

内 容 简 介

本书较系统地介绍了热电偶的工作原理及其应用。全书包括温度测量的基本概念,热电偶的工作原理,热电偶材料及类型,热电偶的检定及性能试验,热电偶的使用及其误差,表面温度测量,钢水温度测量以及气流温度测量等八个部分。从热电偶的基础知识、工作原理、性能测试到热电偶的实际应用,均作了较详细的叙述。

本书可供从事热工测量的工人、检定人员和工程技术人员参考,也可作为高等工业院校有关专业和培训新工人的教学参考书。

热 电 偶

三〇四所 主编

*

国防·重工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

上海商务印刷厂排版

民族印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张 12 1/2 331 千字

1978年7月第一版 1978年7月第一次印刷 印数:00,000—21,000册

统一书号:15034·1677 定价:1.55元

(限国内发行)

目 录

绪 论	1
第一章 温度测量的基本概念	3
§ 1-1 温度及温度测量	3
§ 1-2 温标	4
§ 1-3 热力学温标	6
§ 1-4 1968 年国际实用温标	8
第二章 热电偶的工作原理	20
§ 2-1 热电现象	20
§ 2-2 基本定律及应用	28
第三章 热电偶材料及类型	38
§ 3-1 热电极的选配	38
§ 3-2 热电偶材料及发展动向	44
§ 3-3 绝缘材料及保护管材料	56
§ 3-4 热电偶类型	69
第四章 热电偶的检定及性能测试	87
§ 4-1 热电偶的清洗、退火和焊接	87
§ 4-2 分度方法	94
§ 4-3 热电偶的传递误差	107
§ 4-4 检定设备	114
§ 4-5 热电偶自动分度	123
§ 4-6 热电偶的主要特性和测试方法	140
第五章 热电偶的使用及其误差	151
§ 5-1 热电偶的参考端温度	151
§ 5-2 热电偶测量线路及其误差	169
§ 5-3 传热误差及其克服的方法	183
§ 5-4 动态响应误差及其克服的方法	210
§ 5-5 绝缘和干扰	217
§ 5-6 热电偶的安装及维修	230

第六章	表面温度测量	241
§ 6-1	表面热电偶的敷设	244
§ 6-2	运动物体的表面温度测量	253
§ 6-3	带电物体的表面温度测量	258
§ 6-4	减小测量误差的一些方法	260
第七章	钢水温度测量	263
§ 7-1	间断测量法	264
§ 7-2	连续测温	284
§ 7-3	用热电偶测量钢水含碳量(钢水凝固温度定碳)	293
第八章	气流温度测量	297
§ 8-1	高速气流的温度测量	298
§ 8-2	高温气流的温度测量	310
§ 8-3	总温热电偶	316
附录	328
附录一	物理量符号和计量单位代号	328
附录二	-272.22~5600°C 摄氏与华氏温度换算	331
附录三	-182.962~0°C 温度范围内 1968 年国际实用温标和 1948 年国际实用温标的差值 $t_{68} - t_{48}$	338
附录四	0~4000°C 温度范围内 1968 年国际实用温标和 1948 年国 际实用温标的差值 $t_{68} - t_{48}$	339
附录五	WREU、WREA 型热电偶	344
附录六	WRLB、WREU、WREA、WRLI 型热电偶	348
附录七	按 IPTS-68 的标准铂铑 ₁₀ -铂热电偶 $e_1\varphi_1(t)$ 、 $e_2\varphi_2(t)$ 、 $e_3\varphi_3(t)$ 数值表	349
附录八	国产直流电位差计型号及主要技术参数	371
附录九	国产检流计型号及主要技术参数	374
附录十	国产标准电池型号及主要技术参数	377
附录十一	镍铬-镍硅(镍铝)热电偶分度表	378
附录十二	铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	382
附录十三	铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆ 热电偶分度表	386
附录十四	镍铬-考铜热电偶分度表	391
主要参考文献	393

