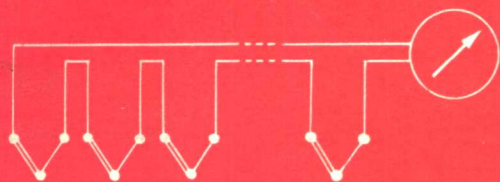


温度测量

〔加〕 R.E. 贝德福德
T.M. 道芬里
H. 普雷斯顿·托马斯



计 量 出 版 社

温 度 测 量

[加] R.E. 贝德福德 T.M. 道芬里

H. 普雷斯顿·托马斯 合著

袁先富 译 李汉谟 校 师克宽 复校

计 量 出 版 社

1 9 8 3 北 京

内 容 提 要

本书着重介绍了玻璃液体温度计测温、热电法测温、电阻法测温、辐射法测温和气体温度计测温的方法,各种温度计的分度方法、操作技术和注意事项;对于1968年国际实用温标也作了简明阐述。

本书是国际计量局温度计量咨询委员会主席H.普雷斯顿·托马斯和R.E.贝德福德、T.M.道芬里共同编写的,其内容丰富、文字简练。

本书可供各级计量部门、工矿企业、高等院校和科研单位的温度测量科技人员参考。

TEMPERATURE MEASUREMENT

R.E. Bedford, T.M. Dauphinee, and
H. Preston-Thomas

DIVISION OF PHYSICS

National Research Council Canada

温 度 测 量

[加] R.E. 贝德福德 T.M. 道芬里

H. 普雷斯顿·托马斯 合著

袁先富 译 李汀谟 校 师克宽 复校

责任编辑 陈艳春

—*—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—*—

开本 850×1168 1/32 印张 3 5/8

字数 93 千字 印数 1—30 000

1983年2月第一版 1983年2月第一次印刷

统一书号 15210·222

定价 0.57 元

科技新书目: 42—177

目 录

一、绪言	(1)
二、玻璃液体温度计测温	(12)
三、热电法测温	(16)
1. 前言	(16)
2. 基本概念	(16)
3. 热电偶的分度	(20)
4. 热电偶测温的误差	(23)
5. 具有代表性的热电偶	(30)
6. 热电偶的保护	(52)
7. 补偿导线	(53)
8. 热电偶的结构	(54)
9. 热电偶电路	(55)
四、电阻法测温	(61)
1. 铂电阻温度计	(61)
2. 铂电阻温度计的分度	(63)
3. 铂电阻温度计的温度计算	(65)
4. 配铂电阻温度计用的电测仪表	(66)
5. 其他金属电阻温度计	(73)
6. 半导体电阻温度计	(75)
7. 碳电阻温度计	(78)
8. 配半导体与碳电阻温度计用的仪表	(79)
五、辐射法测温	(83)
1. 引言	(83)
2. 光学高温测量法	(84)
3. 全辐射高温测量法	(96)

4.比色高温测量法.....	(97)
六、气体温度计测温.....	(100)
1.定容温度计.....	(101)
2.差示气体温度计.....	(105)
3.蒸气压温度计.....	(105)
参考文献.....	(107)

一、绪 言

大约在公元1550年以前,温度与热量没有明显的区别,因此温度也就不可能是一个可测的量的概念。第一支温度计可能是伽利略在1600年前后一、二年内制成的,用两个固定的温度建立可复现的实用温标并在固定点之间采用约定的内插方法,可能是华伦海特在1726年提出的。这种实验方法大约在一个世纪以后才根据对温度的理论上的认识得到论证。这是由于维·汤姆森在1849年最早比较完整的建立了热力学。在本世纪的最初年代就发展了对于温度同样严格、更广泛适用和更直观的统计力学的描述。后来由于统计力学的明确表述和进一步发展才引入了“不平衡温度”和“负的绝对温度”等概念。

所有这些以理论为基础的温度(称为热力学温度)都可以直接利用理想气体特性或辐射定律等测量。但是,这种测量既麻烦而且又不精确,实际上代之以按国际实用温标或其他一些明确定义的实用温标来进行测量,这些温标只是近似地与对应的热力学温度相符合。这种实用温标和热力学温度之差象实用温标的复现性本身那样已经明确地知道。因此,在七个*基本物理量中唯有温度的状况还不太满意。当然,温度只是一个强度量,其余几个量(长度、质量、时间、光的单位、电的单位、物质的量)是广延量。对于广延量可以通过叠加和细分构成标尺^①,但是温度却不能,如一百度的间隔不能加在另一个一百度的间隔上来得出二百度。这种度标必须按照可以间接参照理论(热力学)温度逐渐地通过实验的方法来建立。第一次国际计量大会在1889年批准了这样一种度标

