

編譯者前言

溫度是一項極為重要的物理參量，它與許多其他物理量有着十分密切的聯繫。近十年來科學技術突飛猛進的發展迫切要求在溫度測量方面解決兩項主要任務：提高各溫度範圍中測量精度和可靠性的問題；其次是擴大測溫的量程。

隨著科學技術的日益昌盛，某些物理量在進行精密測量時，要求環境溫度穩定在 $\pm 0.001^\circ$ 左右，因此，在國際實用溫標定點精度方面應具更高的水平。許多特殊材料都要求在甚高溫（ 2000°C 以上）和甚低溫下（ -253°C 以下）試驗其性能，進行所謂模擬式的環境試驗。目前得到最低的溫度是 1.10^{-6}°K 。高溫的上限實際上是無限制的，在地球上，達到最高溫度是氫彈爆炸時的溫度，約為 10^8K ，按分光鏡測定星的表面溫度約 10^{-3}°K ，科學推測星球系中溫度能達到 10^9 或更高。

在本小冊子中介紹了一些新型測溫儀器和方法，例如用客觀光譜高溫計、顏色高溫計、氬氣體溫度計，以及用照相法測溫等均是新的發展方向。

本書的第一章轉譯自 H. F. 斯蒂姆森 (H. F. Stimson) 所介紹的“1948 年國際實用溫標”的全文，這是 1960 年 10 月國際權度大會所通過的新修訂本，對 1948 年溫標的原文作了某些重要修改和補充。

本書的第二章基本上是以蘇聯門捷列夫計量科學研究院 (ВНИИМ) 高溫實驗室主任 А. Н. 哥爾特夫 (А. Н. Гордов) 等所著的“高溫測量法”為基礎編譯而成的。

第三章是按全蘇物理技術與無線電技術研究所 (ВНИИФТРИ)，蘇聯科學院通訊院士 П. Г. 斯特雷爾哥夫 (П. Г. Стрелков) 所寫的“低溫測量法”作全文翻譯的，文章中概述了數十年來低溫計量的發展過程和趨勢。

由於鉑電阻溫度計在精密測溫中的作用已日益明顯，故在第四章中介紹了英國國家物理實驗室著名科學家 C. B. 巴貝 (C. B. Barber) 所寫的“鉑電阻測溫學的進展”。文中總結了七十五年來電阻溫度計的發展全貌。

上述各篇的內容基本上是屬於方向性和總結性的論述，對計量工作者和從事有關專業的科研人員在探索溫度測量的發展動態方面將有所裨益。筆者由於水平有限在翻譯和匯集中一定有不少錯誤和不妥之處，希讀者不吝指正。

在編譯過程中承局領導的大力支持和鼓勵。我局薛祉鎬總工程師，對譯文審閱指正，戴樂山先生，閔仲求同志在編譯本書時給予了具體的幫助，在此謹誌謝意。

凌善康

一九六三、三、于國家科委計量局

目 录

編譯者前言

第一章 国际实用温标.....(1)

第二章 高温测量法.....(11)

§ 2-1 輻射高温测量法.....(11)

§ 2-2 光学高温测量法.....(15)

§ 2-3 顏色高温测量法.....(22)

§ 2-4 热电偶.....(28)

第三章 低温测量法.....(43)

§ 3-1 引 言.....(43)

§ 3-2 国际温标的延伸.....(44)

§ 3-3 低温温标的下部分.....(49)

§ 3-4 氢冷却与氮冷却之間的范围, 液氮范围.....(50)

§ 3-5 超低温与某些特殊問題.....(51)

第四章 鉑电阻测温学.....(54)

§ 4-1 鉑电阻测温学的进展.....(54)

§ 4-2 用鉑电阻溫度計測量 $0^{\circ}\sim-200^{\circ}\text{C}$ 之間的温度.....(66)

附表 1.....(72)

附表 2.....(78)

附表 3.....(87)

附表 4.....(93)

附表 5.....(101)

附表 6.....(116)



第一章 1948年國際實用溫標^{*})

“1948年國際實用溫標”是1960年10月第十一屆國際權度大會所通過的國際協定性溫標，下面是根據英文版轉譯的全文。

1. 引言

開耳芬熱力學溫標是一個公認的基本溫標，所有的溫度測量最終都應該以它為依據。在這一溫標上溫度的符號是 T ，用 $^{\circ}\text{K}$ 標誌其單位。經會議決定（1954年第十屆國際權度大會決議N33），開耳芬溫標每度大小的規定是根據把水三相點的熱力學溫度準確地等於 273.16°K 而實現的。

由於用熱力學溫標測量溫度存在着實驗上的困難，因此，在1927年第七屆國際權度大會上採納了一種以“國際溫標”命名的實用溫標。此溫標能既方便而又準確地得到復現，同時，根據當時的情況，使之盡可能与熱力學溫標相一致。

1948年曾對國際溫標進行了修訂，使它和當時的科學技術知識水平相一致。

1960年5月，國際權度委員會批准了對原文件所規定的新名稱，即“1948年國際實用溫標”由於這一溫標上的溫度的具體數值與1948年中的相同，因此，這一溫標不是1948年溫標的修訂，而僅是1948年原文的修訂。

2. 1948年國際實用溫標的定義

1948年國際實用溫標上的溫度用攝氏度表示，以 $^{\circ}\text{C}$ 或 $^{\circ}\text{C}(\text{Int.1948})$ 標誌，同時，並以符號 t 或 t_{Int} 表示國際實用溫標上的溫度。

國際實用溫標是建立在六個給定數值并可復現的溫度（規定固定點） mm ，以及在六個規定固定點的給定溫度值上進行分度的儀器示值與溫度之間的关系式的基础上的。規定固定點是用特定的平衡狀態來實現的，除水三相點以外，其他點都是在1013250達因/厘米²的一個標準大氣壓下確定的。

溫標的固定點及其給定的準確值列在表1中。

按不同的內插方法，把溫標分成四部份。

(1) 由 0°C —— 630.5°C （銻點），溫度 t 用下式規定

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2),$$

式中， R_t 是標準電阻溫度計的鉑絲電阻線圈在溫度 t 時的電阻值， R_0 是在 0°C 時的電阻值。由水三相點，水沸點和硫點（或銻點）時的 R_t 值求得常值 R_0 ， A 及 B 。

本文譯自 H. F. 斯蒂爾森 J. R. NBS 3 65A, 139(1961)

規定固定点

表1.

