

氣溫測量原理及誤差的介紹

王永壯

中央氣象局台北氣象站

摘要

溫度係定義一物質的熱力狀態，其值和分子平均動能有關，透過能量交換過程，因此溫度可以被量測。氣象工作範圍內溫度測計的種類包括地面及高空之氣溫，地表下不同深度之地溫及水表面之水溫。在穩定狀態下，溫度計會藉輻射、對流及傳導等過程和周圍達成平衡，為使氣象觀測所量測之溫度具有代表性及限制性，因此本文介紹了氣溫測量的原理及誤差來源。由於空氣是不良的熱導體，為了避免輻射熱的影響，因此溫度計必需置於適當環境，又為使所量測之氣溫有代表性，因此也需選擇適當觀測的地點。氣象上常用來測量溫度之溫度計依感應原理及構造之不同可以區分為(1)玻璃液體式溫度計(2)變形溫度計(3)金屬液體式溫度計(4)電力式溫度計。一般而言電力式溫度計之反應時間較快，所測量之溫度範圍較大且靈敏度較高，較被常用為自動觀測儀之用。本文同時也分析了各種不同原理之溫度計之誤差來源及測量原理。當然為了使所測量的溫度能準確，所使用之溫度計必需定期校驗，以保持測得之溫度能具有代表性。

一、前言

溫度係定義一物質的熱力狀態，其值和分子平均動能有關，透過能量交換過程，因此溫度是可以被測量。氣象工作範圍內溫度測計的種類包括地面氣溫（離地表1.25-2公尺）、高空氣溫、地表下不同深度（5,10,20,50,100,500cm）之地溫及水表面之水溫。為了表示溫度，必須選擇一個衡量溫度的標準當為參考點。1990年國際溫標（International Temperature Scale of 1990；ITS-90）定義一系列的溫度參考點如表一所示。

表1：國際溫標定義之參考點

Tabel.1：The reference temperature of ITS-90

指定溫標參考點	說明
K °C	
54.3584 -218.7916	氧的三相點
273.16 0.01	水的三相點
373.15 100	標準氣壓下水之沸點*

*：沸點（T）與大氣壓力之關係式為：

$$T = [100 + 2.7655 \times 10^{-2} (P - P_0) - 1.13393 \times 10^{-5} (P - P_0)^2 + 6.82509 \times 10^{-9} (P - P_0)^3] ^\circ\text{C}$$

其中P為大氣壓力單位為 mb

$K = ^\circ\text{C} + 273.15$ （K為國際上採用之溫度單位）

另外為實用方便計 ITS 也定義一些二級溫標參考點如表二所示。

表2：國際溫標定義之二級參考點

Table.2：The second reference temperature of ITS-90

指定溫標參考點	說明
K °C	
1357.77 1084.62	標準一大氣壓下銅之凝固點
933.473 660.323	標準一大氣壓下鉛之凝固點
273.15 0.0	標準一大氣壓下冰點
234.3156 -38.8344	汞的三相點

二、溫度表的安置

在穩定狀態下，溫度計會藉輻射、對流及傳導等過程和周圍達成平衡，測量大氣之溫度必須儘量排除輻射熱及溫度計支架上所傳導之熱。由於空氣是不良的導熱體，爲了避免溫度計直接暴露於陽光下（直射及間接散射或由地面反射太陽光）而又能代表附近環境，因此溫度計必需置於一通風良好的環境，此可爲自然通風或強迫通風的環境（通風量的大小與感應元件之面積，熱交換係數等有關，一般之玻璃溫度計具有3m/s之通風即可），因此設計了百葉箱來滿足通風及避免太陽輻射的影響並採用熱傳導較低之支架。如果採用反應較快之溫度感應器而直接暴露於空氣中時則感應器應爲光亮且面積小。

(一)百葉箱 (Instrument Shelter) 的設計

百葉箱的設計通常爲一木製有百葉窗的箱子，爲適應不同的環境其外觀可以有一些不同的變化 (Sparks, 1972; Monroe, 1981)。在無雲且陽光強時百葉箱會吸熱因此比氣溫高（誤差的大小除和風速大小相關外，和太陽方位角時之風向有關）但無雲的夜晚時則百葉箱內所量的溫度比氣溫低，雖然百葉箱的設計無法達到完美（誤差可以達到1.5℃）但設計一百葉箱仍必須考慮以下的條件：

1. 太陽光（包括直射及散射）不可直接進入百葉箱。
2. 百葉箱四面爲百葉窗的型式，可以增加通風*。
3. 必需牢固以免易損壞（至少能忍受30m/s之風）並保持水平。
4. 爲增加反射陽光的能力百葉箱外觀塗成白色，箱頂可爲雙層並斜向南方以導引下雨時之水流。
5. 爲避免觀測時受太陽輻射的影響，因此百葉

箱門開向正北方。

6. 百葉箱大小需考慮置放儀器的多寡（溫度計感應器至少離百葉箱壁10公分以上）。
7. 避免雨水淋進箱內。

*：一般大型百葉箱的通風速率約爲離地面10公尺高之風速的15%(Meteorological Office(1981), Handbook, Vol.3)，如果10公尺高之風速爲6m/s，則百葉箱通風速率小於1m/s，此比WMO建議之通風乾濕球溫度計通風速率2.5m/s爲小。溫度計如果置於風速很大的地方，由於(1)空氣絕熱壓縮增溫(2)空氣摩擦加熱等兩項因素影響結果溫度會比實際氣溫高。依Bernoulli's定理 $\Delta \theta = C \cdot v^2$ 其中C爲常數視溫度計的性質而定。此種誤差在地面不顯著，在高空時較顯著（風速90m/s時電阻式溫度計誤差約3℃）。

(二)適當的觀測地點

爲了要使量測的氣溫有代表性，因此需要選擇一適當設置百葉箱的地點（觀測坪）如果觀測所獲得的資料是綜觀氣象或氣候目的，則觀測坪需考慮下列數點條件：

1. 百葉箱需置於遠離建築物（距離至少離建築物高度四倍以上）及柏油、水泥路面（至少15公尺，最好爲30公尺）。
2. 百葉箱需置於草地上（範圍不小於7m × 7m，草的高度約10—15公分高）。
3. 觀測坪附近應較爲空曠，較少樹木 (Floyd et.al.(1952)指出林木較多處所量得之氣溫會比空曠處低)。