* 原文为六个基本物理量,有误——译者注

① 例如,两个小时的沙漏可以表示为两个相等的部分,然后连续地流动,给出两个小时的间隔。

表 1 1968 年国际实用温标概要

温度范围与内插仪器	内 插 方 法
<p>1337.58K (1064.43°C) 以上光学高温计</p> <p>903.89K (630.74°C) 到1337.58K (1064.43°C)</p> <p>纯度有限制的铂10/铂热电偶。</p> <p>所有这种成分的市售热电偶部可以满足这种纯度的要求。</p>	<p>按朗伯克辐射定律用金凝固点作为标准温度比较光谱辐射亮度,从关系式 (第五章第2节) 可得出 $T_{0.68} N_b (\lambda, T_{68}) / N_b (\lambda, T_{Au}) = (\exp(C_2/\lambda T_{Au}) - 1) / (\exp(C_2/\lambda T_{68}) - 1)$ (1)</p> <p>一端在0°C时,另一端的温度 t_{68} 与热电偶的电动势的关系如下:</p> $E(t_{68}) = a + b t_{68} + c t_{68}^2$ (2) <p>式中 c, b, a 是根据在金凝固点、银凝固点和630.74±0.2°C (用铂电阻温度计测量此点的准确温度值) 上的测量来决定的。</p> <p>t_{68} 按一个“偏差公式”和二次公式来确定</p> $t_{68} = t' + 0.045 \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{419.58^\circ\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{630.74^\circ\text{C}} - 1 \right)^\alpha$ (3)
<p>273.15K (0°C) 到903.89K (630.74°C)</p> <p>这个范围和其他更低的范围需要用 $W(100^\circ\text{C}) > 1.3925$ 的铂电阻温度计。</p> <p>这里 $W(t) = R_t/R_0$</p>	$t' = \left\{ \frac{1}{a} [W(t') - 1] + \delta \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right) \right\}^\beta$ (4) <p>常数 R_0, a, δ 通过在水三相点、水沸点 (或锡凝固点) 和锌凝固点的测量来确定 t' 的上述表达式等于</p> $W(t') = 1 + At' + Bt'^2$ (5) <p>式中 $A = a(1 + \delta/100^\circ\text{C})$ 与 $B = 10^{-4} a \delta^\alpha$</p>
<p>273.15K (0°C) 到90.188K (-182.962°C)</p>	<p>这个范围和低于这个范围用公式</p> $W(T_{68}) = W_{\text{CCT-68}}(T_{68}) + \Delta W(T_{68})$ (6) <p>式中 $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ 由多项式给出</p>