绪 论

随着生产与科学技术的发展,测量技术也在不断深化。人们在认识客观事物时,不可避免地要通过测量这一过程,从质和量两个方面去揭示事物的本质和规律性。所谓测量,就是通过物理实验来确定数量的过程。

温度测量在冶金、石油、化工、机械制造、国防以及国民经济其它部门都具有十分重要的意义。温度测量的方法是多种多样的,热电偶就是其中较常用的一种。

用热电偶测温具有以下几个特点:

(1) 测温准确度较高

测温时,由于热电偶和被测对象之间能有良好的热接触,因而能获得较高的测温准确度。特别是铂铑₁₀-铂热电偶,不仅测量准确度高,而且性能十分稳定,已被国际权度大会选定为国际实用温标中 630.74~1064.43°C 温度范围内的基准仪器。

(2) 结构简单,便于维修

原则上,只要将两种不同的导体或半导体的一端焊接(或绞接)在一起并对其他部分加以绝缘保护,便可组成一支完整的热电偶。因而热电偶结构简单,装配及维修也比较方便。

(3) 动态响应速度快

热电偶的测量端可以制成体积很小的接点,由于它的热容量小,所以动态响应速度很快。例如,某些针状或薄膜的小惯性热电偶,其时间常数可达毫秒,甚至微秒级。

(4) 测温范围较广

随着热电偶材料的发展,热电偶的测温范围也日趋广阔。目前,对于低至2K(-271°C)而高达2800°C甚至更高的温度测量,金属热电偶都可以胜任。对于一般的工程测温,都能基本满足要求。

(5) 可测量局部甚至“点”的温度

由于热电偶测量端可作得很小，当用热电偶测量某温场的温度分布和某一“点”的温度时，更能显示出它的优越性。

(6) 信号可远传，便于集中检测及自动控制

热电偶所产生的热电势，可通过连接导线远距离输送到显示仪表，这样便于实行集中巡回检测和自动控制。

由于热电偶具有上述特点，因此它在工业生产和科学实验中得到了广泛的应用。然而，热电偶测温也有其局限性。一方面，热电偶插入温场中会改变温场的原来状态，使被测温度会稍偏离原来的实际温度；另一方面，由于热电极材料受熔点的限制，测温上限不可能无限提高。所以，尽管热电偶结构比较简单，但要使测量值准确可靠，并不容易。测量时要根据热电偶的基本特性，经过周密的分析和反复的试验来选择恰当的热电偶和测量方法。

解放前，我国工业十分落后，热电偶材料根本不能生产，完全靠进口，温度测量和计量工作基本上都是“空白”。

在毛主席无产阶级革命路线的指引下，我国仪表工业战线广大职工坚持“独立自主，自力更生”的方针，勇于实践，使得我国的测温技术得到了很大发展，已经研制出许多新型的热电偶材料和温度计，并建立了各级标准，为我国热电偶和温度计的生产、使用以及标准传递提供了统一的规范。

随着测试技术的发展，要求热电偶材料的性能更加稳定，结构更加紧凑，体积更小，以适应各种特殊测温中的敷设。对于测温材料，在向高温测量方面发展的同时，还要发展低温甚至超低温用的热电偶材料。

本书是一部热电偶测温技术的参考书。作者试图从热电偶的基础知识、性能测试到实际应用作较详细的叙述，使读者对热电偶测温有一个比较系统的了解。

书中用到的物理量名称、符号和计量单位代号，主要参考国际单位制 (IS) 及《机械工程手册》第二章“计量单位和计量单位制”。物理量的名称和技术术语力求科学性并兼顾习惯性。物理量和数学符号用拉丁文和希腊文字母表示 (见本书附录一)。

第一章 温度测量的基本概念

§ 1-1 温度及温度测量

温度是一个很重要的物理参数,钢铁的冶炼,石油的分馏,塑料的合成以及农作物的生长等等都必须在一定的温度范围内进行。各种构件、材料的体积、电阻、强度以及抗腐蚀等物理化学性质,一般也都会随温度而变化。人们利用各种能源为人类服务,也往往是使某些介质通过一定的温度变化来实现的。所以在生产和科学实验中,人们经常会碰到温度和温度测量的问题。

什么是温度呢?