每一規定固定点的准确值，除水三相点以外，其他各点都是在一个标准大气压的压强条件下給定的。

	溫度°C (Int. 1948)
液态氧和它的蒸汽之間的平衡溫度 (氧点)	-182.97
冰、液态水和水蒸汽之間的平衡溫度 (水三相点)	+0.01
液态水 and 它的蒸汽之間的平衡溫度 (水沸点)	100
液态硫和它的蒸汽之間的平衡溫度 (硫点)	444.6*
固态銀和液态銀之間的平衡溫度 (銀点)	960.8
固态金和液态金之間的平衡溫度 (金点)	1063

*建議用固态鋅和液态鋅之間的平衡溫度 (鋅点) 代替硫点，鋅点的溫度值是419.505°C (Int. 1948)，鋅点的复現性比硫点好。鋅点的給定值是这样选定的，由它所得出的在国际实用温标上的溫度值与使用硫点所得的結果相同。

准标电阻溫度計的感溫鉑絲必須退火，純度的要求应使 R_{100}/R_0 不小于1.3920。

(2) 由氧点——0°C，溫度 t 用下式規定

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - t_{100})t^3],$$

式中， R_0 ， A 及 B 是用和上面(1)中的相同方法确定的，常值 C 是由在氧点时的 R_t 来确定的，并且 $t_{100} = 100^\circ\text{C}$ 。

(3) 由630.5°C——金点，溫度 t 用下式規定

$$E = a + bt + ct^2,$$

式中， E 是标准鉑銻-鉑热电偶*的一端处于0°C，而另一端处于溫度 t 时的热电势。常值 a ， b 和 c 是由在630.5°C，銀点及金点时的 E 值来确定的。在測定630.5°C时的热电势值时，應該用标准电阻溫度計測定这一溫度值。

标准热电偶的金属絲必须是經過退火的，鉑絲的純度要求应使比值 R_{100}/R_0 不小于1.3920。鉑銻絲的标称重量比應該是90%鉑+10%銻。当热电偶的一端处于0°C，而另一端依次地处于630.5°C，銀点和金点时，制成的热电偶应该具有下列的热电势值：

$$E_{Au} = 10300 \text{ 微伏} \pm 50 \text{ 微伏},$$

$$E_{Au} - E_{Ag} = 1183 \text{ 微伏} + 0.158(E_{Au} - 10300 \text{ 微伏}) \pm 4 \text{ 微伏},$$

$$E_{Au} - E_{630.5} = 4766 \text{ 微伏} + 0.631(E_{Au} - 10300 \text{ 微伏}) \pm 8 \text{ 微伏}.$$

$$\frac{J_t}{J_{Au}} = \frac{\exp \left[\frac{C_2}{\lambda(t_{Au} + T_0)} \right] - 1}{\exp \left[\frac{C_2}{\lambda(t + T_0)} \right] - 1},$$

式中， J_t 及 J_{Au} 分別是在溫度 t 和金点时，黑体在单位面积和单位立体角中，单位時間內所輻射的在波长 λ 处的单位波长間隔內的輻射能量*， C_2 是第二輻射常数，它的值是0.01438米一度， λ 的单位是米，而 $T_0 = 273.15$ 度。

3. 建議

下面的建議是參考性的，不具有約束性。所推荐的仪器，方法，及操作程序在現代水

* 热电偶一詞在科学研究中亦有称温差电偶的——譯者

* 有时称为單色輻射强度——譯者

平上來說都是最实用的,但不因就此而妨碍它們在应用方面的改进、提高和进一步发展。經驗表明,这些建議,有利于实现第2节中所规定的国际实用温标的統一性和复現性。

§ 1—3—1 标准电阻温度计

标准电阻温度计的设计与结构应该符合下面的要求,感温铂絲要尽可能处在无应力状态,同时,在連續使用过程中也能保持无应力状态。铂絲应该从熔錠中而不是从海绵状的铂鍛块拉制而成。

可以用0.05—0.5毫米直径的铂絲制造标准电阻温度计,每一引綫上至少在靠近感温綫圈处有一短綫段是铂絲。

温度计的感温电阻綫圈制成后,应该在空气中退火,退火温度应当高于最高使用温度,但决不能低于450°C。而且,有理由相信,在制成的电阻保护套管中充以少量氧气,能得到更好的稳定性。

判定制成的温度计的内部结构是否良好,以及在固定点上分度时是否有錯誤的有效准则是常值B应为 $(-0.5857 \pm 0.0010) \times 10^{-5}/\text{度}^2$,和常值C为 $(-4.35 \pm 0.05) \times 10^{-12}/\text{度}^4$ 。另一个用来判定退火效果和温度计的可靠性是否合适的判据是:温度计在某一参考温度上的阻值的恆定不变。例如,温度计经历了几次温度变化之后——为了分度所必須經歷的,温度计在水三相点上的阻值不应该有相当于0.001度的阻值变化。

3.2 标准热电偶

标准热电偶是用直径0.35—0.65毫米的金属絲做成的。

分度以前,热电偶絲必須仔細地进行退火,保証热电势值在使用过程中是恆定的。为此,铂絲的退火温度至少是1100°C,铂铑絲應該是1450°C。假使在热电偶絲装入它們的絕緣套管以前进行退火,那末,作成热电偶之后,一定要再加热到至少达1100°C的温度直到热电势值稳定,以及由应变所产生的局部不均匀性已經消失为止。当热电偶經過完善的退火处理之后,它的指示值应该与金属絲上的温度梯度的变化无关,例如,改变热电偶在温度均匀一致的区域中的插入深度时,指示值不应当有所改变。