续表 1

温度范围与内插仪器	内 插 方 法
273.15K (0°C) 到 90.188K (-182.962°C)	$T_{68} = \sum_{j=0}^{20} a_j \left(\frac{\ln W_{CCT-68}(T_{68}) + 3.28}{3.28} \right)^j / K \quad (7)$ <p>21个指定的系数a_0, \dots, a_{20}以及从这个函数列表的形式可以从任何国家标准计量研究机构或国际计量局得到。 $\Delta W_1(T_{68})$通过各个定义固定点上的测量来决定, 在固定点之间的温度由内插公式确定。 在这个范围内的内插公式是</p>
90.188K (-182.962°C) 到 54.361K (-218.789°C)	$\Delta W_4(T_{68}) = b_4(T_{68} - 273.15K) + e_4(T_{68} - 273.15K)^3 (T_{68} - 373.15K) \quad (8)$ <p>式中$T_{68} = (T_{68} - 273.15K)$ 常数根据在 90.188K (或 89.798K) 下所测的偏差和在 373.15K 上的偏差来决定, 后一偏差或者根据公式 (6) 计算或在 373.15K 下直接测量。</p> <p>内插公式是</p> $\Delta W_3(T_{68}) = A_3 + B_3 T_{68} + C_3 T_{68}^2 \quad (9)$ <p>式中常数根据在 54.361K 与 90.188K (或 89.798K) 时所测的偏差确定并根据公式 (8) 和 (6) 中 $d\Delta W_1(T_{68})/d(T_{68})$ 在 90.188K 时相应等的要求来确定的。</p>
54.361K (-218.789°C) 到 20.28K (-251.87°C)	<p>内插公式是</p> $\Delta W_2(T_{68}) = A_2 + B_2 T_{68} + C_2 T_{68}^2 + D_2 T_{68}^3 \quad (10)$ <p>式中常数根据在 20.28K、27.102K 和 54.361K 时所测的偏差并根据公式 (9) 和 (10) 中 $d\Delta W_1(T_{68})/d(T_{68})$ 在 54.361K 时相应等的要求来确定的。</p>
20.28K (-252.87°C) 到 13.81K (-259.34°C)	<p>内插公式是</p> $\Delta W_1(T_{68}) = A_1 + B_1 T_{68} + C_1 T_{68}^2 + D_1 T_{68}^3 \quad (11)$ <p>式中常数根据在 13.81K、17.042K 和 20.28K 时所测的偏差并根据公式 (10) 和 (11) 中 $d\Delta W_1(T_{68})/d(T_{68})$ 在 20.28K 时相应等的要求来确定的。</p>

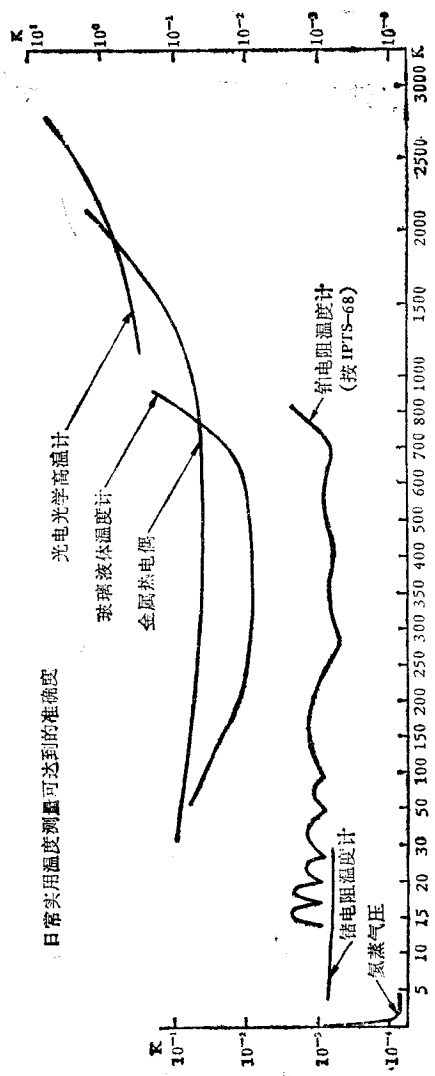


图 1-B

图 1 各种类型温度计一般的工作范围与各个温标的复现性

(标准氢温标)；1927年由国际温标所代替；1948年出版了国际实用温标后来的版本；经过稍加补充，温度值并没有任何数值变化又编出1960年的版本。后来经过重大的修改，在1967年拟订了新的版本并于1968年取名为“1968年国际实用温标”(IPTS-68)，从1969年开始正式采用。1975年又进行了修订，但无数值变化。

世界上各国家标准实验室都保持1968年国际实用温标(IPTS-68)。因此，在温标的范围内实际上所有的温度测量最后都以此为标准。约定温标的选择应使温度测量能够具有精密度和复现性，并尽力在其范围内与热力学温度相近似。1968年国际实用温标是以11个规定有固定数值的可复现的温度为基础。根据三种标准的内插温度计，每种温度计在一个或更多的固定点进行分度，并按规定的方式求出中间的温度。下限到 -259.34°C 或 13.81K ①，而在理论上国际实用温标没有上限。但是，实际上国际实用温标(IPTS)的复现不能超过 4000°C 。尽管现在这样的高温常会遇到，但是在这样高的温度范围没有已知发射率的热源。此外，用光学高温计也达不到这样高的温度。在 1064°C 以上按国际实用温标(IPTS)测温必须满足这两个条件。