将冷热不同的两物体放在一起,热量将从热物体传递给冷物体。这时,两物体的热状态势必随之发生相应的变化。经过一定时间以后,两物体将随热交换达到动平衡而处于相同的热状态。对于这一共同的热状态,可用一个物理参数——温度来表示。温度就是反映物体冷热程度的一个状态参数,或者说是物体冷热程度的一种度量,温度愈高则物体愈热,反之亦然。

温度也可以用分子热运动的概念来说明。大家知道,一滴墨水在热水中扩散速度要比在冷水中快。其原因就在于,温度愈高分子运动愈快。所以,从微观上说,温度又是度量分子运动平均动能大小的一个尺度。

温度的高低,人们时常凭借自身的感觉来判断,通常用烫、热、温、凉、冷、冰冷等等来形容冷热的程度。但是仅凭主观感觉来判断温度既不科学,也无法定量,而且容易出现差错。例如,厂房中的一把铁锤,尽管铁锤和木柄具有相同的温度,但由于铁锤比木柄传热快,所以人们就会有铁锤比木柄温度低的错觉。为此,物体的温度通常是用专门的仪器——温度计来客观地进行测量的。

用温度计测量温度是基于下列现象:

(1) 物质的某些物理量,如体积、电阻、热电势等等均随温度而变化,而且在一定条件下,这些物理量的每一数值都对应着一定的温度。因此我们就可以通过测量这些物理量来达到测量温度的目的。例如,水银温度计和电阻温度计,分别是通过测量水银柱高低和电阻值大小来确定物体温度的。热电偶则是通过测量热电势大小来确定物体温度的。通常我们将水银柱高低和热电阻、热电势大小等等用以测量温度的物理参数称为测温参数,相应的物质(如水银、热电阻、热电偶等)便称为测温质。

(2) 热平衡的诸物体具有相同的温度。温度计所指示的只能是温度计本身的温度。例如,用水银温度计来测量滑油的温度时,水银柱上升到 60°C 的刻度处,这只表明水银温度计贮囊的温度为 60°C 。然而,我们需要知道的却是被测对象(滑油)的温度。于是就提出这样一个问题,被测对象的温度到底能否用温度计的温度来表示呢?处于热平衡的诸物体具有相同温度的规律,即热平衡定律(也称热力学第零定律)就回答了这个问题。当温度计与被测对象之间的热交换达到动平衡时,两者就具有相同的温度,因此完全可以用温度计的温度来表示被测对象的温度。

任何一支温度计,在用来测量温度之前,首先要按照一定的规范对它进行刻度(分度):将温度计置于某些已知温度下,测定相应的测温参数 x ,求得 x 与温度 t 的对应关系。这种对应关系可绘成曲线或制成表格(分度表),也可用数学公式来表示。当用温度计测量温度时,只要测出测温参数 x ,便可根据分度时确定的 $x-t$ 对应关系,推算出相应的温度值来。

§ 1-2 温 标

对于测温参数、参考点及测温单位“度”的不同规定,便形成了各种温标。温标的种类很多,表 1-1 仅列举了过去广泛运用的两种经验温标,即摄氏温标和华氏温标。这两种温标都有很大的弊病。首先,水银温度计的汞柱高与温度的对应关系,不符合线性的

表 1-1 经验温标

温 标	摄 氏	华 氏
符 号	'C'	'F'
测温参数	$h_{\text{汞}}$	$h_{\text{汞}}$
选用参考点	冰点: 0°C 水沸点: 100°C	冰点: 32°F 水沸点: 212°F
温标方程	$t = \frac{h-h_1}{\frac{h_2-h_1}{100}}$	$t = 32 + \frac{h-h_1}{\frac{h_2-h_1}{180}}$
一度的概念	冰点与水沸点之间水银柱高度等分的 1/100 为 1°C	冰点与水沸点之间水银柱高度等分的 1/180 为 1°F
换算公式①	$t_C = (t_F - 32) \times \frac{5}{9}$	$t_F = \left(t_C \times \frac{9}{5}\right) + 32$
温度关系	水沸点	100°C
	冰点	0°C
	绝对零度	-273.15°C