热电偶在630.5°C时的热电势值,应当由在630.3°C—630.7°C之間的某一个均匀、恆定的温度上測得的热电势值来确定。

3.3 压 强

在实用上,压强是用汞柱来測定的。当汞柱同一个大气压成平衡时,純汞的平均密度,在20°C时,可以采用13545.87公斤/米³的数值。国际权度委员会建議,在沒有批准使用其他系統制以前,在标准大气压的实际測定中应该用波茨坦制来表示当地的重力加速度值。

在下面氧点,水沸点和硫点,的几节中,用 $(p/p_0 - 1)$ 的多項式表示平衡温度 t_p ,这里的 p 是平衡压强, p_0 是1个标准大气压。同时也給出了在一定的压强范围内 t_p 的准确度。在实际工作中,对于通大气的平衡系統,应用这些公式所产生的誤差,小于系統本身的不稳定性所产生的誤差。在压强值維持在同大气压相差千分之几的封閉系統中,可以得到更好的稳定性,同时提高了准确度。这时,仅需用多項式中 $(p/p_0 - 1)$ 的一次

項計算即可。

3.4 溫標的零點和水三相點

(1) 溫標的零點

國際實用溫標的零點是規定為比水三相點正好低0.01度的溫度。計算表明，以前的“冰點”溫度——就是在1個標準大氣壓下，冰和為空氣所飽和的水之間的平衡溫度——是0°C，誤差在0.0001度以內。

然而，直接測定冰點而具有高於 ± 0.001 度的準確度是困難的；當這樣的準確度滿足要求時，可以用下面的方法得到0°C的溫度，在一個絕熱性能良好的容器中，例如在杜瓦瓶中，放入很碎的冰和為空氣所飽和的水的混合物。這樣，在水表面下的深度 h 處，與室內大氣壓為 p 時相對應的平衡溫度 t 可以用下式算得：

$$t = 0.01(1 - p/p_0)^\circ\text{C} - (0.7 \times 10^{-6} \text{度/毫米}) h。$$

(2) 水三相點

水三相點是用裝有高純度水的封閉的玻璃三相點瓶來實現的。瓶的中央有一個為放置溫度計的軸向插入管。在這些三相點瓶中，當冰和液——汽相成平衡時，就得到三相點溫度。在液——汽相表面下的深度 h 處，冰和液態水的平衡溫度由下式規定

$$t = 0.01^\circ\text{C} - (0.7 \times 10^{-6} \text{度/毫米}) h。$$

製備三相點瓶時，所推薦的方法是：首先，從內部冷卻，使管的四周結成一層厚的冰罩。然後，再從內部融化這個冰罩，融去足夠厚的一層，使靠近管壁部份產生一層新的水——冰界面。在製備好實用的三相點瓶以後，在插入管中測量其溫度，發現有約為0.0001—0.0005度的上升，大約經過1—3天之後，溫度才達到恆定值。這一初期的變化，可以解釋為由於冰的晶粒增長，或是由於晶粒中的應變的緩慢消失所致。用這一方法製備三相點瓶，並把它放在冰槽中，能在幾月中維持其溫度在0.0001度以內。對於不同來源的三相點瓶，在相同條件下進行了比較，已有報導指出，彼此之間的偏差不大於0.0002度。

極大多數的天然水（普通水）中所含的氘， 0^{18} 和 0^{17} 的克分子百分數分別約為0.0148，0.20，和0.04。曾經發現，天然水中的氘含量的變化可以比標準量相差0.0015克分子百分數。水的氘含量增加0.001克分子百分數時，將使三相點溫度增加0.00004度。起源於山脈陰面或永久冰河下面的河流中的水，它的含氘量可能比標準量少，而在大湖面上的水的氘含量可能比標準量多。

三相點瓶中的水——冰界面上的同位素成份取決於氧同位素的配合比的天然差異；也取決於水的蒸餾方法和凝固程序。這些不同的同位素成份，對三相點瓶的溫度值的影響可能是小到可以忽略的程度。

3.5 氧 點

一般用靜態法來實現液態氧和它的蒸汽之間的平衡溫度。把標準溫度計的感溫鉑絲

繞圈和液囊內的液氧放在使其具有同樣溫度的金屬塊中，當然金屬塊應放在一個合適的低溫恆溫槽中。一般是把金屬塊浸在同大氣相通、均勻攪拌的液氧槽中。但為了得到更好的穩定性，則將金屬塊封閉在一個能保持在近於氧點的均勻溫度的真空容器內。氧的蒸汽壓是通過一根引導管傳向壓差計的。整根引導管上的溫度必須高於氧的飽和溫度。

判斷平衡溫度是否實現的準則是，在氧的自由表面上的壓強校正到某一常值時，所觀察到的溫度應與下列幾點無關：溫度計在金屬塊中的浸入深度的微小變動；液氧的體積與其蒸汽體積之比；及容器溫度的微小變化。

對應於液態氧的表面上的壓強為 p 時的平衡溫度 t_p 可以用下式求得，在 $p=660-860$ 毫米汞高的壓強範圍中，準確度達千分之幾度。

$$t_p = [-182.97 + 9.530(p/p_0 - 1) - 3.72(p/p_0 - 1)^2 + 2.2(p/p_0 - 1)^3]^\circ\text{C}$$

3.6 水 沸 點

一般用動態法來實現液態水和它的蒸汽之間的平衡溫度，溫度計放在飽和蒸汽中。從前是使用同大氣相通的系統來得到水沸點，但是在精密分度時，使用閉合系統更好，這時，沸點器和壓差計同一個充有空氣的恆壓器連接，充氮則更好。

在制作沸點器時，應當考慮到避免蒸汽對它可能產生的任何沾污。溫度計必須加以屏蔽，以防止從不同於飽和蒸汽溫度的物體上來的熱輻射影響。

獲得平衡溫度的判據是：經過校正到某一常壓時的溫度觀測值，應該與下面的因素無關：所用的水的種類，經歷的時間，輸入液態水中的熱量變化，以及溫度計的不同浸入深度。

對應壓強為 p 時的平衡溫度 t_p 可以用下式求得，在 $p=660-860$ 毫米汞柱的壓強範圍中，準確度在 0.001 度以內，

$$t_p = [100 + 28.012(p/p_0 - 1) - 11.64(p/p_0 - 1)^2 + 9.1(p/p_0 - 1)^3]^\circ\text{C}.$$

