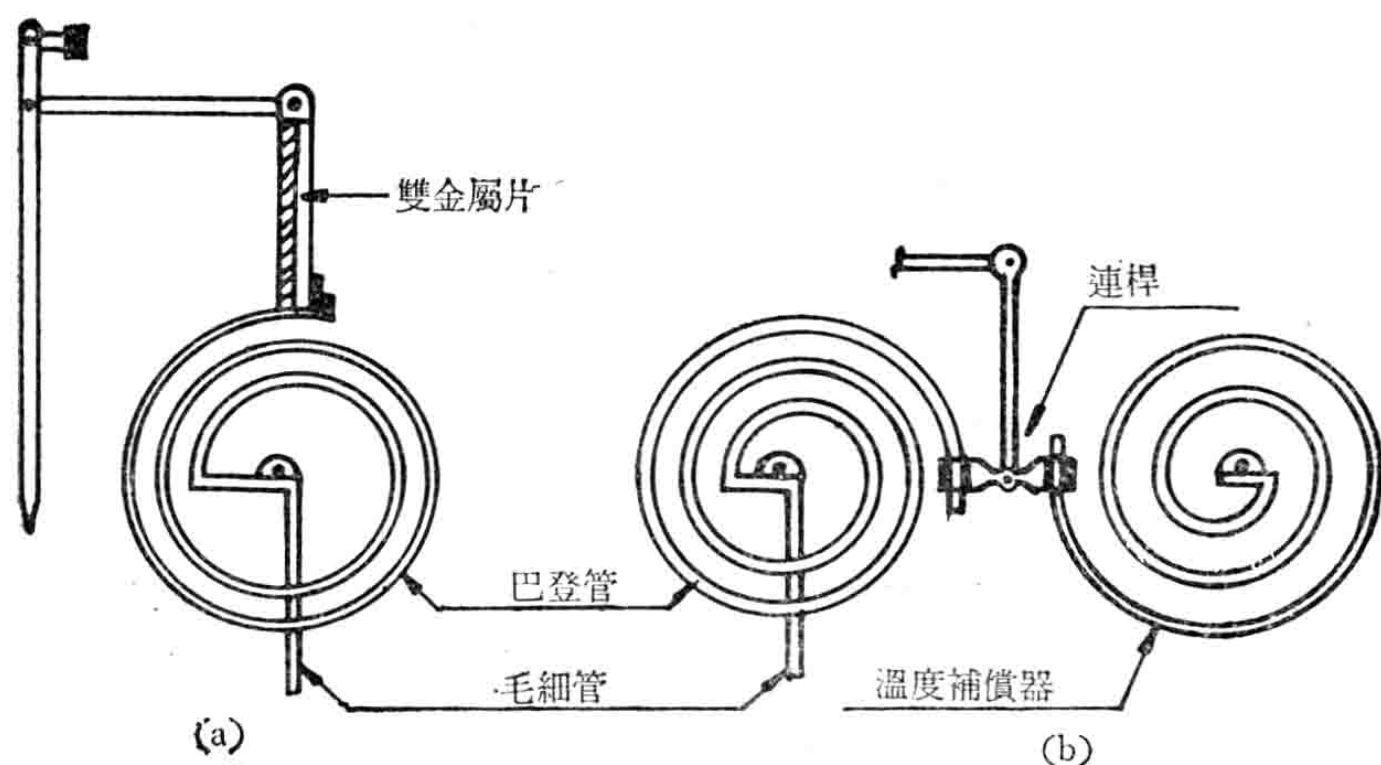


圖 1-3 四周溫度效應的補整

§ 1-1-3 汽壓膨脹儀器

任何汽體若密封於一容器內，根據道爾頓定律，一飽和汽體之壓力與溫度成正比，但與體積無關。假若溫度有任何變化，則視改變之情形，致有一部分液體汽化，或有一部分汽體凝結，最終必趨向平衡。此即汽壓膨脹儀器之基本原理。其優點亦即在此汽壓僅與該液體之游離液面之 (*Free Surface*) 溫度成一定關係，故外界溫度變化，或作用機構與毛細管之溫度有變化時，其影響不若前述膨脹儀器所受之大。

至於儀器內所用之液體必須不與儀器內質料有任何化學反應；且沸點不宜太高，否則於低溫度時，作用動力太小，不足產生位移，其臨界溫度 (*Critical temperature*) 必須在儀器所能指示最高溫度之上；製造方便，容易購得。

普通最常用之液體有氯甲烷 (CH_3Cl)，二氧化硫 (SO_2)，醚

($C_2H_5OC_2H_5$), 乙醇 (C_2H_5OH), 甲苯 ($C_6H_5CH_3$), 丁烷 (C_4H_{10}), 丙烷及己烷等。

汽壓膨脹儀器與液體膨脹儀器因為球莖內有液體致受落差效應 (*Head Effect*)，由於球莖之倒立或直立，以及儀器和球莖之溫度不同，造成液體在球莖和儀器內之流動，致儀器之溫度指示游移不定；更由於球莖之置放高度之不同，而有落差壓力之影響，造成了溫度之指示誤差。

汽壓膨脹儀亦受交替四周溫度效應 (*cross-Ambient Temperature Effect*) 之影響，致該儀器不宜用於測量與室溫相近之溫度即 $0 \sim 100^\circ F$ 。補救辦法，即在膨脹液體上再灌上另一種不生氣化之液體。

§ 1-1-4 液體膨脹儀器

液體受溫度之變化而改變其體積，但與壓力無關，故其溫度與體積呈線形關係，即溫度之增減亦使其體積亦作等比例之增減，此為其最大優點。事實上，並無一液體，其膨脹與溫度呈絕對線形關係，其間關係可寫成：

$$V_T = V_0 \cdot (1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3) \quad (1-9)$$

其中，

V_T = 膨脹後之體積。

V_0 = 膨脹前之體積。

T = 溫度差 ($= T_{V_T} - T_{V_0}$)。

α, β, γ = 膨脹係數。

於溫度差不大之情況下， β 及 γ 可忽略不計，即，

$$V_T = V_0(1 + \alpha T) \quad (1-10)$$

所使用之膨脹液體應具備下列條件：

1. 其體積膨脹係數須高。
2. 其汽壓 (*Vapor pressure*) 在溫度指示之範圍內應小。
3. 導熱性須高，然比重及比熱等應低。
4. 不受壓縮。

工業上常用於液體膨脹儀器之液體有下列數種，即丙酮 ($CH_3-CO-CH_3$)，戊烷，乙醇，乙醚，甲苯，水銀。其中以水銀應用最廣。水銀沸點雖為 $675^\circ F$ ，然若加以相當高之壓力，則其溫度指示範圍可高達 $1200^\circ F$ 。

由於水銀之比重頗高，若球莖之位置太高，即易產生相當之落差。消除之法為增加作用機構的剛硬度 (*stiffness*) 或在球莖內加以適當壓力。

至於四周溫度變化效應同前，並可由下列算式求得

$$E = \frac{V_c T_c + V_m T_m}{V_B} \quad (1-11)$$

其中；

E = 誤差即修正溫度。

V_c = 毛細管體積。

V_m = 作用機構體積。

V_B = 球莖體積。

T_c = 毛細管之溫度變化度數。

T_m = 作用機構之溫度變化度數。

補整此種因受外界溫度變化而生之誤差可參考 § 1-1-2 或由式 (1-11) 中知增大球莖之體積，可以減少誤差度數，然此法將提高儀器之成本。