三、氣象用溫度計

溫度計最早是由Galileo於1584年所發明，而水銀溫度計於1721年由Fahrenheit所發明。氣象上常用來測溫度之溫度計可以依感應原理區分爲：

- (1) 受熱膨脹式

(2)水汽壓隨溫度變化

(3)熱電阻式

(4)熱電反應

(5)聲速隨溫度變化

根據構造不同而可分類如下：

(1)玻璃液體式溫度計 (Liquid-in-glass thermometer)

A. 水銀溫度計 (Mercury thermometer)

B. 酒精溫度計 (Spirit thermometer)

(2)變形溫度計 (Deformation thermometer)

A. 巴塘管式 (Bourdon)

B. 雙金屬式 (Bimetallic thermometer)

(3)金屬液體式溫度計 (Liquid-in-metal thermometer)

A. 水銀 (Mercury-in-steel)

B. 其他液體 (Other combination)

(4)電力式溫度計 (Electrical thermometer)

A. 電阻式 (Resistance thermometer)

B. 熱電式 (Thermoelectric thermometer)

C. 聲波式 (Sonic thermometer)

(一)玻璃液體式溫度計

大多數的溫度計係利用液體的膨脹原理做成，適合做為溫度計之液體最好具有沸點高，凝固點低，大的熱膨脹係數及良好的熱傳導且較低之熱容量等特性，此種玻璃液體式溫度計可以公式表示如下：

$$\Delta V = A \cdot \Delta l \quad \cdots \cdots (2.1)$$

上式中忽略感應球部之膨脹，如考慮則可以下式表示：

$$\Delta V = V_s (\gamma_l - \gamma_g) \Delta T \quad \cdots \cdots (2.2)$$

其中 A：溫度計內毛細管之截面積

Δl ：體積改變後水銀改變之長度

γ_l, γ_g ：分別為溫度計內液體及玻璃之膨脹係數

V_s ：標準溫度下之液體體積

由 (2.1) 及 (2.2) 式，

$$\Delta l = V_s \frac{(\gamma_l - \gamma_g)}{A} \Delta T \quad \cdots \cdots (2.3)$$

從 (2.3) 式可以知道，溫度計之靈敏度與採用液體的膨脹係數成正比而與溫度計玻璃毛細管之截面積成反比。

1. 水銀溫度計

利用水銀和玻璃之膨脹率不同而製成，但膨脹率在任何溫度下並非都是常數，此誤差在高溫下將較明顯（在氣象上不重要），一般玻璃毛細管中充滿氮氣或真空。

水銀溫度計之誤差來源可分為：

(1) 彈性誤差 (Elastic error)

此種誤差可以分為可回復及不可回復兩種。

可回復誤差：當溫度計在高溫突然降至 0°C 後再回復到原來之溫度時讀數會降低。此種誤差與玻璃材質有關，誤差可達 1°C，但較好之材質誤差只約 0.03°C，一般氣象上此種誤差不重要，但如做為校驗用之溫度計，因為溫度常須變化，此時才來考慮此誤差。

不可回復誤差：溫度計使用一段時間後水銀球常會收縮，因此使零點變化，通常製造時，管子先加溫或使用較好之玻璃材質可減少此種誤差，一般而言第一年此種誤差最顯著，誤差值約 0.01°C。

(2) 由於溫度計感應球部和毛細管內水銀柱

(示度處) 不在同一溫度所造成的誤差，亦即未考慮此項需訂正所造成之誤差。一般溫度計整支都在同一空氣中，所以極端例子中，此種誤差也很少大於 0.1°C，此種誤差可以下式表示：

假使 1°C 溫度的變化，可以改變長度 y，則

$$\begin{aligned} \Delta T &= l(\gamma_l - \gamma_g)(T - T_c)/y \\ &= \eta(\gamma_l - \gamma_g)(T - T_c) \end{aligned}$$

T：露出部份溫度計之平均溫度

T_e：環境的溫度

η：露出部份溫度計之度數

$$\Delta T = l(\gamma_l - \gamma_g)(T - T_e)/y \\ = \eta(\gamma_l - \gamma_g)(T - T_e)$$

(3)視差 (Parallax error)

此種誤差大小隨著溫度計玻璃管厚度及觀測時視線差而變化

(4)內部或外在壓力引起溫度計之感應球部體積的改變

氣象目的範圍內不會產生此種誤差

(5)毛細管誤差

毛細管形狀不規則造成之誤差

(6)超過溫度工作範圍外所引起之膨脹率改變

(7)刻度不良造成之誤差

2.酒精溫度計

酒精溫度計所用之液體有很多種，例如如 C₆H₅CH₃，C₂H₅OH，C₅H₁₂ 等。酒精之膨脹係數比水銀大約6倍，凝固點低，因此適合做溫度計。表三為水銀與酒精溫度計之比較。

從下表可以知道水銀溫度計之玻璃管要

表3：水銀、酒精溫度計之比較

Table 3：Comparison of the mercury-in-glass and the spirit-in-glass

項 目	水 銀	酒 精
膨脹係數（玻璃約 18×10 ⁻⁶ ~27×10 ⁻⁶ per°C）	182×10 ⁻⁶ per°C	C ₂ H ₅ OH 11×10 ⁻⁴ per°C)
沸點	356.7°C	C ₂ H ₅ OH ₁₂ 77.7~78.4°C C ₅ H ₁₂ 36.0~36.5°C C ₆ H ₅ CH ₃ 109.2~110.6°C
溶點	-38.87°C	C ₂ H ₅ OH -111.8~-117.3°C C ₅ H ₁₂ -130.8~-147.5°C C ₆ H ₅ CH ₃ -92.4~-102.0°C
純度	純	難純

細並適用於當最高溫度計，而酒精溫度計之膨脹率約為水銀之6倍，但沸點低易有蒸汽且性質較難控制，適用於當最低溫度計。

酒精溫度計之誤差來源可分為：

(1)酒精柱易斷裂。

(2)酒精易附著於玻璃管壁，當溫度急遽下降易留附於管壁使讀數下降。

(3)感應器球部之溫度與酒精柱之溫度不一所造成之誤差，此種誤差比水銀溫度計大數倍。

(4)酒精變質產生之誤差。

如果酒精不純則長久在陽光曝曬下會變質（有時為使讀數方便，常加些顏色於透明之酒精內），此種效應會使液體體積減少，降低零點。液體黏滯性亦會改變，而使落後係數增大。

3.最高溫度計

為一水銀製之溫度計，但在底部之玻璃毛細管有一較窄管處，因此溫度升高時，水銀可經由此窄處過去，當溫度下降時水銀球收縮，此時留於管徑內之水銀則停留原處，因此可以記錄最高溫度。如要復度時，則需