① 摄氏与华氏温度换算详见附录二(458~5000°C)。

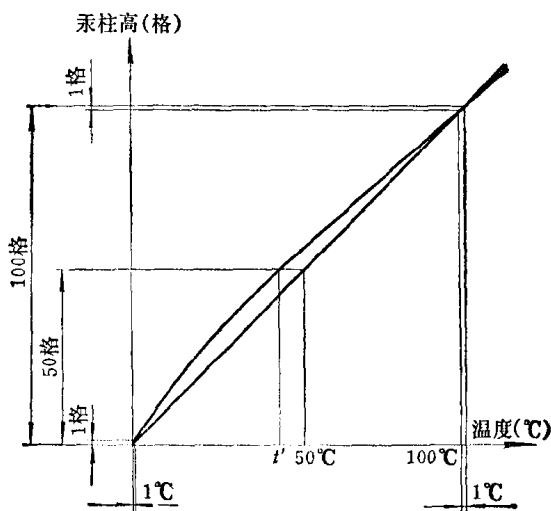


图 1-1 汞柱高-温度曲线

规定,因此,除参考点(水的冰点及沸点)以外的其它示值,就不是物体的真实温度。如图 1-1 所示,下凹曲线为汞柱高-温度关系曲线。可见,按摄氏温标刻度的 50 格处所对应的温度就不等于 50°C ,而是 t' 。而且 t' 的具体数值还随水银温度计玻璃品种的变化而变化。所以这些温标的量值不仅不准确,而且互不一致,十分混乱。

此外,由于水银温度计的汞柱高只有在汞的凝固点至沸点的范围内才有意义,同时还受温度计玻璃软化温度的影响,因此,由此建立的温标有着很大的局限性。

如上所述,摄氏温标和华氏温标因依赖于测温质的物性,所以无法满足客观的需要。为了适应生产和科学实验的需要,就要求建立一种与测温质性质无关的、统一的温标,这就是由热力学第二定律直接引出的热力学温标。

§ 1-3 热力学温标

卡诺定理指出:卡诺机的热效率仅与两热源的温度有关,而与工作物质的性质无关。为了便于说明问题,我们用蒸气轮机的工作过程来说明热机的概念。如图 1-2 所示,工作时,水槽 1 中的水,由泵 2 送至锅炉 3 中,经加热成过热蒸气后,进入蒸气轮机 4 做功,然后带动发电机 5 旋转发电。由蒸气轮机排出的蒸气至冷凝器 6 冷凝,然后由泵 7 送回水槽 1,这就是蒸气轮机工作的全过程。蒸气轮机所作的功是由热转换来的,转换时,不仅由锅炉中吸热,还要向冷凝器放热,我们将这种变热为功的机器称为热机。将锅炉及冷凝器分别称作高温热源及低温热源或统称为热源。热力学第二定律具体地总结了热机的工作规律指出:只有一个热源的热机是无法制造的。当热机工作时,不仅要由高温热源吸收热量 Q_1 ,而且还必须向低温热源放出热量 Q_2 ,因此热机仅将 $(Q_1 - Q_2)$ 的热量转变为功。它与吸收的热量 Q_1 之比值即为热机的热效率 η_t ,它表示吸收的热量中有多少变成了功