由水的氘含量的改變所引起的沸點溫度的改變，大約是它對三相點所引起的變化的三分之一，而且，具有相同的變化方向。

3.7 硫 點

液態硫和它的蒸汽之間的平衡溫度常用動態法在鋁沸點器皿中來實現的，鋁沸點器的形狀同水沸點器相似。但是，在這一沸點器中對輻射作了更完善的屏蔽，同時，需要更大的蒸汽自由環流空間。

已有報導指示：在硫中加入 0.1% 砷後再加入 0.1% 硒，它的正常沸點在升高 0.02 度之後還升高 0.07 度。由火山噴射產物所得到的硫就有這些元素。商用硫含有有機雜質，當其被煮沸時，它們進行緩慢的分解，遺留下碳。或許，碳對硫的沸點沒有什麼可以觀測到的影響，但是，還是除去有機物質和碳比較好一些。

獲得硫點的判據是同獲得水沸點時的相同，但是，它達到平衡溫度須費很多小時。

對應壓強為 p 時的平衡溫度 t_p 可以用下式求得，在 $p=660-800$ 毫米汞柱的壓強範圍中，準確度約為 0.001 度，

$$t_p = [444.6 + 69.010(p/p_0 - 1) - 27.48(p/p_0 - 1)^2 + 19.14(p/p_0 - 1)^3]^\circ\text{C}.$$

3.8 鋅 点

現在已經得到同合金的液化曲線上的溫度緊密有關的，具有高復現性的溫度，例如高純度鋅（重量百分數為99.999）緩慢冷卻曲線上的坪溫度。

鋅的熔融和凝固，一般是在備有插入溫度計的軸向套管的放在井式爐內的高純度人造石墨（重量百分數是99.999）坩堝內進行的。坩堝的直徑約為5厘米，並有足夠的深度以消除沿溫度計引線的熱傳導效應。

當冷卻已經開始，並且在坩堝壁上開始有固體形成時，應當移出溫度計，使它冷卻到室溫，然後重新插入，使在套管外部形成一層薄的固態鋅。曾經使用過的另一種方法是，當溫度計的溫度示值比凝固點低0.01度時，移出溫度計，插入一根石英棒，歷時約30秒，然後再把溫度計插入套管中。當坩堝中的鋅由外向內逐漸緩慢凝固時，液態鋅和套管外固態鋅層之間的平衡溫度就是坪溫度。熔融鋅最好是在惰性氣體內進行，以防止石墨和鋅的氧化，但是，即使在空氣中經長時間加熱後，鋅的熔體內所含有的氧化鋅對於坪溫度也未發現有什麼影響。已經發現，壓力每增加1個大氣壓時，坪溫度將增加0.0043度。

樣品純度是否符合要求的判據是樣品的溶解溫度範圍應當不大於約0.001度。不同國家生產的這種高純度鋅樣品的坪溫度是相差極微的（在0.0002度以內）。溶解範圍約達0.01度樣品的坪溫度將偏低0.0004—0.0016度。

3.9 銀 點 和 金 點

固態銀和液態銀，或固態金和液態金之間的平衡溫度是在有蓋坩堝中實現的，坩堝的料料，可以是高純度的人造石墨，陶瓷或透明石英。由於金屬在熔解時的膨脹量較大，坩堝的大小應該給金屬膨脹留有余地。同時，坩堝要有足夠的深度以消除沿熱電偶絲的熱傳導效應。熔融銀時，一定要防止它和氧氣接觸。

應當在坩堝和其中金屬達到比金屬熔點高幾度的某一均勻溫度之後，使它緩慢冷卻。然後把熱電偶插入已熔融的金屬中，使金屬凝固。熱電偶是裝在瓷質，或其他合適材料做成的保護套管中，二根熱電偶絲是用絕緣材料分隔開的。

平衡溫度是否實現的準則是：在相繼的凝固過程中，使用略微不同的插入深度，熱電偶的電動勢不應有所改變，同時，在各次凝固過程中，應當至少有長達5分鐘的時間間隔，保持熱電勢值恆定。

對於1063°C以上的溫標範圍，使用普朗克輻射公式，這時，應該對金點的坩堝加以改進，使它具有處於金的凝固溫度的黑體空腔。

4. 補 充 資 料

4.1 電阻——溫度公式

在0—630.5°C的溫度範圍中，在溫標的規定中（第2(i)節），內插公式是：

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2),$$

可以写成克林达尔形式,

$$t = \frac{1}{\alpha} (R_t/R_0 - 1) + \delta(t/t_{100} - 1)t/t_{100},$$

式中

$$\alpha = \frac{1}{t_{100}} (R_{100}/R_0 + 1), \text{ 及 } t_{100} = 100^\circ\text{C}.$$

系数之间的关系是

$$A = \alpha \left(1 + \frac{\delta}{t_{100}} \right), \quad a = A + Bt_{100},$$

$$B = -\frac{\alpha\delta}{t_{100}^2}, \quad \delta = -\frac{Bt_{100}^2}{A + Bt_{100}}.$$

在 0°C — 氧点的温度范围内, 在温标的规定中 (第 2 (ii) 节), 内插公式是:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - t_{100})t^3],$$

可以写成克林达尔—范杜森形式

$$t = \left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) + \delta \left(\frac{t}{t_{100}} - 1 \right) \frac{t}{t_{100}} + \beta \left(\frac{t}{t_{100}} - 1 \right) \left(\frac{t}{t_{100}} \right)^3 \right] ^\circ\text{C}.$$

系数 A, B, 和 α, δ 之间的关系是和上面的相同, 此外, 尚有下列的关系式

$$C = -\frac{\alpha\beta}{t_{100}^4}, \quad \beta = -\frac{Ct_{100}^4}{A + Bt_{100}}.$$