表1、表2和图1汇总了复现1968年国际实用温标(IPTS-68)的方法。关于使用这个温标的实际细节R.E.贝德福德与柯尔比在文献[1a]中有介绍。

除了主要标准实验室以外，其他实验室要直接按以上描述的定义来复现国际实用温标，一般是不现实的。除标准实验室以外，大多数准确的测温可用分度过的标准温度计(铂电阻温度计、铂铑10%铂热电偶、光学高温计)来实现。使用者经常所需要的固定点只有冰点或准确度可达几毫度(千分之几度)的水三相点。如果使用者需要检查自己仪表的工作情况时，实现另外几个第一类固定点和某些第二类固定点(见表2)并不很难。关于温度测

① 开尔文(K)过去叫开氏度，其量值与摄氏度($^{\circ}\text{C}$)相等。这两个单位的温度符号的关系式为 $T=t+273.15$ 。式中： T ——开尔文温度， t ——摄氏温度； $T=0$ ——绝对零度， $t=0$ ——冰点温度

表2 标准温度^①

平衡状态	$T_{68}(K)$	$t_{68}(^{\circ}C)$	$dT/dp(K/atm)$
氢沸点	4.215 ^②	-268.925 ^②	1.033
平衡氢三相点 ^③	13.81	-259.34	—
(25/76标准大气压)氢沸点	17.042	-258.108	7.6
平衡氢沸点 ^④	19.78	-259.17	3.4
氦三相点	2.4,561	-248.589	—
氦沸点	27.102	-246.048	3.3
氧三相点	54.361	-218.789	—
氮三相点	63.146	-210.004	—
氮沸点	77.344	-195.806	8.5
氟三相点	83.798	-189.352	—
氟沸点	87.294	-185.856	—
氧沸点	90.188	-182.962	9.6
二氧化碳升华点	194.674	-78.476	12.3
汞凝固点	234.314	-38.836	0.0054
冰点	273.15	0	-0.007
水三相点	273.16	0.01	-0.007 ^⑤
苯氧基苯三相点	300.02	26.87	—
水沸点 ^⑥	373.15	100	28.0
镉凝固点	429.784	156.634	0.0049
锡凝固点 ^⑦	505.1181	231.9681	0.0033
铋凝固点	544.592	271.442	-0.0035
镉凝固点	594.258	321.108	0.0062
铅凝固点	600.652	327.502	0.0080
汞沸点	629.81	356.66	56
锌凝固点	692.73	419.58	0.0043
硫沸点	717.824	444.674	69

续表 2

平衡状态	$T_{68}(K)$	$t_{68}(^{\circ}C)$	$dT/dp(K/atm)$
铜铝低共熔点	821.41	548.26	—
铋凝固点	903.905	630.755	0.00085
铅凝固点	933.61	660.46	—
银凝固点	1235.08	961.93	—
金凝固点	1337.58	1064.43	—
铜凝固点	1358.03	1084.88	—
镍凝固点	1728	1455	—
钴凝固点	1768	1494	—
钨凝固点	1827	1554	—
铂凝固点	2042	1769	—
铈凝固点	2236	1963	—
铀凝固点	2720	2447	—
钨凝固点	3695	3422	—

注:

①除三相点温度和 17.042K 温度外, 表中所列温度均在一个标准大气压下复现的。

在准确度要求很高时, 已知温度压力系数可对气压微小变化和温度计敏感元件的插入深度进行修正。表中有着重点的温度为 IPTS-68 规定的固定点。

②在 IPTS-68 温度范围以外。

③正氢、仲氢的平衡混合。

④当感温元件降低到液体—蒸气界面以下时可感到压力效应。

⑤按 IPTS-68, 锡凝固点可以用来代替水沸点。

量的各种方法在以后的各章中再详细叙述。另外一点值得注意, 使用者往往会低估把上述标准仪表使用到其极限准确度时所遇到的困难, 他们往往认为可以达到比实际上要好二倍至十倍的准确度。

在 1969 年采用 IPTS-68 以前, 国际实用温标 (IPTS) 的下限是 $-182.97^{\circ}C$ 或 $90.18K$ 。在这个温度以下有各种实用温标, 这些温标虽然没有正式规定, 但在某种程度上已得到国际上的公

