

国外温度计量的 现状和发展趋势

(内部参考资料之十)

中国计量科学研究院情报室

毛主席語录

学习外国的东西，是为了研究和发展中国的东西。

我国人民应该有一个远大的规划，要在几十年内，努力改变我国在经济上和科学文化上的落后状况，迅速达到世界上的先进水平。

编 者 说 明

本文主要根据国外文献，对几个主要工业、科学技术水平较发达的国家的计量研究机构，有关温度定点水平、改善国际实用温标、扩大量限，提高精度和采用新的测温技术等方面作一简要介绍。由于收集的资料不够完善，对一般温度测量技术未能提及，再加上编写水平有限，尚不能反映国外温度计量的全貌，更难免存在一些错误，仅供有关同志内部参考，并希望给予批评指正。

一九七三年

目 录

一、国际实用温标的发展.....	1
二、几个工业发达的国家温度定点的水平.....	3
1. 英国物理研究所.....	3
2. 日本计量研究所.....	3
3. 苏联计量科学研究院.....	4
4. 民德计量与产品检验局.....	5
5. 加拿大国家研究委员会.....	5
6. 美国标准局.....	6
三、国外温度计量的发展趋势.....	6
1. 不断改进和完善温标.....	6
2. 扩大测量范围, 提高测量精度.....	10
3. 利用各种物理效应探讨新的测温技术.....	16

一、国际实用温标的发展

本世纪初国际权度局制订的“标准温标”是当时国际上能接受的唯一实用温标。这种温标是根据 Chappuis 定容氢温度计定义并用玻璃水银温度计来复现的。温标的范围从 0 到 100°C ，复现性最高的只有 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。根据德国的建议，有关国家从 1911 年就开始进行以热力学温标作为基本温标的研究工作。当时用铂电阻温度计可实现 $0-450^{\circ}\text{C}$ 范围内的温标。

直到 1927 年第七届国际权度大会正式通过国际温标。从这时起在世界上才有各国一致同意的国际温标。当时的国际温标是用气体温度计定义并分别采用铂电阻温度计 (660° 以下，以后改为 630.5°C)、热电偶 ($630.5^{\circ}\text{C}-1064.43^{\circ}\text{C}$) 和光学高温计 (1064°C 以上) 来复现，并借助一系列公式进行插补与外推。

随着科学技术的发展，1948 年国际权度委员会对 1927 年国际温标进行了九处重要修改。使国际温标尽可能地与热力学温标一致，固定点复现性更高，同时使插补用的温度计使用更加方便。随后在 1960 年第十一届国际权度大会上又对 1948 年国际温标进行了共六处修正并正式定名叫做“国际实用温标” (1960 年修正版)。

1967 年第十三届国际权度大会鉴于测温技术的发展和测温范围的扩大又对 1948 年国际实用温标 (1960 年修正版) 进行了八处重要修改。大会还通过了温度单位的新定义，规定热力学温度单位——开 (K) 等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。新温标具有以下特点：

(1) 规定了各固定点新的数值，使更接近于理论热力学温标的

数值；

(2) 修正并重新规定了各温度区间的插补公式；

(3) 对普朗克公式的常数 C_2 进行了修正；

(4) 将温标的下限从原来的氧沸点 (90.188K) 延伸到平衡氢三相点 (13.81K)，以满足低温测量的需要。

这次温标的修改将引起整个温度数值的变化。所有温度值，特别是对于高精度的温度测量必须按照1968年国际实用温标与1968年国际实用温标差值表进行修定。

1968年国际实用温标经国际权度委员会1968年10月的全体会议正式通过采用，并从1969年1月1日起在国际上生效。

美国、英国、日本、西德等国已规定从1969年1月起推行新温标。苏联也从1970年开始逐步推行。虽然推行新温标的工作有显著的进展，有些国家已按新温标开展检定，但是无论哪个研究机构尚未完全实现新设的氧沸点(90.188K) 以下的全部温度定点。〔1〕