4.2 次级参考点

除了在表 1 中列出的温标的规定固定点以外, 还有一些其他固定点可以作为参考之用。其中一些和它们在 1948 年国际实用温标上报导的温度值, 列在表 2 中。除三相点以外, 每一个温度都是在 1 个标准大气压下的热平衡系统中实现的。压力和温度的关系式, 只能在 $p = 680 - 780$ 毫米汞柱的压力范围内使用。

4.3 国际实用温标和热力学温标之间的关系

1927 年采纳的“国际温标”, 它是根据当时的知识水平, 尽可能和热力学温标相接近的一种温标。然而, 当时就指出, 进一步的研究将增加我们对这两个温标上温度差值的知识。在需要知道热力学温标上的温度值时, 一般的步骤是先得到在国际实用温标上的温度值, 然后再加上两温标之间的相应差值, 使它转换到热力学温标。然而, 这些差值是由实验测定的。由于这些差值与它们的开耳芬温度相比是很小的, 很难准确地测定。为了表明现在我们对这两个温标之间符合程度的了解程度, 下面列出了在温标各部份上所得到的差值。

由于这些差值的不准确性, 宁可不动国际实用温标上的温度值, 而进一步增进我们对二个温标之间的差值的知识, 这种做法似乎比较妥当。在必要时, 尽可能改进国际温标上的温度测量方法, 而不必在温度值上作任何重大的改变。这一措施将避免由于频繁改变温度值而引起的混乱。

次 級 参 考 点

表2.

除水的三相点以外, 都是在一个标准大气压下确定的。	溫度°C(Int. 1948)
固态二氧化碳和它的蒸汽之間的平衡溫度	-78.5
$t_p = \left[-78.5 + 12.12 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 6.4 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 \right] ^\circ\text{C}$	
固态汞和液态汞之間的平衡溫度	-38.87
冰和为空气所饱和的水之間的平衡溫度	0.000
苯氧基苯(二苯醚)的三相点溫度	26.88
10份结晶水的硫酸鈉的轉变溫度	32.38
苯甲酸的三相点溫度	122.36
固态鋁和液态鋁之間的平衡溫度	156.61
液态萘和它的蒸汽之間的平衡溫度	218.0
$t_p = \left[218.0 + 44.4 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 19 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 \right] ^\circ\text{C}$	
因态錫和液态錫之間的平衡溫度	231.91
液态二苯甲酮和它的蒸汽之間的平衡溫度	305.9
$t_p = \left[305.9 + 48.8 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 21 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 \right] ^\circ\text{C}$	
固态錫和液态錫之間的平衡溫度	321.03
固态鉛和液态鉛之間的平衡溫度	327.3
汞和它的蒸汽之間的平衡溫度	356.58
$t_p = \left[356.58 + 55.552 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 23.03 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 14.0 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] ^\circ\text{C}$	
固态鋁和液态鋁之間的平衡溫度	660.1
固态銅和液态銅之間的平衡溫度(在还原性气体中)	1083
固态鎳和液态鎳之間的平衡溫度	1453
固态鈷和液态鈷之間的平衡溫度	1492
固态鈮和液态鈮之間的平衡溫度	1552
固态鉑和液态鉑之間的平衡溫度	1769
固态銻和液态銻之間的平衡溫度	1960
固态铋和液态铋之間的平衡溫度	2443
鎢的熔解溫度	3380

1939年, 麻省理工学院报导了两个氮气体溫度計和标准电阻溫度計之間进行相互比較的結果, 溫度范围是0°C——硫点。所得的热力学摄氏溫度 t_{th} (1954年規定的) 与溫度 t_{int} (1948年溫标) 之間的差值可用下式表出

$$t_{th} - t_{int} = \frac{t}{t_{100}} \left[-0.0060 + \left(\frac{t}{t_{100}} - 1 \right) 10.04106 - 7.363 \times 10^{-5} \text{度}^{-1} t \right] \text{度}.$$

这一关系式給出的水沸点是99.994°C(therm.)及硫点是444.70°C(therm.)。两个气体溫度計在水沸点及硫点所得的差值, 分别是0.005度及0.05度。1958年, 德国联邦物理技术研究所报导的硫点值是444.66°C(therm.)。

在1932年和1935年, 德国物理技术研究所和萊頓大学报导了在氧点到0°C的溫度范围内的研究工作, 所得的一系列数据表明, 在約-80°C处, 差值 $t_{th} - t_{int}$ 有-約为+0.04

度的极大值。在 -100°C 以下报导的差值中，有些是具有相反的符号。这些差值的大小是同气体温度计的测量结果所具有的不准确性属于同一个数量级。四个实验室自1927年以来所报导的氧点值，现在已经用 $T_0 = 273.15^{\circ}\text{K}$ (1954年采用值) 为标准，进行了新的计算。这些数值是：德国物理技术研究所 (1932年) 的为 90.191°K ，日本仙台市，东北帝国大学 (1935年) 的是 90.17°K ，来顿大学 (1940年) 的是 90.160°K ，以及宾夕法尼亚州立大学 (1953年) 的是 90.150°K 。各四个结果的平均值是 90.168°K ，或 -182.982°C (therm.)。⁴

国际实用温标对氧点以下的温标未加规定。

最近几年中，德国及日本对 1000°C 附近的银点和金点的热力学温度作了新的测量。德国联邦物理技术研究所得到的银点和金点分别是 962.10°C (therm.) 和 1064.76°C (therm.)。东京工业学院 (1958年) 对银点和金点的结果分别是 961.20°C (therm.) 和 1063.73°C (therm.)；这二个最新值和它们在1956年报导的结果，即 961.28°C (therm.) 及 1063.69°C (therm.) 相差甚小。

金点以上，使用普朗克辐射公式。普朗克公式是与热力学温标一致的，因此只须知道金点的开耳芬温度和第二辐射常数 C_2 的准确值，它就给出开耳芬温度的真值。

表3.