认。其中铂电阻温度计的比较温标^①一般用于10—90K的温度范围。在北美几乎都采用NBS-55温标*（在IPITS-68尚未完全取代它之前无疑仍继续使用）。这个温标比1955年被它取代的NBS-39温标，在温标的整个范围内要低0.01K，它是根据美国标准局气体温度计自身测量的结果建立的。在欧洲一般使用其他类似的比较温标，如英国的NPL-61和苏联的PRMI-54温标**，这些在北美很少使用。这四个温标在其大部分的温度范围内，相差几毫开⁽²⁾。

在1.5—20K温度范围内美国和苏联研制用铂电阻温度计的比较温标。美国的NBS-65温标是根据声学温度计测量建立的^(3,3a)。NBS-65与NBS-55温标在10—20K范围内的重叠造成了在这段温度范围内有两个美国标准局的正式温标。这两个温标是相当一致的，但不是完全相同的。

在0.8—5K之间氦的蒸气压一般用来定义温标。1958年⁴氦温标⁽⁴⁾就是当时为人们所接受的一种温标。这种温标的复现性在绝大部分温度范围约在 10^{-4} K以内，它与热力学温度的符合程度约在10mK以内。

在0.8K以下温度测量就变得比较复杂，一般包括稀有的³氦同位素蒸气压测量（到0.4K），或某些顺磁盐磁化率的测量（如到 10^{-3} K）以及下限可达几微开（ 10^{-6} K）温度的进一步测量。这些测量对大多数温度测量人员实际上很少有兴趣。

从以上简单的讨论可以看出：在1969年以前，北美在10—90K范围内一般按NBS-55温标进行温度测量。在更高的温度范围内，温度是按IPITS-48进行测量的。在1969年以前，实用温标的数值变化是很小的，与大多数实验准确度同一数量级。因此，按当时（如1927年国际温标）的温标所公布的较早的实验与1968年所通

^①比较温标是用标准温度计准确确定的温标。这种标准温度计本身又以气体温度计或声学温度计作为标准进行初始校准。这样，标准铂电阻温度计就以一定的准确度与热力学温度相关联。

