

■ 科学技术文献出版社

温度测量与仪表

——热电偶和热电阻

■ 游伯坤 阚家钜 江兆章 编著



前 言

随着科学技术的迅速发展,生产过程的日益自动化,将大大提高产品质量和劳动生产率、降低材料和能源的消耗,从而提高了对科学实验和生产过程中每一个参数测量精度的要求。在国民经济各部门,特别是大、中型企业的工艺流程中,温度是最重要的参数之一。据不完全统计,它平均约占热工参数测量点的60%左右。所以,温度检测的质量,往往在很大程度上直接影响着生产过程的好坏和产品质量的优劣。

目前国内外温度检测仪表中,虽然品种繁多,原理各异,但在工业和国民经济各部门中,最广泛使用的仍是热电偶和热电阻。它们作为温度传感器,通常用来和显示仪表或调节器等配套,直接测量和控制各种生产过程中从 $-273\sim+2800^{\circ}\text{C}$ 范围内液体、蒸气、气体介质和固体等的温度。它们的产量和产值都很大,约占整个温度传感器的60%,真可谓是“量大面广”的温度测量中的“常规武器”。它们之所以能够占据这样重要的地位,完全是由于它们本身的特点和具有不可比拟的优越性所决定的。

1. 接触式测温,受外界影响小,测温准确、可靠;
2. 可以远传,便利集中测量、控制和调节;
3. 结构简易,维修方便;
4. 价格便宜;
5. 品种齐全,适应性强,测量范围广;
6. 具有统一的分度表(热电势或电阻与温度的关系特性),便于互换和数据处理。

解放前,我国整个仪表工业是个空白。全国解放后,在沿海个别城市建立了少数的温度仪表修配工厂,直到1958年以后,我国才正式建立了温度仪表——热电偶和热电阻制造工厂。经过以后的发展,已初具规模。十一届三中全会以后,在改革、开放政策的推动下,热电偶和热电阻的生产厂家雨后春笋般发展起来,基本上满足了目前一般工业的需要。但在品种、质量、性能和规格等方面,还远不能适应国民经济各部门提出的要求,亟待发展和提高。

本书是我们在编写《机电工程手册》、《工业自动化仪表丛书》有关内容和对热电偶、热电阻进行统一设计与实验研究所积累的技术资料的基础上,参阅了国内外有关资料编写而成的。在编写和出版过程中,曾得到了许多单位和有关同志的大力支持与热情帮助,在此谨致衷心的感谢。但由于我们水平有限,缺乏经验,书中难免存在缺点和错误,敬请广大读者不吝赐教。

目 录

前言	VI
第一章 温度、温标和热交换	1
一、温度的概念	1
二、温标建立原理	2
三、热力学温标	3
四、气体温标	4
五、国际实用温标	5
六、温标数值从标准到工作仪表的传递	8
七、热交换概述	10
(一) 基本概念	10
(二) 热交换方式	11
第二章 热电偶	14
一、热电偶的作用原理	14
(一) 热电势的产生	14
(二) 热电势的组成	16
(三) 关于热电偶热电势的结论	17
二、热电偶的四个定律	17
(一) 均质回路定律	17
(二) 中间金属材料定律	18
(三) 中间温度定律	19
(四) 热电偶组成定律	22
三、常用热电偶材料	24
(一) 对热电偶材料的基本要求	24
(二) 常用热电偶材料及其基本参数和性能	25
四、影响热电偶热电势的因素	39
(一) 绝缘电阻的影响	40
(二) 热电极中机械应力的影响	43
(三) 外部压力的影响	44
(四) 电离辐射和磁场的影响	44
(五) 各种气氛对热电偶的影响	46
(六) 延长热电偶使用寿命的几种方法	50
五、热电偶感温元件的结构和制造	52