国际实用温标	
摄氏	绝对
名 称	
国际实用温度	国际实用开氏温度
符 号	
t_{int}	$T_{\text{int}} = t_{\text{int}} + T_0$
标 志	
$^{\circ}\text{C}$ (Int. 1948)	$^{\circ}\text{K}$ (Int. 1949)
1948年国际实用温标摄氏度	1948年国际实用温标开氏度
热力学温标	
摄氏	绝对
名 称	
热力学摄氏温度	热力学开氏温度
符 号	
$t = T - T_0$	T
标 志	
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{K}$
热力学摄氏度	开 氏 度
($T_0 = 273.15$ 度)	

註：如果在不发生误会的情况下，国际实用温度 t 下的指标“int.”可以省略。

1955年，加利福尼亚理工学院公布的原子常数数据的方差分析结果，得出 C_2 值是 $0.0143888 \text{米}^{-1} \cdot \text{度}$ 。1957年，霍布金大学公布的相同的分析，得出的 C_2 值是 $0.0143886 \text{米}^{-1} \cdot \text{度}$ 。

上面所定义的国际实用摄氏温度加上 $T_0 = 273.15 \text{度}$ 之后，就可得到国际实用开氏温度。热力学开氏温度减去 T_0 后，即得热力学摄氏温度。表 3 给出了建议使用的各种标记，箭头是由所定义的温度指向改变起点所得到的温度。

戴乐山、凌善康译

第二章 高温测量法

§2—1 辐射高温测量法^{*})

辐射高温测量法是通过测量物体总的（全部光谱波长）热辐射来测定物体温度的。它在理论上可用于测量全部自然界所能遇到的温度。

在工业中特别感兴趣的是如何将辐射高温测量法用于测量不太高的温度。用这类方法能够测量运动的或旋转物体的温度。其他利用物体可见辐射的非接触测量法，在这种情况下就无法应用了。

可是，在实际中，应用这类方法来测量不太高的温度（约20°C）却遇到了很大的困难。所以它主要还是广泛应用在高温测量中。

目前关于利用这方法来测量不太高温度的问题，解决得还较顺利，并且已设计出相应的仪器（其中一种称为“基拉”（ТЕРА）型，见后介绍）。

辐射高温测量法的制定和实际应用比现有的其他测量物体温度的非接触法为早，由于仪器的简便，读数的客观性，又能连续记录同时又具有较高的测量精度，所有这些都促使辐射高温计，在冶金工业，玻璃工业，煤焦化学工业和其他现代工业中得到广泛的应用。

所有的辐射高温计，众所周知，由三个基本部分所组成的：接受对象热辐射作用的热接受器；聚集射线于接受器上的装置（目的在于提高全部仪器的灵敏度）以及用某种方法来测量热接受器温度的测量装置。

前两部分结构上是连在一起的，组成高温计的一部分，普通称之为望远镜。

热接受器温度的确定不仅决定于吸收了物体的辐射，同时还决定于热接受器与高温计周围壳体零件间的辐射热交换以及由热接受器引至壳体的导线的热传导所损失的热量。

由热接受器至壳体的传热同样还以对流热交换的形式通过受热片周围的空气来进行的。

这样，辐射高温计示值就与对象热辐射功率之间有一固定的关系式。由于各种对象的黑度不同，所以，在同一真实温度下，具有不同辐射功率。因此为了统一辐射高温计的测量结果，人们应用了所谓“辐射温度”的概念。由辐射温度 T_R 转换到真实温度 T ，可用每个具体对象所具有的全辐射黑度系数 ε ，按下式计算：

$$T = T_R \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}$$

^{*}) 译自 А. Н. Гордов, И. И. Киренков и дру. “Методы измерения высоких температур”
Гос изд, СТАН. 1960. 以下第二、三、四章均译自同书。

因为 $0 < \epsilon < 1$, 所以 $T_K < T$

輻射高溫計并不复杂, 但非常严密的理論, 詳述于李巴 (Рибо) [1] 的名著中。

弗利 (Ферри) 型輻射高溫計是首批得到广泛使用的一种, 其中輻射在热接受器上聚焦是借助于鍍金的凹鏡实现的, 而热接受片的溫度测量是靠貼于其上的热电堆来实现的。弗利型高溫計有各种不同形式, 其中一种是不使用热电堆而用双金属片的。

在苏联, 弗利型輻射高溫計在实践中已不使用了。在国外所生产的只是一种“剑桥”型的用于测量 600° 到 1700°C 溫度范围内的輻射高溫計。

在較新的结构中, 反射式輻射高溫計中的凹鏡已用对准物体的透鏡代替了。从20年代开始这种型式中最流行的是“西門子”公司制造的“阿耳多米脫尔” (арлометр) 輻射高溫計, 在这种高溫計中有直径为30毫米的玻璃物鏡。带热电堆的热接受片放于小玻璃容器中, 其中充惰性气体或抽成真空, 这仪器的詳細敘述及其基本誤差的研究可参閱庫立波斯 (Кульбуш. Г. П.) 所著的书 [3]。

在苏联直到1956年才成批生产輻射高溫計, 其中得到广泛使用的有类似于“阿耳多米脫尔”型的 РП 型輻射高溫計 [4, 5], 这些仪器用于测量 900° ~ 1800°C 的溫度范围。

РП 型仪器的主要缺点是: 示值与輻射表面尺寸以及仪器壳体溫度的关系很大, 为了补偿这些影响, 在仪器的壳体中与热电堆并联一个由銅綫分路。其电阻值这样計算: 即在壳体溫度升高时, 四个焊接点的鍍层—考銅 (X-K) 热电堆分路电阻就减小, 这样会引起热电势的上升, 其大小正好等于由于热电堆自由端受热而失去的热电势。

可見, 这种补偿办法在实际中很难达到完善的地步, 因为很难保証銅綫分路的溫度与热电堆自由端的溫度相等, 因此会产生附加誤差。除此以外, 壳体溫度的变化引起仪器示值的变化, 因为热电堆自由端溫度的变化会破坏壳体与热接受片之間的热交换 (輻射的方式和热传导的方式), 因而热接受片的溫度变成了另一种溫度。