* NBS-55温标系美国标准局（NBS）1955年的温标——译者注。

** NPL-61与PRMI-54温标分别是英国物理研究所和苏联物理技术与无线电计量科学研究所的温标——译者注。

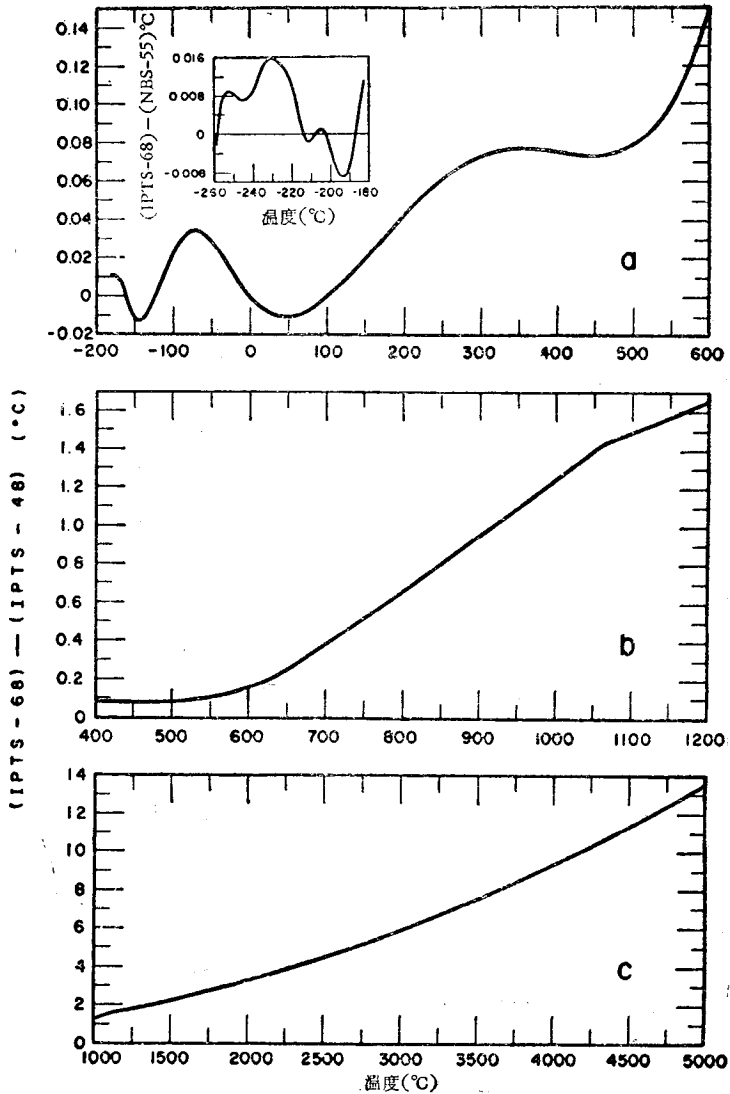


图 2 国际实用温标 IPTS-68 与 IPTS-48 的差。
 a 图的小方框内表示 IPTS-68 与 NBS-55⁽²⁾ 的近似差。在 1969 年以前北美广泛使用 NBS-55 温标。

用的温标所给出的结果并没有明显的差别。但是，采用 IPTS-68 后情况就不同了。因为 1968 年国际实用温标 (IPTS-68) 与热力学温度十分接近*，与以前的温标数值有很大的差别。除温度数值上的差别外，在某些温度区域，度的大小（例如，所测的比热和热电动势率）也有很大的变化。图 2 示出了 $t_{68} - t_{48}$ 和 $t_{68} - t_{NBS-55}$ 的温度差。由于 IPTS-68 只是逐步地取代其他温标，重要的是在报道高精度的温度测量时，要注明所采用的特殊温标。

用“基准”温度计进行高精度测量要用到上述要点。然而，绝大多数温度测量不属于这一类。考虑到花费，易于操作，空间的限制，远距离读数，温度控制或不利的的环境条件，一般需要某些低一级的温度测量，如玻璃液体温度计与次级热电偶实用很方便，易于读数，价钱便宜。蒸气压温度计、次级电阻温度计、双金属温度计、熔堆、温度指示涂料和其他各种指示器，虽不如上面两种温度计普遍，但是使用仍然比较广泛。

以下各章将详细讨论包括一级温度计和次级温度计在内的温度测量。本书主要着重在温度测量人员一般最感兴趣的那些温度范围（不包括超高温和超低温）和适当高精度的测量。

* 目前看来，这句话已不够确切。近年来已发现 IPTS-68 与热力学温度在某些温度范围内存在较大的差别。因此，国际上正在酝酿修改国际实用温标——校者注。

二、玻璃液体温度计测温

由于越来越好的测温仪表不断出现，玻璃液体温度计的使用逐渐减少。现在很少有实验室是用这种温度计来进行高精度测温的。最好的玻璃液体温度计的准确度可达到千分之几摄氏度。但是，可惜要达到这个准确度需要仔细分度、精确读数 和许多修正。由于使用时有这些不便而抵消了成本低的优点。然而，玻璃液体温度计便于携带，不要辅助设备，它经常可用于低准确度的快速测温 and 快速检查其他温度计，几乎在每一个实验室都能找到几支。有时会遇到下限可达零下 200℃（用戊烷作充填液）和上限高于 600℃（熔融石英中加压的汞）的温度计。但是，更准确的玻璃液体温度计的范围一般在 -40℃ 到 400℃。

由于玻璃液体温度计的基本原理是众所周知的^[6-7]，这里不详细叙述，也不详细讨论玻璃液体温度计测量的实际操作。如果要得到可靠的、有一定准确度的温度读数，应考虑以下要点。几乎所有精密温度计都是用水银作为充填液。

温度计原始分度可以在液柱全浸的情况下进行分度，液柱温度接近于被测温度；也可以在温度计局部浸到温度计上某一固定标记处并对露出液柱（即从浸入点到液柱顶部之间）规定某一平均温度（ T_c ）的情况下进行。全浸式温度计一般更准确。对半浸温度计，如不知实际平均露出部分的温度（ T_c ）是否等于 T_c 时，就要测出上述温度^①，同时得出在露出液柱水银膨胀修正的读数。其修正量为

① 为此目的而设计的毛细管温度计（法登温度计）是可以买到的。在许多情况下特别是当用叶片固定大部分暴露在室温下的液柱，剩余的短的温度梯度范围（其终点可用任何常用辅助温度计测出）假定具有试验温度与室内温度的平均温度。