用力將此最高溫度計用力甩使留在玻璃管內之水銀回至感應球部。最高溫度計之擺置為底部稍高但幾近水平，當溫度下降時，重力使水銀柱不會收縮。

4. 最低溫度計

為一酒精溫度計，玻璃管內置一兩端為圓形之小指標，當溫度下降時，酒精液面收縮，表面張力使此一指標後退，當溫度升高時則酒精從毛細管中細縫處經過，指標停留

原處，因此可以量測最低溫度。復度時，只需將尾端抬高，由於重力作用指標會滑至現在氣溫之度數。為防止指標受重力影響而滑動，因此最低溫度計之擺置為尾部稍低幾近水平，重力使當溫度升高時不致將指標帶動。

5. 最高最低溫度計

此種溫度計係1782年英國James Six所發明 (Middleton, 1969)。

此為一U型溫度計 (圖1)，此種溫度

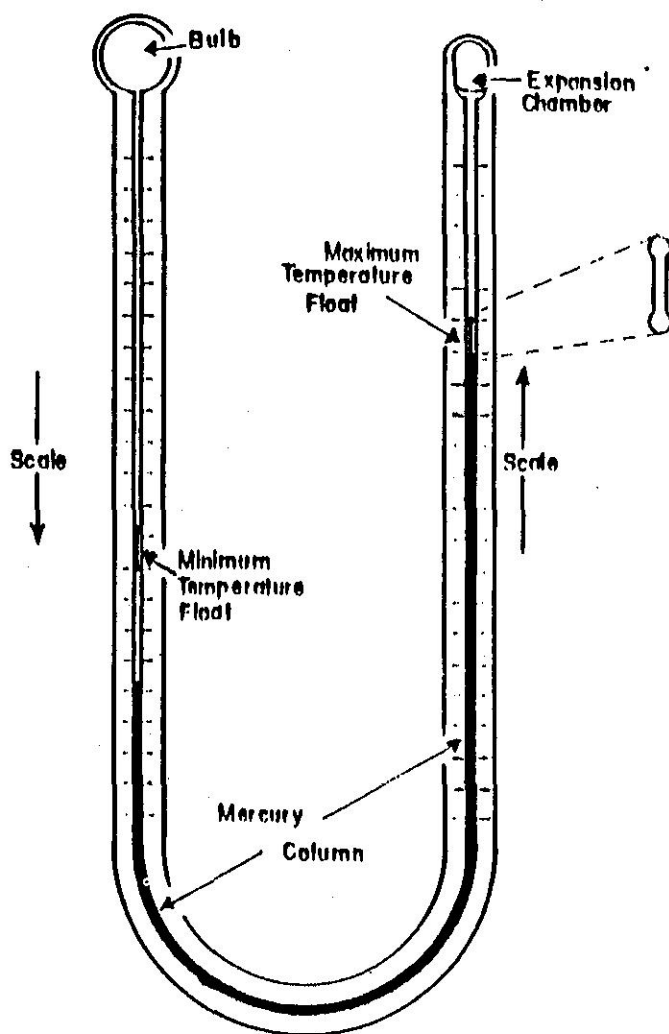


圖1：「U」型溫度計

Fig.1: "U" type thermometer

計可以量測最高、最低溫及現在之氣溫。此種U型溫度計之左邊圓球部及管徑內為充滿較輕的油（或為酒精）且為透明，其它則為水銀，另一右邊圓柱形尾端，則一半充滿油（或酒精）另外則為空氣或酒精蒸汽。

當溫度升高時，左邊圓球部之油膨脹帶動水銀柱，同時也推動水銀管內之一小鋼針，並增加圓柱球部內之氣壓。當溫度下降時，球部之液體收縮，U型管右邊圓柱管內之氣壓迫使水銀柱後退並帶動U型管左邊之小鋼針。U型管左右兩邊之刻度值相反，因此兩端之水銀則指示現在之氣溫。如圖所示U型之右端指示最高溫，左端則為最低溫，如果要復度時則需利用一小磁鐵將管內指示最高及最低氣溫之鋼針吸回水銀柱端即可。此種溫度計最大的缺點即管內之液體常將管壁潤濕並滲入水銀柱內，溫度之指示即變不精確，因此並不被氣象單位所採用（Snow and Harley, 1987）。

6. 地溫計

如為量取地表下深度5cm, 10cm, 20cm等之溫度，一般採用曲管地溫計，此種溫度計與一般溫度相同，只是玻璃管折成直角，球部之一端按需要深度折成近似直角刻度面向上。鐵管地溫計用於50cm以上之深度，其本身之構造與一般溫度計同，按需要之深度以適當之鐵管垂直埋入地下，將溫度計以規定長度之鏈懸掛於鐵管內，溫度計球部套以橡皮或塗以白臘，使其感應較為遲鈍，以防取出觀測時，溫度變不易獲得地表不正確溫度讀數。

(二) 變形溫度計

1. 雙金屬溫度計

將兩塊膨脹率不同的金屬黏在一起，當溫度變化時因為兩種金屬膨脹率不同而會產生彎曲膨脹率小的金屬在內，大的在外，在實驗室中可以得到彎曲程度與溫度間之關係，

此種雙金屬溫度計大多用於自記式儀器，此種溫度計雖不甚精確但非常實用，設計較好之雙金屬溫度計約有1%的誤差度。一般所採用之金屬為鎳鋼合金（invar；鎳37.5%，鋼62.5%，此種合金膨脹係數小）及黃銅或鎳鋼合金及鋼。一般雙金屬如較厚則落後係數較大（一般在風速5m/s以下落後係數為30秒），薄則較不堅硬。雙金屬溫度計有彈性遲滯現象（elastic hysteresis），如果溫度變化太大或雙金屬變形太多，則零點就會偏移，所以製造時即反覆改變溫度，以減少遲滯現象。