1968年国际实用温标根据现代科学技术水平是比较合理的，与热力学温标越来越接近（仍有 0.01°C 的偏差），但是还有不少地方需要修正和改进。特别是在延伸国际实用温标的范围，改进实现温标定点的技术，改善插补仪器和方法等方面各国计量机构和有关科研机构、高等院校正进行大量的工作，不断进行国际比较以进一步改进国际实用温标。

二、几个工业发达的国家

温度定点的水平

1、英国物理研究所〔2〕

温 标 固 定 点	温 度	固定点温度复现精度	实现热力学温标的 准 确 度
平 衡 氢 三 相 点	13.81 K	0.001 K	0.01 K
(25/76)平衡氢沸点	17.042 K	0.001 K	0.01 K
平 衡 氢 沸 点	20.28 K	0.001 K	0.01 K
氖 沸 点	27.102 K	0.001 K	0.01 K
氧 三 相 点	54.361 K	0.001 K	0.01 K
氧 沸 点	90.188 K	0.001 K	0.01 K
水 三 相 点	0.01 °C	0.0001 K	按定义是正确的
水 沸 点	100 °C	0.0005 K	0.0025 K
锡 凝 固 点	321.9681 °C	0.0001 K〔17〕	
锌 凝 固 点	419.58 °C	0.0005 K	0.03 K
银 凝 固 点	961.93 °C	0.05 K	0.2 K
金 凝 固 点	1064.43 °C	0.05 K	0.2 K

2、日本计量研究所

1965年日本计量研究所用气体温度计进行热力学温标的绝对测量，结果如下：〔3〕〔54〕

(每开定义的精度 0.4×10^{-6})

温 标 固 定 点	固定点温度复现精度	实现热力学温标的准确度
平 衡 氢 三 相 点		0.01 K
25/76 平 衡 氢 沸 点		0.01 K
平 衡 氢 沸 点	± 0.0003 K	0.01 K
氦 沸 点		0.01 K
氧 三 相 点	± 0.0001 K	0.01 K
氧 沸 点	± 0.0003 K	0.01 K
水 三 相 点	0.0001 K	按定义是正确的
水 沸 点		± 0.005 K
锡 凝 固 点		0.015 K
锌 凝 固 点		0.03 K
银 凝 固 点		0.2 K
金 凝 固 点		0.2 K

3、苏联计量科学研究院

(1) 1969年苏联ЭТС基准铂电阻温度计定点水平〔4〕

温 标 固 定 点	温 标 定 点 精 度
氧 沸 点	± 0.01 °C
水 三 相 点	± 0.0001 °C
水 沸 点	± 0.0007 °C
锌 凝 固 点	± 0.0007 °C

(2) 据苏联报导 (1971年) 温度定点的极限误差: 〔5〕

温 度 范 围	温 标 定 点 精 度
-200—0 °C	0.005 °C
0—400 °C	0.0005 °C
500—600 °C	0.01 °C
700—1100 °C	0.1 °C
1100—1500 °C	1 °C
1500—2500 °C	2—3 °C

4、民德计量与产品检验局温度定点水平〔6〕

利用低温恒温槽复现低温定点的最大不可靠性

平衡氢三相点	0.001~0.003 K
25/76 平衡氢沸点	" "
平衡氢沸点	" "
氦 沸 点	" "
氧 三 相 点	" "
氧 沸 点	" "
0—100°C	±0.002 K
450—630°C	±0.003 K ~ ±0.015 K
630—1064°C	± 0.1 K
1064.43°C	± 0.4 K (目测法)
1500°C	± 3 K
4000°C	±15 K