在全苏計量研究院 (ВНИИМ) 和哈立可夫国家量具与仪器研究院 (ХГИМИП) 中的研究結果表明: РП 型輻射高溫計示值的复現性可以表征为: 在全部被測溫度的工作量程中不小于 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

РП 型輻射高溫計有一个最大缺陷, 就是具有較大的時間常数, 仪器达到偏离稳态示值 1 % 所需的時間間隔是 11—15 秒, 这样大的仪器惰性不可能在快速变溫过程中作溫度記錄之用。

目前 РП 型的成批生产已經停止, 而在生产更为完善的仪器。

“拉基奧馬基克” (Радиоматик) 高溫計比“阿耳多米脫尔”型和 РП 高溫計具有更多的优点, 这是美国“勃拉翁” [Браун] 公司于1941年首次生产的高溫計, 在“радиоматик”現代型式中裝有10对热电偶組成的功率热电堆, 很精微的热接受片和小直径的热电极, 就显著降低了仪器的時間常数, 2 秒內示值的偏差 (不足) 为 2 %。

各种类型高溫計上裝有可更換的不同的物鏡用于被測溫度的不同范围, 这些物鏡是由派来克司玻璃或由光学熔融石英或由氟化鈣制成的。

派来克司玻璃透过的光譜范是围 0.3 至 3.7 微米, 光学石英是 0.3 至 3.8 微米, 氟化鈣是 0.3 至 10 微米。

高溫計物鏡材料的這些差別使得它能夠測量由 400° 到 4000°C 範圍內的溫度。

降低儀器使用的溫度範圍，不僅受到氟化鈣物鏡使用的限制，同時還需要具備高灵敏度的熱電堆。可是在測量約低於 $400-500^{\circ}\text{C}$ 的溫度時，各種儀器誤差來源的影響，首先是儀器壳体溫度波動的影響就會增加。“радиоматик”的溫度補償原理與РП型高溫計一樣，差別僅在於前者所用的分路是鍍導線制成的，按我們的意見，這不可能提高測量精度。

各種類型輻射高溫計的主要特性菲爾泊脫 (Philpot) 的文章中(6)作了評述。蘇聯的儀器製造工業目前正在成批生產“ТЕРА”型輻射高溫計的幾種類型，所包括的溫度量程是 100° 至 4000°C ，這種類型的高溫計在結構上近似於“радиоматик”。

戰後年代中輻射高溫計在製造方面基本上有三個方向：用降低儀器結構誤差的方法提高測量精度；進一步擴大測溫的下限和減小儀器的時間常數。第二個方向與第一個緊密相關，因為用輻射高溫計測量較低溫度只有在十分小的儀器結構誤差的情況下才有可能。

摩仲和達愛爾 (Mozon & Dyer) [7] 在他們設計的儀器中加了一個附件，實際上完全消除了最主要的誤差來源之一即儀器壳体溫度波動的影響。在儀器的壳体中（望遠鏡中）裝入一加熱器和電阻溫度計。控制壳體的加熱狀況是靠電阻溫度計作用的調節器來實現的，壳体內的溫度保持 52°C ，其波動是由調節器不灵敏區的大小來決定的，利用這樣附件有可能足夠精密地測定 40 至 200°C 範圍內的輻射溫度。

這種消除望遠鏡溫度波動影響的方法儘管是很有效的，但在工業中使用尚感不便，因為它要求附加裝置如調節器、電源等。

法絲蒂 (Fastie) [8] 介紹了一種輻射高溫計，其示值與壳体溫度無關，這一點引起了實驗者的重視，法絲蒂研究了熱接受片與高溫計壳体之間的热交換，並得出這樣一個結論：由片向壳體的傳熱是由于導線的热傳導而產生的。所以，壳体溫度的改變就引起了沿導線方向熱量的變化，因此，產生一種想法，如果導線(熱電偶的電極)是由這樣一種金屬或合金制成的，其熱傳導能隨溫度提高而下降，這樣就能達到在壳体溫度變化時由片到壳體的热流將恆定不變。法絲蒂認為，只要適當地選擇導線材料和改變它們的直徑，就可以達到完全消除壳体溫度波動的影響。為了使導線具有較大的柔性，他建議熱傳導負溫度系數的導線（例如鎳）與正系數的導線（鎳鉻、康銅）配合使用。

但是，在這種情況下，利用導線參數的計算數據未必能達到較大的補償精度，因為在熱接受片與壳体之間輻射和对流的热交換不能認為小到可以忽略不計。最終的補償還是應該通過實驗選擇來達到。

“比拉基涅” (пиррадио) 高溫計中同樣也考慮了對壳体溫度波動影響的自動補償裝置，這種儀器“加爾脫曼和勃拉翁” (гартман браун) [3] 公司用了廿年的時間才製造出來。此裝置由裝在壳体內雙金屬片所組成，在雙金屬片的端部裝有鑷狀光闌。在壳体溫度變化時，雙金屬片改變本身的撓度，而光闌則改變物鏡射出并射向熱接受器的。輻射束的截面這種補償方法不能認為是十分完善的，因為它不可能保證所必要的精度。

在克萊因 (Klein) [9] 所介紹的新穎結構的輻射高溫計中採用了雙金屬片作為接受

器，这种仪器是以石英管作为由炉子到仪器間射綫传导之用，管的一端插入炉內。管有两个直角弯曲由于在石英中內部的全反射，以相应改变方向。

在泊奥尔 (Pohl) [10] 的輻射高温計中热接受器的作用是基于双金属片的原理，在此仪器中热接受器是由任一种聚合物 (例如尼隆) 双层片所組成，一层取自具有杂乱分子方向普通加工的聚合物，第二层由預先經過机械加力器加工过的，并使之具有一个固定方向的聚合物，这种聚合物层，正如經驗所表明，具有很大負膨胀系数，而普通加工的聚合物层則具有很大正膨胀系数，将这些聚合物层贴在热接受片上，其曲率对温度和湿度的变化将是很灵敏的。