雙金屬溫度計金屬位移與溫度間之關係可以如下表示（Simidchiev, 1986）如圖2所示，溫度變化T時，金屬位移 λ ，雙金屬厚度分為 h_1 ， h_2 ，其熱膨脹係數分別為 α_1 ， α_2 ，假設在0°C時此雙金屬塊為平直，其長度 L_0 ，當溫度變化T時，雙金屬以半徑為R之圓形向下彎曲。因此其間之關係為：

$$L_1 = (R + h_1) \varphi \quad \cdots \cdots (2.4)$$

$$L_2 = (R - h_2) \varphi \quad \cdots \cdots (2.5)$$

L_1, L_2 分別為溫度T時雙金屬之長度。由

(2.4)、(2.5)式

$$\varphi = \frac{L_1 - L_2}{h_1 + h_2} \quad \cdots \cdots (2.6)$$

金屬膨脹長度可以表示如下：

$$L_T = L_0(1 + \alpha T)$$

$$L_1 = L_0(1 + \alpha_1 T)$$

$$L_2 = L_0(1 + \alpha_2 T) \quad \cdots \cdots (2.7)$$

(2.7)式代入(2.6)式得到

$$\varphi = \frac{L_0 (\alpha_1 - \alpha_2) T}{h_1 + h_2} \quad \cdots \cdots (2.8)$$

$$\lambda = R - R \cos \varphi \quad \cdots \cdots (2.9)$$

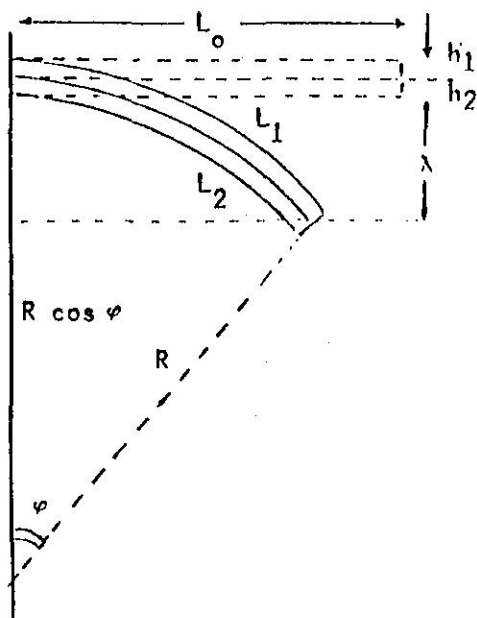


圖2：雙金屬之溫度效應示意圖（摘自 Simidchiev,1986）

Fig.2 : Tempereure effect of bimetal thermometer (After Simidchiev, 1986)

三角函數關係 $1 - \cos \varphi = 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}$
 因為 φ 很小， $\sin^2 \frac{\varphi}{2} = \left(\frac{\varphi}{2} \right)^2$ ， R 以 L_0 / φ
 代入，則 (2.9) 式

$$\lambda = 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2} = 2 \left(\frac{L_0}{\varphi} \right) \left(\frac{\varphi}{2} \right)^2$$

上式以 (2.8) 式代入，得 $\lambda = \frac{L_0^2 \cdot \alpha \cdot T}{2 \cdot h}$

其中 $\alpha = (\alpha_1 - \alpha_2)$ 和 $h = (h_1 + h_2)$

因為 L_0, α, h 都是常數，所以 $\lambda = A \cdot T \cdots (2.10)$

其中 $A = \alpha \cdot L_0^2 / 2h$

從 (2.10) 式可以知道雙金屬溫度計位移只是溫度的函數且呈線性關係。

2. 巴塘管溫度計

為一橢圓橫切面的曲管，內裝液體（酒精、水銀或二甲苯），當溫度升高時，內裝液體膨脹，此管伸直產生位移。表四為雙金屬溫度計與巴塘式溫度計之比較。

表4：雙金屬溫度計與巴塘管式溫度計之比較

Table 4 : Comparison of the Bimetal and Bourdon Tube

項 目	雙 金 屬	巴 塘 管
落後係數	可大可小	比雙金屬大(相同厚度下)
工作範圍	低溫時零點會改變 (突然降低溫度時) 高溫時沒缺點	高溫時內壓過高會破壞 低溫時沒特別缺點
鏽蝕	如採用鋼則要注意防鏽	採用不鏽材質
堅固	優	較弱
安裝、維護	低	高

3. 金屬液體式溫度計

(1) 水銀鋼管溫度計

類似巴塘管，為一13吋之鋼管內裝水銀，液體的膨脹在另一端容器內，壓力的改變是

利用一很細充滿水銀的毛細鋼管傳過來，最長可至50公尺，因為此結構較為堅固常被用於野外量測遠端之溫度，此種溫度計缺點為：

(1) 落後時間超過4分鐘；(2) 管線暴露過長因此

受輻射熱影響較大；(3)不適合於溫度低於-38°F以下時使用。

(2)其它液體鋼管溫度計

一般工業用途較少。

(三)電溫度計

1.電阻式溫度計

所有金屬的電阻隨溫度變化或多或少會改變（正的溫度係數），但並非所有的金屬皆適合來做為溫度計的材料，一般以白金、鎳、銅等材料製成。白金較穩定同時溫度與電阻間之關係較線性且可維持一段時間不須校驗，銅材質電阻與溫度的關係也呈線性。

另外，一些陶製感應元件其電阻變化也

是溫度的函數在氣象用溫度範圍內最適用。對純金屬及溫度變化較小時，電阻和溫度變化成線性可以下式表示：

$$R_T = R_s(1 + \alpha(T - T_s)) \quad \dots\dots(2.11)$$

R_T ：溫度 T 時之電阻

R_s ：標準溫度 T_s 時之電阻

α ：電阻溫度係數

對合金及溫度變化範圍較大時，電阻和溫度變化可以下式表示：

$$R_T = R_s[1 + \alpha(T - T_s) + \beta(T - T_s)^2] \quad \dots\dots(2.12)$$

α, β ：材質不同其值不同，由校驗得知
表五為不同材質 0°C 之電阻及電阻溫度係數。

表5：為不同物質 0°C 之電阻及電阻溫度係數

Table 5 : The resistance and resistance temperature coefficients of various material

材質	$R_s \times 10^6 \Omega \text{ cm}^{-1}$	$\alpha \times 10^4 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
銅	1.56	43
鐵	8.9	65
鎳	6.14	68
白金	9.81	39.2
鎢	4.9	48
銅(60%)鎳(40%)合金	4.8	± 0.2

另一類常被用來做溫度感應的電阻元件稱為熱敏電阻（thermistor; thermally sensitive resistor）。此種熱敏電阻通常是半導體金屬氧化物（電阻是負的溫度係數）且可以有不同的結構及尺寸。熱敏電阻之電阻和溫度間的關係可以下式表示：

$$R = A \cdot e^{a/T} \quad \dots\dots(2.13)$$

其中： A 和 a 為常數，依使用材料而定

T 為溫度，單位為 K

將（2.13）式取對數，則

$$\ln R = \ln A + \frac{a}{T} \quad \dots\dots(2.14)$$

如果以自然對數為座標系統，則（2.14）式可以直線表之，對校驗很方便。此種熱敏電阻溫度計反應時間與元件之面積／質量有

相關，通常為數秒，此種熱敏電阻誤差來源包括：

- (1)測量電阻之電橋其電池電壓不穩定
- (2)熱敏電阻係數隨使用的時間的長久慢慢變化
- (3)儀器線性反應特性飄移

圖3為典型熱敏電阻和白金電阻之電阻—溫度反應關係圖。在這兩種溫度計中白金電阻溫度計提供較大之溫度測量範圍，而熱敏電阻具有較高之準確度，圖4為熱敏電阻之非線性反應值。從圖中可以知道熱敏電阻之非線性溫度反應非常低，幾乎不必考慮非線性造成的誤差值。