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1-1)$$

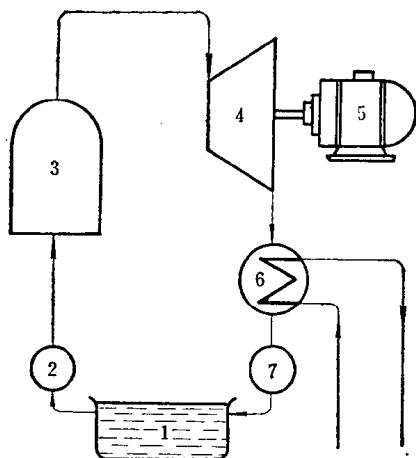


图 1-2 蒸气轮机工作示意图

对于完全理想的卡诺机来说，它的吸热和放热都是在等温条件下进行的。如果高温热源和低温热源的温度分别为 T_1 、 T_2 ，则它的热效率又可写成

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1-2)$$

由于式(1-1)与(1-2)是卡诺机热效率的两种表述，所以

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1-3)$$

由式(1-3)可知，卡诺机的换热量 Q 随热源温度 T 而定。因此，人们便可利用 Q 来测量温度。所谓热力学温标就是取卡诺机换热量 Q 为测温参数的一种温标。具体来说，它是取水三相点为参考点，且定义该点的温度为 273.16K ，相应的换热量为 Q_{\bullet} 。当测得换热量 Q 以后，便可根据式(1-4)求得相应的温度

$$T = Q \frac{273.16}{Q_{\bullet}} \quad (1-4)$$

根据热力学第二定律可严格证明，卡诺机的热效率仅与两热源的温度有关，而与工作物质的性质无关。因此，利用卡诺机换热量来测量温度也将与测温质的性质无关，它可全面地满足独立统

一的要求。所以说,热力学温标是最科学的温标。为此,国际权度大会规定,热力学温标为基本温标。目前国内外所用的摄氏、华氏等温标,实际上只是延用了过去的名称,而在内容上都已根据热力学温标给以了新的概念。

理想的卡诺机是无法实现的,所以热力学温标是一种理论温标,它存在着实验上的困难。但是,它可以利用理想气体温度计等仪器来实现。所谓理想气体是指气体分子间无相互吸引力和分子体积可忽略不计的气体。氢、氦、氮等实际气体在压力较小的条件下,其性质很接近于理想气体。因此可以运用这些气体来制作气体温度计,并加以必要的修正便可复现热力学温标。

气体温度计的结构复杂,使用麻烦,它受测温质的测温范围所限制,所以必须建立一种既符合热力学温标而在使用上又简便的温标,即国际实用温标。在实际工作中,人们都是利用国际实用温标来复现热力学温标的。

§ 1-4 1968 年国际实用温标

一、国际实用温标

国际实用温标是为了实用而建立起来的一种国际协议性温标,它不能取代热力学温标。国际实用温标应具备以下三条基本原则:

- (1) 尽可能与热力学温标相一致(和热力学温度间的差值,在当时的测量准确度之内);
- (2) 复现精度高,各国都能以很高的准确度来复现同样的温标,以保证温度量值的统一;
- (3) 所规定的标准仪器使用方便。

由于国际实用温标是用来复现热力学温标的,因此,它本身不存在规定参考点和测量单位等问题。其中心任务是根据上述基本原则,选择合适的标准仪器,并找出测温参数(如热电势、热电阻等)与热力学温度的对应关系。这个对应关系一般用数学公式(即

插补公式)表示。为此,就需要给出公式的形式,并进而通过各固定点温度的给定值确定插补公式中的系数。因此,标准仪器、固定点温度和插补公式便是构成国际实用温标的三个要素。

热力学温标的量值是物体温度的真值,每个物体的热力学温度是一种客观的存在。人们对于该物体的温度测量是不断地随着科学技术的发展和知识水平的提高而愈来愈趋近于真值的,因此,自1927年建立国际温标以来,为了更好地符合热力学温标,曾先后作了多次的修改。1948年对“1927年国际温标”(ITS-27)作了九处重大修改,定名为“1948年国际温标”(ITS-48);1960年又对“1948年国际温标”作了六点修正,定名为“1948年国际实用温标”(IPITS-48);1968年第十三届国际权度大会决定对“1948年国际实用温标”作八处重要的修正,建立了现行的“1968年国际实用温标”(IPITS-68),它与(IPITS-48)在 $-182.962\sim 4000^{\circ}\text{C}$ 之差值,见附录三、附录四。