5. 加拿大国家研究委员会温度定点水平

用48支温度计复现温标的精度如下：〔7〕〔8〕

平衡氢三相点	±0.003 K
25/76 平衡氢沸点	±0.003 K
平衡氢沸点	±0.001 K
氦 沸 点	±0.001 K
氧 三 相 点	±0.002 K
氧 沸 点	±0.002 K
氧沸点到水三相点(90.188 K—273.15 K)	±0.005 K (用 9 支温度计)
水 三 相 点	±0.0002 K
水 沸 点	±0.0005 K
锡 凝 固 点	±0.0005 K
锌 凝 固 点	±0.0003 K
硫 沸 点	±0.0015 K
银 凝 固 点	± 0.1 K
金 凝 固 点	± 0.1 K (热电偶)
	± 0.5 K (光学高温计)

6. 美国标准局 (1965年) 温度定点水平 [9]

温 度 定 点	固定点复现性 (°C)	仪 器 精 度 (°C)	实验室之间的精 度 (°C)	国际实用温标与 热力学温标之差 (°C)
氧 (沸) 点	0.001	±0.004	±0.02	-0.01
水 三 相 点	0.0002	0.0002	0.0002	—
水 沸 点	0.0005	0.0002	0.0005	-0.0015
锌 凝 固 点	0.0003	0.0002	0.001	+0.074
硫 沸 点	0.0015	0.0002	0.002	+0.076
(630.5°C) <铂电阻温度计>	—	0.001	0.02	+0.17
(630.5°C) <热电偶>	0.002 (估计)	0.1	0.2	
银 凝 固 点	0.002 (估计)	0.1	0.2	+1.13
金凝固点 <热电偶>		0.1	0.2	+1.41
金凝固点 <光学高温计>		0.3	0.4	
2000°C	—	1.0	2.0	
4000°C	—	3.0	10.0	

註：仪器精度系指各实验室达到的插补仪和测量设备的精度，主要受仪器本身稳定性的影响。实验室之间的精度系指各国家一级实验室之间的精度（偏差），主要受上述实验室插补仪器与传递标准仪器的影响。

三、国外温度计量的发展趋势

1. 不断改进和完善温标：

按热力学第二定律规定的热力学温标是理想的温标，但是难以完全实现。各国大力进行研究工作使目前的国际实用温标更加接近理论热力学温标。虽然国际实用温标经过几次修订，而1968年通过的国际实用温标仍有许多方面需要改进和完善，以满足日益增长的高精度温度测量的需要。

1971年7月国际权度局召开的第九次国际温度咨询委员会成立了专门小组，着手筹备修订1968年国际实用温标，由英国物理研究所、

美国标准局和苏联计量科学研究院负责筹备工作。

改进1968年国际实用温标的一个问题是简化插补仪器和插补公式。目前在13.81开到1064.43开温标范围内分别用铂电阻温度计、热电偶和光学高温计复现温标，造成温标从电阻温度得到热电势温度关系的不衔接性，妨碍复现精度的提高。早在1939年国际温度咨询委员会已注意到在630.5—1064.43°C范围内用铂电阻温度计代替热电偶的动向，德、苏、英、美各有关国家在这方面做了许多工作，并取得一定进展。〔53〕

苏联计算了419.58—1064.43°C温度范围内高温铂电阻温度计相对电阻标准表，选定Matthiesson's法则为基础的换算方法。分度精度 $\pm 0.03^\circ\text{C}$ ，比用热电偶作插补仪器提高3倍，温度计定点只用锌与金的两个凝固点取代热电偶用的镨、银、金三个凝固点。〔10〕

日本对铂电阻温度计在630—1064°C范围内的稳定性也进行了研究，指出一般在高温下粗的铂丝较细的稳定性好，但是从实用的观点来看，用细的铂丝容易测定电阻。〔11〕

英国物理研究所正在研究用铂电阻温度计代替铂铑铂热电偶作为630.74°—1064.43°C范围的插补仪器。目前这种特殊结构的铂电阻温度计正在通过锡、锌、镨、银、金等凝固点的检定，试验其特性。〔17〕