選擇電阻式溫度計的材料一般考慮以下因素：

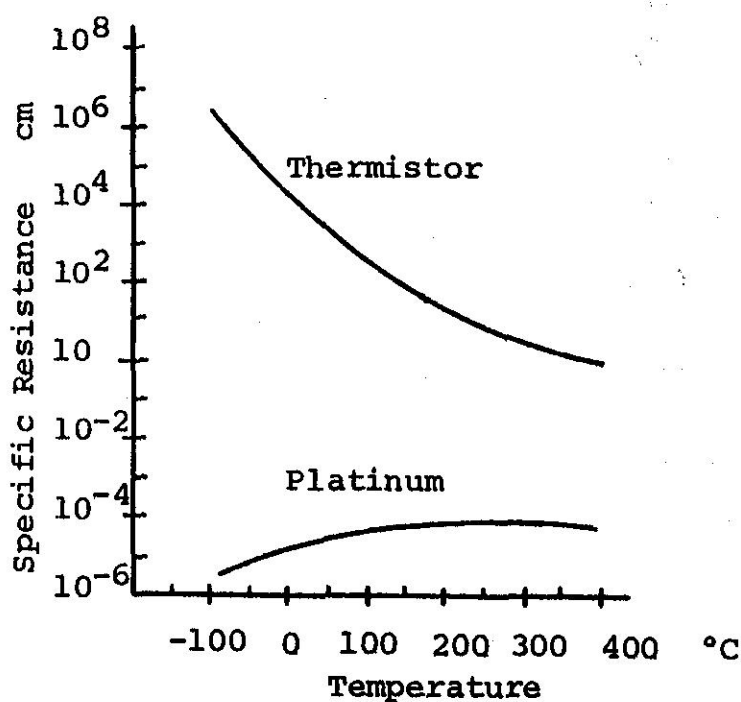


圖3：典型白金熱敏電阻之電阻－溫度反應圖（Wang et al.,1983）

Fig.3 : Resistance-Temperature response of typical thermistor material compared with platinum
(After Wang et al. 1983)

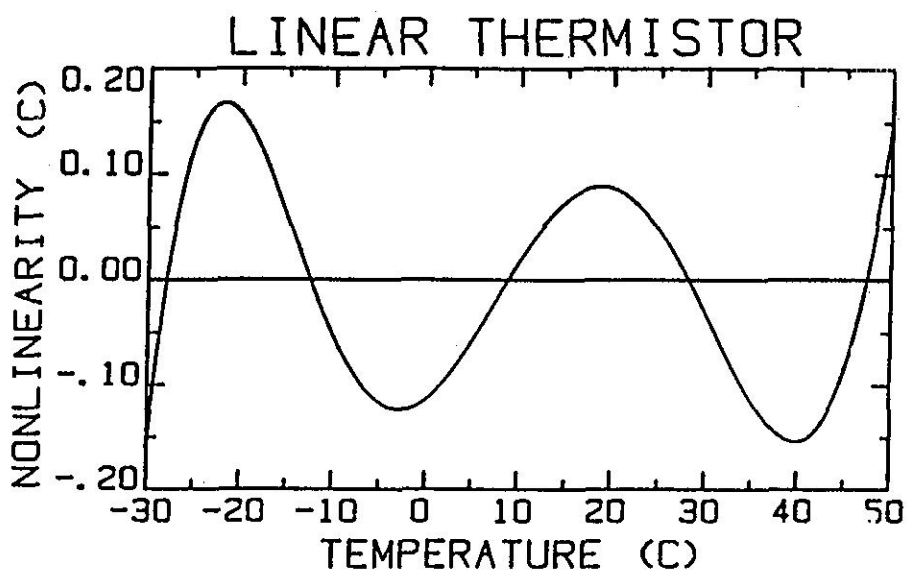


圖4：熱敏電阻之非線性反應誤差（Brock,1990）

Fig.4 : Equivalent temperature nonlinearity error of a linear thermistor circuit vs. temperature
(After Brock, 1990)

(1)電阻具有較大的溫度係數 α

(5)經濟因素

(2)性質能維持一較長時間不會改變

(3)具抗蝕性

表六為白金、鎳電阻溫度計與熱敏式溫度計之性能比較。

(4)溫度電阻間呈線性之關係

表6：白金、鎳電阻溫度計與熱敏式溫度計性能比較*

Table 6 : Performance specifications of platinum and Nickel Resistance Thermometer versus thermistors

規 格	熱 敏 電 阻 400 probe型	熱 敏 電 阻 700 probe型	白 金	鎳
溫度範圍	-35 to 140C in 4 steps	0 to 100C	-350 to 1350F	-100 to 600F
解析度	0.1C/0.01C or 0.001C	0.1C	0.1F	0.1F
準確度	± 1% full	0.2C full	± 2F	± 5F
感應元件大小	5/32" dia 4 1/2" l	3/32" dia. 6 1/2" l.	1/4" dia. 11 1/2" l.	1/4" dia. 4" l.
輸出值	10mv full scale	10 mv full scale	1 v full scale	1 v full scale
反應時間	3.4s	3.6s	5.0s	

※資料來源：Science Essentials Company, A Division of Beckman Instruments, Inc., Anaheim, California.