世界各国自1969年开始陆续采用了“1968年国际实用温标”。我国目前也采用“1968年国际实用温标”,停止使用“1948年国际实用温标”。

二、“1968年国际实用温标”的主要内容

1. 度及其表示法

“1968年国际实用温标”规定以热力学温度为基本温度,其符号为 T ,相应的单位是开尔文,符号为 K 。定义开尔文一度等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

温度也可以用摄氏温度表示,摄氏温度的符号为 t ,相应的度仍与过去一样,用 $^{\circ}\text{C}$ 表示。但概念上已按下式重新定义:

$$t = T - 273.15 \quad (1-5)$$

工程上,一般近似取

$$t = T - 273$$

2. 固定点、标准仪器及插补公式

“1968年国际实用温标”是以定义固定点的温度给定值,以及

在这些固定点分度的标准仪器来复现热力学温标的。固定点之间的温度根据标准仪器的插补公式来确定。

定义固定点是指在一定条件下，某些高纯物质的平衡状态所具有的温度。固定点的温度值除水三相点是定义的外，都是根据各国标准气体温度计来测定，并以机率最高的数值来给定的。例如：在一个标准大气压下，纯金的液态和固态间的平衡温度如表 1-2 所列。“1968 年国际实用温标”给定金凝固点的热力学温度值为 $1064.43 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ，就是综合表 1-2 的结果。

表 1-2 气体温度计测定金点

国 名	测 定 日 期	金 凝 固 点
西 德	1961 年	$1064.48 \pm 0.1^\circ\text{C}$
苏 联	1959 年 1961 年	$1064.5 \pm 0.2^\circ\text{C}$ $1064.4 \pm 0.2^\circ\text{C}$
日 本	1956 年	1063.69°C

“1968 年国际实用温标”采用 11 个定义固定点为基准点(见表 1-3)。另外还有 27 个固定点，其复现精度不及定义固定点高，它作为第二类参考点(见表 1-4)。

“1968 年国际实用温标”采用三种标准仪器：基准铂电阻温度计，基准铂铑₁₀-铂热电偶和基准光学高温计(见表 1-5)来分段复现热力学温标。现分别作简要的介绍：

(1) 基准铂电阻温度计用于 $13.81\text{K} \sim 630.74^\circ\text{C}$ 温域。温度计的电阻元件由高纯铂丝制成，其电阻比 $W(T_{68})$ 定义为

$$W(T_{68}) = R(T_{68})/R(273.15\text{K}) \quad (1-6)$$

式中 T_{68} ——为 IPTS-68 定义的温度；

$R(T_{68})$ ——为铂电阻温度计在 T_{68} 时的电阻；

$R_{(273.15)}$ ——为铂电阻温度计在 273.15K 时的电阻。

由于基准铂电阻温度计的电阻-温度特性曲线受纯铂丝中存

表 1-3 “1968 年国际实用温标”定义固定点

平衡状态	$T_{68}(\text{K})$	$t_{68}(\text{°C})$	新旧温 标差值 $t_{68}-t_{48}(\text{°C})$	用热力学温度规 定的温度值的不可 靠性(K)
平衡氢三相点	13.81	-259.34	—	0.01
平衡氢在 25/76 标 准大气压下的沸点	17.042	-256.108	—	0.01
平衡氢沸点	20.28	-252.87	—	0.01
氦沸点	27.102	-246.048	—	0.01
氧三相点	54.361	-218.789	—	0.01
氧沸点	90.188	-182.962	+0.008	0.01
水三相点	273.16	0.01	0	定义
水沸点	373.15	100	0	0.005
锌凝固点	692.73	419.58	+0.075	0.03
银凝固点	1235.08	961.93	+1.13	0.2
金凝固点	1337.58	1064.43	+1.43	0.2