1971年温度咨询委员会第九次会议，对上次会议提出的高温铂电阻温度计代替铂铑铂热电偶作为标准插补仪器的方案进行了讨论。指出铂电阻温度计在金点的复现性可达 ± 0.01 开，比热电偶优越。但是高温铂电阻温度计价格贵、寿命短，有待进一步研究。同时指出有可能使光学高温计的潜在能力范围延伸到较低的温度范围（如660°C）。

其次，尽可能地用凝固点来代替沸点也是改善温标的一项重要措施。由于提高沸点的复现性受到压力测量精度的限制，因此温度咨询

委员会已建议用锡凝固点 (505, 1181 开) 来代替水沸点。加拿大复现锡凝点温度的精度已达 $\pm 0.0005^{\circ}\text{C}$, 可望进一步提高。目前, 美、苏、日、加等国均在作这方面的工作。复现温标的其他沸点也有被取代的趋势。

又如氦沸点, 1968年国际实用温标没有规定所用氦的同位素成分也是不适当的。因为, 纯同位素的测量比自然混合物精度高一倍。美国标准局认为用氦20更为适合。第九次温度咨询委员会也讨论了这个问题。〔12〕

如何提高国际实用温标传递精度始终是各国研究的一个课题。尽管温度基准精度很高, 但由于逐级往下传递, 降低了测量精度。苏联提出利用石英频率温度计有可能实现按通讯信道传递国际实用温标, 测温仪器不用送检可就地校准。其原理是将被测温度转换成频率, 与频率基准进行比较, 将被测温度值转换成编码信号从通讯信道传递给使用部门。鉴于频率的测量精度可达 10^{-12} 量级以上, 用频率插补仪器来代替电的插补仪器是可能的。目前苏联的压电石英频率温度计分辨能力达0.0001开, 理论上可达0.00001开, 而且在 -40 到 230°C 范围内具有温度与频率的线性特性。〔13〕苏联计量科学研究院还在研究隧道二极管热频转换器。〔52〕日本利用所谓石英温度频率转换器可测 -80 到 250°C 的温度范围, 最大分辨率达 0.0001°C 。〔14〕美国准标局的石英晶体温度计分辨率也可达 0.0001°C 。〔15〕西德物理技术研究院研究了用数字石英温度计传递1968年国际实用温标。在 -80°C 至 250°C 范围内石英晶振荡器的温、频关系被用来测温, 其工作频率28兆赫, 特别在 -10°C 至 110°C 范围内用石英温度计与铂电阻温度计进行过比较, 在水三相点的不可靠性为千分之几开。〔40〕关于按通讯信道传递温标的问题, 国际计量技术与仪器制造学会计量学常设分组委

员会即将在苏联召开学术讨论会来研究这个问题。〔16〕

为了更精确地复现国际实用温标，提高电阻温度计的测量精度，各国测温用的二次仪表逐步由直流法过渡到交流法。

美国标准局研制的电阻温度计电桥测量25欧标准铂电阻温度计，电桥分辨率达0.00002开（20微开）〔12〕英国物理研究所直接按照Barber电阻温度计设计的七挡电桥，分辨率到10微欧。加拿大国家研究委员会的“绝缘电位比较仪”，可直接读出 -50°C 到 700°C 的温度范围，准确度据称达到 $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ 。〔18〕最近研制的低频交流电桥，目前能得到 10^{-8} 量级的精度。在第五届温度会议上受到普遍的重视。〔19〕

热力学温标是理论温标。各国用气体温度计进行测定，尽管经过多次改进，仍有不小误差而且使用比较复杂。目前各国利用各种工作原理的温度计（如各种气体温度计、声速温度计、辐射温度计、噪声温度计、电化学温度计等）进行热力学温度的绝对测量。