選擇電阻式溫度計的材料一般考慮以下因素：

(1)電阻具有較大的溫度係數 α

(2)性質能維持一較長時間不會改變

(3)具抗蝕性

(4)溫度電阻間呈線性之關係

(5)經濟因素

要利用電阻溫度計測量溫度可以惠斯登電橋（Wheatstone-Bridge）原理量測如圖5所示。T（溫度）變時G（檢流計）即改變，以此來測量電流（此種方法與電池電壓及表的靈敏度皆有關）。

2.熱電式溫度計

此種熱電式溫度計是測量因為溫度變化所引起之電流或電壓的改變量，最常被採用的熱電式溫度計為熱電偶（Thermocouples）

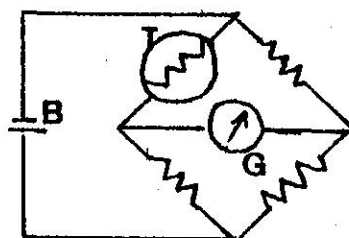


圖5：溫度測量之線路圖

Fig.5 : The circuit of temperature measurement

溫度計。如果一簡單的線路由兩個不相同的金屬做成且接觸（junction）在一起（圖6），如果兩端接觸點（一端接觸點稱測量點（measuring junction）另一端接觸點為參考點（reference junction）在相同的溫度下合成

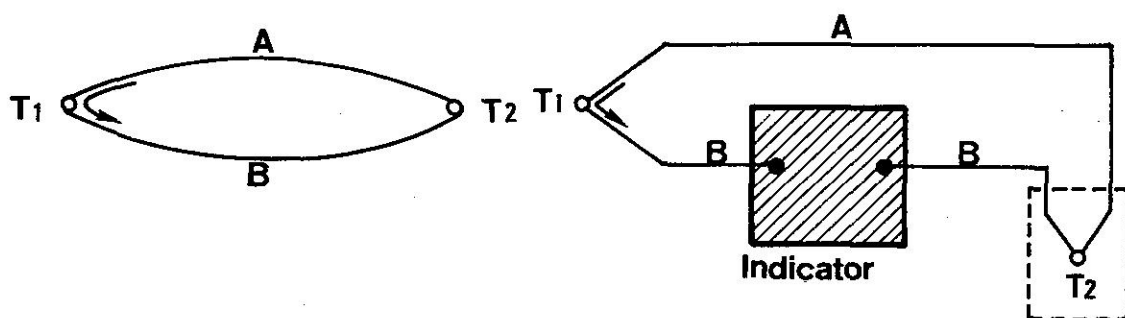


圖6：電熱偶式溫度計之測量原理示意圖。其中AB代表不同材質之金屬 T_1 及 T_2 代表不同之溫度。箭號方向代表電流之方向

Fig.6 : Elementary thermoelectric circuits T_1 and T_2 represent measuring and reference junction

的電動勢 (electromotive force; emf) 為0，但如果其中一端的接觸點溫度改變，則此二個電動勢不再平衡，會有一靜電動勢和電流產生。接觸點電動勢的大小和方向由兩端接觸點溫差及接觸線路之金屬種類而定。這種現象是1821年發現，稱之為Seebeck效應。

熱電式 (熱電偶溫度計) 具有以下之特性：

- (1) 如果採用之兩種金屬線路為均勻 (homogeneous)，則emf的大小和線路之溫度無關。
- (2) 如果有第三種金屬與線路A或B接觸，當新的兩個接觸點在同一溫度下時，則沒有新的emf產生。此即我們可以利用電壓表連接於線路(在相同的溫度下) 中來量測電壓。
- (3) 如果金屬A和C的emf為 E_{ac} ，金屬B和C的emf為 E_{bc} ，則金屬A和B的emf為 $E_{ac} + E_{bc}$ 。
- (4) 如果兩個接觸點之溫度分別在 T_1 及 T_2 ，並產生 E_1 的emf，同時在 T_2 及 T_1 中產生 E_2 的emf，則當接觸點的溫度在 T_1 及 T_2 時將產生 $E_1 + E_2$ 的emf。

熱電偶溫度計的優點為：(1)量測溫度範圍較廣(2)反應快(落後時間僅數秒)(3)堅固

且體積小(4)可靠(對輻射熱之反應低)(5)價格低廉(6)易於連接於一簡單之記錄器。然而因為產生之emf非常微弱，約 $40 \mu v/^{\circ}C$ 及溫度電壓稍為呈非線性反應，因此準確性較差。