注：① 除各三相点与平衡氢(17.042K)外，温度值都是指在一个标准大气压(101325 牛顿/米²)下的平衡态；

② 锡的固态和液态的平衡温度(锡凝固点)给定值为 $t_{68}=231.9681\text{°C}$ ，可用
来代替水沸点。

在的化学杂质、物理缺陷和内应力的影响，因此 IPTS-68 中规定，制造基准铂电阻温度计的纯铂丝应是无应变的，退火的，电阻比 $[R(373.15\text{K})/R(273.15\text{K})]$ 不低于 1.39250 的高纯铂丝。

基准铂电阻温度计的插补公式，见表 1-5。

在 630.74~0°C 温域，是采用卡伦达尔公式及其修正式。

在 13.81~273.15K 低温范围，铂电阻温度计的电阻-温度特性曲线很复杂，国际计量局综合了几个国家的铂电阻温度计的特性曲线，在此基础上制定了基准铂电阻温度计在这一温域内的标准插补公式。由于这一公式为 20 次的高阶方程，计算繁杂，为了便于应用，国际计量局制订了从 13.81~273.15K 范围的铂电阻温度计的标准参考函数表 $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})^{\ominus}$ 。实验表明，各国的基

[⊖] 国际计量局制订了准确到 0.0001K 的详细参考表，详见中国计量科学研究院编“1968 年国际实用温标及其计算方法”。

表 1-4 第二类参考点

平 衡 状 态	国际实用温标	
	$T_{68}(\text{K})$	$t_{68}(^{\circ}\text{C})$
正常氢固态、液态、汽态平衡(正常氢三相点)	13.956	-259.194
正常氢液态和汽态间平衡(正常氢沸点)	20.397	-252.753
$\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{J}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2 \quad (1-23)$		
$A=1.734791, B=-44.62368\text{K},$ $C=0.0231869\text{K}^{-1}, D=-0.000048017\text{K}^{-2}$ 适用于 13.956~30 K 范围。 氦固态、液态、汽态间平衡 (氦三相点)	24.555	-248.595
氦液态、汽态间平衡 $\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2 \quad (1-24)$		
$A=4.61152, B=-106.3851\text{K},$ $C=-0.0368831\text{K}^{-1}, D=4.24892 \times 10^{-4}\text{K}^{-2}$ 适用于 24.555~40 K 范围。 氮固态、液态、汽态平衡 (氮三相点)	63.148	-210.002
氮液态、汽态间平衡(氮沸点) $\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + c \lg \frac{T_{68}}{T_0} + DT_{68} + ET_{68}^2 \quad (1-25)$	77.348	-195.802
$A=5.893139, B=-404.13105\text{K},$ $C=-2.3749, D=-0.0142505\text{K}^{-1},$ $E=72.5342 \times 10^{-6}\text{K}^{-2}$ 适用于 63.148~84 K 的温度范围。 氧液态、汽态间平衡 $\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + c \lg \frac{T_{68}}{T_0} + DT_{68} + ET_{68}^2 \quad (1-26)$		
$A=5.961546, B=-467.45576\text{K},$ $C=-1.664512, D=-0.01321361\text{K}^{-1},$ $E=50.8041 \times 10^{-6}\text{K}^{-2}$ 适用于 54.361~94 K 温度范围。 二氧化碳固态和汽态间平衡 (二氧化碳的升华点)	194.674	-78.476

(续)