苏联计量科学研究院研制了利用声速在气体中与温度关系的电声气体温度计，1959年在2—273开温度范围内测定热力学温度的误差接近 0.01°C ，已达到经典气体温度计的精度。这种电声气体温度计可得到 $0.001\sim 0.0005^{\circ}\text{C}$ 的复现性。美国标准局在1962年也制作了这种电声气体温度计，实现了2—20开范围的温标。〔20〕英国物理研究所的低温气体温度计在2—20开温度范围内可达0.5毫开（ $5\times 10^{-4}\text{K}$ ）的精度，与按1968年国际实用温标导出的铂电阻温度计偏差0.2—1.5毫开，与 T_{58} 氮蒸汽压温标偏差4—8毫开。〔21〕澳大利亚标准研究所定容气体温度计在2—16开范围内准确度达 $\pm 0.003^{\circ}\text{C}$ 。〔22〕

美国标准局利用声学温度计（超声干涉仪）已建立2—20开范围内临时温标，也叫“美国标准局声学温标”现已扩展至标准氮沸点

(27, 102开), 与1968年国际实用温标的偏差在30开时达14毫开。英国物理研究所新的声学温度计与美国标准局的温标符合性很好, 在4—5开范围内偏差只1—2毫开, 在20开时为5—10毫开。美国标准局正研究通过测量噪声温度企图实现热力学温标的绝对测量。目前用点结触约瑟夫森结可记录 23 ± 3 毫开的噪声温度。〔21〕最近意大利国家研究所利用电子热噪声, 即从约翰逊噪声的平均电压求出绝对温度, 目前已取得万分之一的精度。

由于辐射检测元件的进展, 美国标准局考虑将检测元件与孔径部分安装在极低温的全辐射温度计上, 可比较常温附近的温度, 分辨力达 0.002°C 。同时能将温度范围延伸到低温范围并可望进行温度的绝对测定。〔19〕

为了填补1968年国际实用温标与 T_{58} 温标之间的空白, 使温标往下延伸, 国际权度局温度谘询委员会第九次会议讨论了用气体温度计、声速温度计与磁学温度计等复现这段温标。这些计量仪器的精度是足够的了, 但作为实用计量仪器还太复杂。〔1〕

2. 扩大测量范围, 提高测量精度

温度计量发展的一个重要趋势是采用近代技术不断扩大测温范围, 提高测量精度。

在原子核反应中需要测量特高的超高温。例如氢弹爆炸时可获得 10^8 开的极高温。利用紫外到X射线的分光光度法、激光干涉和散射以及通过计数原子核反应产生的中子可测 10^6 开到 10^9 开的超高温。甚至有的国家还在对 10^{10} — 10^{11} 开的超高温进行不断的研究。〔23〕

在低温测量方面, 首先是低温, 特别是极低温的获得是一个困难问题。据苏联报导目前能获得的最低温度为 2×10^{-5} 开〔24〕。日本报导: 1966年低温会议公认现今能达到的最低温度可靠数据是 10^{-3} 开。

发表过 10^{-6} 开的数据, 不过这时指的是“自旋温度”〔23〕

现就各主要国家测量高、低温的状况概述如下:

(1) 等离子温度测量:

美国海军研究所测量等离子温度的范围可达 10,000,000 开〔25〕
苏联哈尔科夫计量科学研究院已建立高温炽热体, 用光学与光电法可测量 100,000 开等离子温度。〔26〕苏联计量科学研究院利用 ЭВ-45 型脉冲源的连续辐射光谱测量脉冲源的温度, 在实现温标时可根据现有温标的相同原理直接比较辐射源亮度和被测辐射源的减弱亮度。用这种辐射源作标准可将温标扩展到 40,000 开的上限并可往下传递。利用该辐射体借助一组光学高温滤光片可插补 39000 开以下温标的中间温度。测量相对误差在 30,000、20,000、10,000 开时分别为 2%、1.5%、1%。这种脉冲源在 500—644 毫米波长范围内进行分度, 还可近似地复现等离子状态的极高温, 约 390,000 开。〔27〕日本计量研究所正在研究以电弧等离子热源建立 20,000 开以上的极高温温标。〔28〕英国物理研究所正研究用高频激发火焰光源进行 20,000 开以上电弧与等离子体温度的测量。〔51〕