美國儀器學會 (Instrument Society of America) 將一般常被用為熱電偶溫度計之金屬對以一些字母來代替。

Type T—銅 對 康銅

Type J—鐵 對 康銅

Type E—鎳含10%鉻 對 康銅

Type K—鎳含10%鉻 對 鎳含5%鋁及矽

Type R—白金含13%銻 對 白金

Type S—白金含10%銻 對 白金

Type B—白金含30%銻 對 白金含6%銻

由於Type T的熱電偶採用之金屬較能防鏽，因此在氣象中較常被採用。

emf和溫度的關係並非線性，可以下式表示：

$$E = a\theta + b\theta^2$$

以Type T為例， $a=38.63043$ ， $b=0.04132299$

在一般氣象溫度範圍內，可不考慮 $b\theta^2$ 之非線性項。

圖7為以Type T之熱電偶為例所劃之溫度—電壓反應圖。從圖中可以知道稍為具有非線性溫度—電壓之反應(非成一直線)。圖8則為

其非線性誤差之值。

如果將一些熱電偶連在一起則稱為熱電堆 (thermopile)，由特性(3)可以知道熱電堆合成之emf較大。

3. 電溫度計之比較

在電溫度計中較被常採用的為電阻式溫度計及熱電偶溫度計，以下為兩種溫度計之比較：

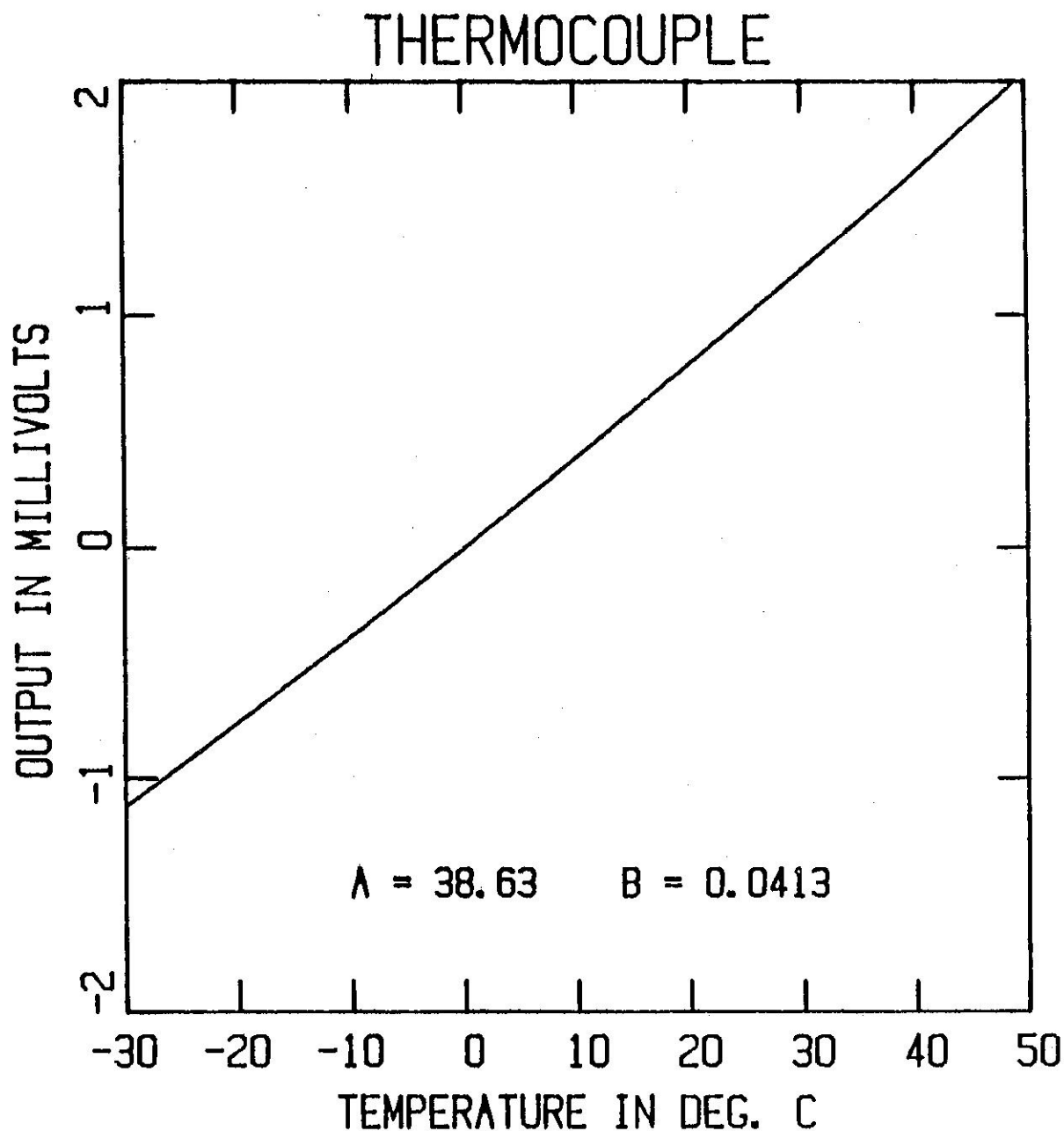


圖7：參考接觸點為0°C時銅-康銅熱電偶溫度計之溫度-電壓反應圖 (Brock,1990)

Fig.7 : Voltage output of a copper-constantan thermocouple

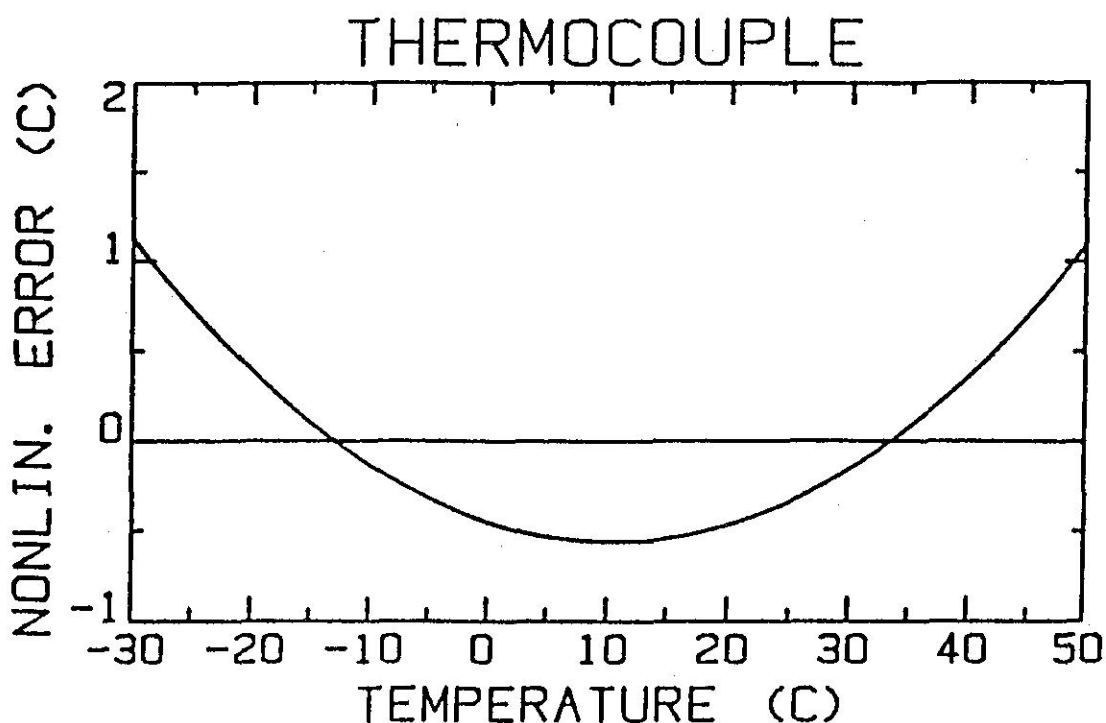


圖8：熱電偶之非線性反應誤差 (Brock,1990)

Fig.8 : Nonlinearity of a copper-constantan thermocouple

(a)測量方式

兩種電阻式溫度計（白金電阻及熱敏電阻）都直接測量溫度但熱電偶式需要一參考點，因此電路較複雜。

(b)溫度範圍

表七為白金電阻、熱敏電阻及熱電偶式溫度計之測量範圍以熱電偶最大，白金電阻次之，熱敏式最小。

(c)準確度

熱敏電阻最準確，其解析度可至 0.01°C
 白金電阻次之，其解析度可至 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
 熱電偶式較不準確，其解析度可至 $\pm 1^{\circ}\text{C}$

(d)靈敏度

白金電阻： $0.1\ \Omega\text{F}^{-1}$
 熱敏電阻： $10\text{-}10^5\ \Omega\text{F}^{-1}$
 熱電偶式： $40\ \mu\text{V}^{\circ}\text{C}^{-1}$ (在 25°C ；Type T)

表7：白金電阻、熱敏電阻及熱電偶式溫度計測量範圍

Table 7 : Temperature range of platinum resistance thermistor and electrical thermometer

型 式	最 低 可 量 測 溫 度	最 高 可 量 測 溫 度
白金電阻	-297°F	2000°F
熱敏電阻	-475°F	600°F
熱電偶式	-475°F	6000°F