最近几年来在文献中开始介紹一些新的輻射高温計，即其作为测温用的热接受器或是用半导体热电偶或是用半导体热敏或光敏电阻。

什瓦尔茨 (Schwarz) [11] 所描述的一种热接受器是特別引人注意的。他成功地选择了半导体热电偶热电极的材料，它們具有很高的电导率和热电势，并具有較小的热导率，正的热电极基本上是由硫酸盐与杂質的硒化銀帶少量其他所組成。負的热电极是由銅、銀、碲及帶少量其它杂質的硒所組成的。热电极為截头圓錐形，高为十分之几毫米。

將圓錐的底固定在块状金属棒上，相互間保証电的絕緣，在两个錐体的頂端上焊上一层很薄的鉛箔片或金箔片，在仪器物鏡的一边的箔片涂黑，保証这薄片以可靠的热接触和电接触之用。这种半导体热电偶具有很高的热电势 (达1500微伏/度)，这样能保証高温計有較高的灵敏度，并且可用以測量較低的溫度。什瓦尔茨温度計的时间常数对空气热接受器而言，不超过0.03秒，对真空，不超过0.3秒。

帶半导体热接受器的輻射高温計，其刻度稳定性尚未确定，而这一因素在决定大量应用这种热接受器时，应首先予以注意。显然，半导体热接受器在保証使它在另位状况 (Нулевой режим) 下工作的綫路中应用是最合适的。

应用具很大光譜灵敏度选择性的光敏电阻，使得高温計本身的特性接近于亮度仪器，至于分析輻射测温仪器的工作条件显然是超出了本章的范围。

1953年魯特娜娅 (А. И. Рудная) [12] 表明：如果在輻射高温計中，聚集射綫到热接受器的鏡子是由不銹鋼制成的，則这种仪器将具足够好的分度稳定性。在魯特娜娅輻射高温計中裝有10个鉀点的热电堆。这种仪器能保証足够可靠地在 150°C — 800°C 范围内測量物体的輻射溫度，測量誤差在 150°C 时为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，在 800°C 时为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

这种仪器在烏拉尔某些企业中获得了成功的运用。

菲尔頓公司 (Fielden) [13] 生产的直接測量灼热体真正溫度的設備是很有价值的。这种設備是半球鍍金的凹透鏡，在測量时用以遮住輻射表面。由于其反射系数很大，落于其上的射綫几乎全部被反射，因此，于此表面上建立接近于热力学平衡的状态。在这种情况下，輻射表面的輻射溫度將接近其真实溫度。表面輻射的黑度系数越大，則接近的程度亦就越大。

用輻射高温計瞄准是通过处于反射鏡上部的观察孔来实现的。此孔的尺寸同样会影响表面真实溫度的測量誤差。观察孔的面积与鏡子面积之比愈小，則被测的輻射溫度愈接近于真实溫度。所以采用大直径的反射鏡較為合适。

必須指出：將反射鏡調到輻射表面上不可避免地會使得表面的溫度起變化，因為破壞了它的热平衡。因此，這種方法對測量具較大热傳導的物體溫度最有效。借反射鏡測量物體的真實溫度不僅可用輻射高溫計測量法，同時亦可用亮度高溫測量法。

輻射高溫計的分度是按絕對黑體模型來實現的。高溫用的黑體乃是在石墨管中央部分所形成的孔穴。石墨管裝在爐中作為电阻加熱體。為了提高孔穴的輻射黑度係數，固定在管子中央的隔膜做成很厚的石墨圓盤，圓盤的正面鉗不少孔，每個孔正如孔穴的作用一樣，其黑度係數接近於1[14]。

在某些結構中，這種隔膜用石墨管束來代替，將其尾端封住[15]。

為了減少供這種爐子的電流，在管上刻一系列的槽，使電流沿管而曲折前進。石墨管在真空中能長久使用到2500°—2600°C以下的溫度，在爐中充以氫氣，溫度可上升到2800°C。

黑體孔穴溫度的測量可用热电偶（1000°C以下）或光学高溫計。在第一种情況下，如果採用鉑銻-鉑热电偶必須保證热电偶與雜質—石墨微粒—相絕緣。

如果高溫計的热接受器所具的靈敏度與射綫流的光譜成份無關，則正如A. H. 哥爾特夫和A. И. 魯特娜婭所表明[16]：對分度這種高溫計而言，就沒有必要用不同的階級來改變高溫計全部測量範圍的爐溫。利用帶變動展開角的旋轉式扇形圓盤，可使輻射高溫計的分度顯著地簡化。扇形圓盤是裝置在爐和高溫計物鏡中間。在這種情況下，爐溫保持在相當於高溫計的測量上限，而較低溫度的分度點通過相應地選擇扇形圓盤的展開角來獲得。

扇形圓盤所必需的展開角可按斯蒂芬—波爾茨曼定律進行計算。

輻射高溫計的大量檢定和分度可通過與標準輻射高溫計的示值比較的方法進行。如果被檢高溫計和標準高溫計按結構是同型的，則這種檢定可以藉YPI-1800裝置（哈立可夫國家量具與儀器研究所制[5, 17]）來實現。全蘇計量研究院高溫實驗室工作表明：在此裝置上，利用500瓦的電影放映燈泡，在加強狀況下，可以用來檢定2500°C以下輻射高溫計之用。

近幾年來有關輻射高溫測量法方面的評述除上列各篇外，還可以參考文獻[18]。

§2—2 光学高溫測量法*)

光学高溫計是按物體單色輻射強度（亮度）來測量其亮度溫度。如眾所周知，單色輻射強度與物體溫度之間的關係可以用普朗克或維恩定律來表示[1]。

單色輻射的波長可以任意選擇，可是高溫計廣泛實際使用的是光譜紅色部分的輻射[1, 3]。借助於光学高溫計可以測量表面亮度溫度[4]。此溫度決定於儀器中所使用的單色輻射的波長，同時亦取決於物體的單色輻射本領[1]。由光学高溫計的示值轉換到物體的真實溫度是按下列著名公式來實現的

$$\frac{1}{T_a} - \frac{1}{S_a} = \frac{\lambda_0 \varepsilon_a}{C_2}$$

*) 本文作者 З. А. 拉賓娜。