(2) 光电高温测量:

复现国际实用温标在金点 (1064.43°C) 以上规定使用光学高温计。但是, 由于现有的光学高温计采用目测法, 复现精度低, 故各国已先后研制了光电高温计来代替目测光学高温计, 从而使光学测温从目视法过渡到客观法。现将各主要国家研究光电高温计的情况介绍如下:

苏联计量科学研究院早在 1954 年就着手试制用光电法测温的 СПК-1 型客观光谱高温计。1963 年苏联计量科学研究院在改进原有装置的基础上研制了 СП-4К 型客观光谱高温计装置 (最近还研制了 СПКУ 型

光谱高温计) 并用以复现 1064.43°C 以上的国际实用温标。用以保存和传递国际实用温标的是两组 CЧ-10-300型钨带温度灯。此外还用一组用 8 种波长进行定点的温度灯作付基准以建立色温温标。复现国际实用温标的精度见附表。哈尔科夫计量科学研究院研制的标准红外光谱高温计, 经苏联计量科学研究院改进后定度温度范围 $400-1500^{\circ}\text{C}$, 光谱范围 $0.9-2.2$ 微米, 传递亮度温度的极限误差 $\pm 4-5^{\circ}\text{C}$, 而传递色温的极限误差达 $\pm 10-15^{\circ}\text{C}$ 。在广泛的光谱范围内, 可用标准辐射体、标准辐射高温计和辐射高温计望远镜比较仪按全辐射传递国际实用温标。苏联用二等辐射高温计传递温度值的极限误差为 $\pm 7^{\circ}\text{C}$, 三等辐射高温计为 $\pm 8^{\circ}\text{C}$, 温度范围为 $900-2000^{\circ}\text{C}$ 。〔29〕

国际实用温标 ($^{\circ}\text{C}$)	基准定点的极限误差	
	亮度温度 ($\lambda = 0.47-0.75$ 微米)	颜色温度
1063	0.3	—
1200	0.5	2.7
1400	0.6	3.0
1600	0.8	3.9
1800	1.4	4.7
2000	1.6	6.0
2300	2.1	8.0
2500	2.5	10.0
2800	—	12.0

美国标准局从1956年起开始研究光电高温计。据1966年报导, 研制的光电高温计用光束叠加器可延伸温度到 1256°C 和 794°C , 以得到金点时的辐射比。通过确定四块吸收玻璃的 A 值可将温标延伸到 1650°C 、 2330°C 、 3730°C 和 8570°C 。用光电高温计复现国际实用温标的精度比目测法提高五倍。〔30〕

国 际 实 用 温 标	标 准 偏 差
1063°C	±0.06°C
1256°C	±0.12°C
1650°C	±0.27°C
2330°C	±0.7 °C
3525°C	±2 °C

英国物理研究所从1956年开始研究光电高温计, 1969年发表了用光电高温计建立1063°C以上国际实用温标的文章。用5块铅合金扇形挡板可将温标延伸到2700°C。复现金点系采用以热电偶为标准, 在铜的空腔和直接盛金的石墨黑体中进行, 用专门设计的黑体灯复现温标, 其精度如下: [31]

国 际 实 用 温 标	误 差
1063°C	±0.1 °C
1270°C	±0.16°C
1550°C	±0.25°C
2700°C	±1.0 °C

澳大利亚标准研究所1971年发表的光电高温计的最后研究结果。分别用充气黑体灯和真空钨带灯复现国际实用温标。金点以上用镜式能量倍增器来确定辐射源与金点辐射的能量比来延伸温标。连续七次能量倍增可复现到1627°C, 再进行四次倍增可复现温标到2227°C。复现温标的精度如下: [32]