(e)應用性

熱電偶式具有較廣之應用性，常被用來當輻射計之感應元件；熱敏電阻由於形狀及大小可以變化同時可用於當風速計，用途正增加中。

(四)聲波溫度計

利用聲速在乾空氣中只是溫度的函數之原理製成。

$$C = \left(\frac{\gamma RT}{m} \right)^{1/2} \quad \dots\dots(2.15)$$

其中 γ ：比熱係數

R ：氣體常數

m ：分子量

T ：絕對溫度

C ：聲速

聲波溫度計之設計原理為利用電壓發射一高頻短波的音波傳到一固定距離，此脈波被一壓電裝置接到後產生一電壓將此電壓放大。利用計算發射到接收之時間差來求溫度。

此種聲波溫度計（通常為超音波）具有以下之優點：

- (1)沒有落後現象
- (2)不受輻射熱影響
- (3)可量測發射與接收距離間之平均溫度

四、溫度計的落後現象

當溫度突然改變後溫度計需要一段時間才能反應到真值，此種現象即為落後現象，每一種溫度計之落後時間不同，可用落後係數（時間常數；Time Constant）來表示此種現象。

溫度計和環境間的熱交換可以下式表示：

$$dQ = -\beta A(T - \theta) D \tau \quad \dots\dots(2.16)$$

其中 dQ ：在一段時間 τ 內溫度計與環境之熱交換量

β ：溫度計和空氣之熱交換係數

A ：感應元件之表面積

T ：溫度計之讀數

θ ：環境溫度

dQ ：熱量使溫度計溫度改變量為

$$dQ = mcdT \quad \dots\dots(2.17)$$

其中 m ：感應元件之質量

c ：感應元件之比熱

由（2.16）及（2.17）式得

$$\frac{dT}{d\tau} = -\left(\frac{1}{\lambda}\right)(T - \theta) \quad \dots\dots(2.18)$$

其中 $\lambda = \frac{mc}{\beta A}$ （ λ 為溫度計之落後係數；因此可知元件的熱容量愈大，散熱面積愈小則落後將愈大，熱交換係數通常為未知數與所用元件之材質有關。）

（2.18）式說明溫度計溫度的改變率

$$\text{由 (2.18) 式 } \int dT \left(\frac{1}{T - \theta} \right) = -\left(\frac{1}{\lambda}\right) \int d\tau$$

$$\text{上式之解為 } T - \theta = Ce^{-\left(\frac{\tau}{\lambda}\right)} \quad \dots\dots(2.19)$$

設 $\tau = 0, T = T_0$ 。並從（2.19）式得

$$\frac{(T/\theta)}{(T_0 - \theta)} = e^{-\frac{\tau}{\lambda}} \quad \dots\dots(2.20)$$

如果（2.20）式中 $\lambda = \tau$ 則

$$\frac{(T/\theta)}{(T_0 - \theta)} = \frac{1}{2.718} = 0.368$$

此即經過 λ 時間後，溫度差（ $T - \theta$ ）達到原先差值（ $T_0 - \theta$ ）的64%（即 e^{-1} ）。

假使已知 θ ，並且選一 T 。大於 θ 值，則溫度達到 T 值時的時間稱為落後係數 λ

將（2.20）式取自然對數則

$$\ln \left[\frac{(T/\theta)}{(T_0 - \theta)} \right] = -\frac{\tau}{\lambda} \quad \dots\dots(2.21)$$

傳統溫度計之落後係數較大，但對綜觀氣象來說已可滿足，對高空探空觀測則需採用反應較快之電溫度感應元件。

五、溫度計的校驗

爲使所量測的溫度能準確，所使用的溫度計必需定期校驗，現場（on-site）校驗可以使用一工作標準（working-standard）之溫度計來當標準。然而實驗室之校驗則需要一些設備，例如恆溫槽。自記溫度計每日應與最高最低溫度計做比較，至少每兩年應做一次實驗室之校驗，如果大修後也應送實驗室再進行校驗。金屬電阻溫度計應與標準儀器每年做比較，半導體之電阻溫度計由於隨使用年限的增加而非十分穩定，因此建議應每月與準確之溫度計做比較，當然做比較時必須考慮各種元件之落後係數。

六、結 論

爲使氣象觀測所量測之溫度具有代表性及其限制性，因此本文介紹了氣溫測量的原理及誤差來源。由於空氣是不良的熱導體，爲了避免輻射熱的影響，因此溫度計必需置於適當的環境，又爲使所量測之氣溫有代表性，因此也需選擇適當觀測的地點。氣象上常用來測量溫度之溫度計依感應原理及構造之不同可以區分爲(1)玻璃液體式溫度計(2)變形溫度計(3)金屬液體式溫度計(4)電力式溫度計。一般而言電力式溫度計之反應時間較快，所測量之溫度範圍較大且靈敏度較高，較被常用爲自動觀測儀之用。本文同時也分析了各種不同原理之溫度計之誤差來源及測量原理。當然爲了使所測量的溫度能準確，所使用之溫度計必需定期校驗，以保持測得之溫度能具有代表性。

七、參考文獻

- Brock, F. V., 1990: Atmospheric instrumentation workshop (Surface Observing Systems), March 1990, Taipei.
- Floyd, Major P. M., Jr., 1952 : The effect of natural shading on temperature measurements, *Weatherwise*, 5, 16-17.
- Meteorological Office, 1981: Handbook of meteorological instruments, Her Majesty's Stationery Office, London.
- Middleton, W. E. K., 1969: Invention of the Meteorological Instruments, The Johns Hopkins Press, Baltimore, Md., 362 pp.
- Monroe, M., 1981: For the amateur: An efficient low-cost instrument shelter, *Weatherwise*, 37, 174-177.
- Snow, J. T., and S. B. Harley, 1987: Basic meteorological observations for schools: Temperature, *Bull, Amer. Meteor. Soc.*, 68, 486-496.
- Sparks, W. R., 1972: The effect of thermometer screen design on the observed temperature. *World Meteorological Organization, WMO, NO. 315*, 106 pp.

STUDY ON PHYSICAL AIR TEMPERATURE MEASUREMENTS

Yeong-Junaq Wang
Central Weather Bureau

ABSTRACT

The measurement of air temperature near the surface of the earth is facilitated by the vast array of temperature sensors and supporting electronic modules that are readily available. Accuracy is limited not by technology but by our ability to use it and by our ability to provide adequate coupling with the atmosphere. Measurements of the thermofield in the atmosphere usually measure air temperature rather than heat. To accurately measure the true air temperature, two major problems must be solved: the time response and the radiation error of the temperature sensor.

This paper is to review errors of air temperature measurements and the physical principles of temperature measurements. We introduced some basic concepts in this paper and hope can be used as a reference for readers.