平 衡 状 态	国际实用温标	
	$T_{63}(K)$	$t_{63}(^{\circ}C)$
$T_{63} = \left[194.674 + 12.264 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 9.15 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 \right] K \quad (1-27)$		
适用于 194 K ~ 195 K 温度范围。		
汞固态、液态间平衡(汞凝固点)	234.288	-38.862
冰和空气饱和水的平衡(冰点)	273.15	0
苯氧基苯(二苯醚)固态、液态、汽态间平衡 (苯氧基苯三相点)	300.02	26.87
苯甲酸固态、液态、汽态间平衡 (苯甲酸三相点)	395.52	122.37
铟固态、液态间平衡(铟凝固点)	429.784	156.634
铋固态、液态间平衡(铋凝固点)	544.592	271.442
镉固态、液态间平衡(镉凝固点)	594.258	321.108
铅固态、液态间平衡(铅凝固点)	600.652	327.502
汞液态、汽态间平衡(汞沸点)	629.81	356.66
$t_{63} = \left[356.66 + 55.552 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 23.03 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 14.0 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] ^{\circ}C \quad (1-28)$		
适用于 $p = 90 \times 10^3 \text{ N/m}^2 - 104 \times 10^3 \text{ N/m}^2$, 硫液态、汽态间平衡(硫沸点)	717.824	444.674
$t_{63} = \left[444.674 + 69.010 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 27.48 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 19.14 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] ^{\circ}C \quad (1-29)$		
适用于 $p = 90 \times 10^3 \text{ N/m}^2 - 104 \times 10^3 \text{ N/m}^2$		
铜-铝合金易熔点固态、液态间平衡	821.38	548.23
铈固态、液态间平衡(铈凝固点)	903.89	630.74
铝固态、液态间平衡(铝凝固点)	933.52	660.37
铜固态、液态间平衡(铜凝固点)	1357.6	1084.5
镍固态、液态间平衡(镍凝固点)	1728	1455
钴固态、液态间平衡(钴凝固点)	1767	1494
钯固态、液态间平衡(钯凝固点)	1827	1554
铂固态、液态间平衡(铂凝固点)	2045	1772
铈固态、液态间平衡(铈凝固点)	2236	1963
铈固态、液态间平衡(铈凝固点)	2720	2447
钨固态、液态间平衡(钨凝固点)	3660	3387

表 1-5 “1968 年国际

温度范围	标准仪器	插 补 公 式	
1064.43°C 以 上	基准光学 高温计	$\frac{L_{\lambda}(T_{68})}{L_{\lambda}[T_{68}(\text{Au})]} = \frac{\exp\left[\frac{C_2}{\lambda T_{68}(\text{Au})}\right] - 1}{\exp\left[\frac{C_2}{\lambda T_{68}}\right] - 1}$	
1064.43 ~630.74°C	基 准 铂铱 ₁₀ -铂 热 电 偶	$E_{(t_{68})} = a + bt + ct^2$ $E_{(\text{Au})} - E_{(\text{Ag})} = 1183 \mu\text{V} + 0.158[E_{(\text{Au})} - 10300 \mu\text{V}] \pm 4 \mu\text{V}$ $E_{(\text{Au})} - E_{630.74} = 4766 \mu\text{V} + 0.631[E_{(\text{Au})} - 10.300 \mu\text{V}] \pm 8 \mu\text{V}$	
630.74~0°C	基 准 铂 电 阻 温 度 计	$t_{68} = t' + 0.045 \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right)$ $\left(\frac{t'}{419.58^\circ\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{630.74^\circ\text{C}} - 1 \right)$ $t' = \frac{1}{\alpha} [W(t') - 1] + \delta \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right)$ $W_{t'} = R(t') / R(0^\circ\text{C})$	
0°C ~90.188K		$\Delta W(T_{68}) = \Delta W_4$ $= A_4 t_{68} + C_4 t_{68}^3 (t_{68} - 100)$	
90.188 ~54.361K		$\Delta W(T_{68}) = \Delta W_3$ $= A_3 + B_3 T_{68} + C_3 T_{68}^2$	
54.361 ~20.28K		$\Delta W(T_{68}) = \Delta W_2$ $= A_2 + B_2 T_{68} + C_2 T_{68}^2 + D_2 T_{68}^3$	
20.28 ~13.81K		$\Delta W(T_{68}) = \Delta W_1$ $= A_1 + B_2 T_{68} + C_1 T_{68}^2 + D_1 T_{68}^3$	