(一) 热电偶感温元件的结构.....	52
(二) 热电偶感温元件测量端的焊接.....	53
(三) 热电偶感温元件的清洗与退火.....	57
六、热电偶参比端的温度补偿和补偿导线.....	58
(一) 计算法.....	58
(二) 参比端温度恒定法.....	61
(三) 补偿电桥法.....	61
(四) 多点补偿法.....	64
(五) 补偿导线法.....	65
七、热电偶的不同联接方式及其应用.....	71
(一) 一支热电偶配用一只显示仪表.....	72
(二) 热电偶的串联.....	72
(三) 热电偶的并联.....	73
(四) 差动热电偶.....	73
(五) 多点热电偶.....	75
(六) 热电偶的偏差指示线路.....	75
(七) 两个测量仪表的并联.....	76
八、热电偶热电势的检验.....	79
(一) 检测方法.....	79
(二) 比较法检验的标准仪器及设备.....	81
(三) 检验程序.....	83
(四) 升温测试和降温测试的讨论.....	88
第三章 热电阻	90
一、热电阻的作用原理.....	90
(一) 金属导体电阻与温度的关系.....	90
(二) 热电阻的作用原理.....	92
二、常用的热电阻材料.....	93
(一) 概述.....	93
(二) 常用的热电阻丝材料.....	95
(三) 常用的热电阻骨架材料.....	100
三、热电阻的基本参数和特性.....	103
(一) 热电阻的基本参数.....	103
(二) 热电阻的基本特性.....	106
四、热电阻感温元件的结构和制造.....	108
(一) 铂热电阻感温元件.....	108
(二) 铜热电阻感温元件.....	113
(三) 镍热电阻感温元件.....	116
(四) 钨铁热电阻感温元件.....	116
五、热敏电阻.....	117

(一) 概述	117
(二) 热敏电阻的电阻与温度特性	117
(三) 热敏电阻的电流及电压特性	119
(四) 热敏电阻的电阻与温度特性的线性化	119
(五) 热敏电阻的结构	121
六、热电阻的测量线路	123
(一) 平衡电桥	123
(二) 不平衡电桥	126
(三) 动圈仪表	127
(四) 电位差计线路	128
(五) 偏差测量(或固定电阻分量补偿)线路	129
(六) 温差测量线路	130
七、影响热电阻误差的基本因素	132
(一) 热电阻的基本误差	132
(二) 热电阻的附加误差	135
八、工业热电阻的检验	145
(一) 电测装置的选择	145
(二) 检定设备	146
(三) 检验和计算	146
(四) 检验工业热电阻的某些方法误差	153
(五) 精密测量时的几个问题	154
第四章 热电偶和热电阻的结构型式	156
一、各工业部门被测量对象及环境条件概述	156
(一) 冶金工业	156
(二) 电力工业	156
(三) 石油和化学工业	156
(四) 机械工业	156
二、普通工业热电偶和热电阻的结构	156
(一) 普通工业热电偶和热电阻的结构型式	156
(二) 接线盒	158
(三) 保护管	160
三、防爆热电偶和热电阻的结构	165
(一) 概述	165
(二) 隔爆型热电偶和热电阻的设计条件	166
(三) 隔爆接线盒的设计	167
(四) 接线座的设计	167
(五) 锁紧装置的设计	168
(六) 防爆标志及其它	168
(七) 使用注意事项	169

第五章 铠装热电偶和热电阻	170
一、铠装热电偶.....	170
(一) 铠装热电偶材料的设计与制造.....	171
(二) 铠装热电偶材料的基本参数及技术要求.....	178
(三) 铠装热电偶的结构与制造.....	180
(四) 铠装热电偶的故障形式和因素分析.....	188
二、铠装热电阻.....	189
(一) 概述.....	189
(二) 铠装热电阻的特点.....	190
(三) 铠装热电阻的基本参数.....	190
(四) 铠装热电阻的封焊.....	191
第六章 热惰性及其保护管设计	193
一、热惰性.....	193
(一) 基本概念.....	193
(二) 时间常数.....	193
(三) 确定时间常数的方法.....	196
(四) 测定时间常数的装置及其操作.....	198
二、保护管设计与强度计算.....	200
(一) 设计要求.....	200
(二) 强度计算.....	200
第七章 接触法测温的误差及其对策	211
一、温度测量的一般原则.....	211
二、沿感温器保护管的热量流失所引起的误差.....	211
(一) 减小 $(t_1 - t_2)$	214
(二) 减小 $\frac{b_2}{b_1}$	214
(三) 增大 $b_1 l_1$, 减小 $b_2 l_2$	215
三、辐射热交换所发生的误差.....	215
四、高速流动介质温度测量的误差.....	218
五、动态温度测量的误差.....	220
(一) 动态温度测量误差的分析.....	220
(二) 减小动态测量误差的途径.....	222
六、固体表面温度的测量和误差.....	226
(一) 静态固体表面温度的测量.....	227
(二) 旋转物体表面温度的测量.....	230
第八章 热电偶、热电阻的安装和维修	233
一、热电偶、热电阻的安装方式.....	233
(一) 热电偶、热电阻安装的一般要求.....	233
(二) 热电偶、热电阻安装方式举例.....	234

二、故障和维修	235
(一) 热电偶的故障和维修	235
(二) 热电阻的故障和维修	237
第九章 热电偶和热电阻分度表	241
一、热电偶和热电阻的允差	241
(一) 常用的热电偶的允差	241
(二) 常用的热电阻的允差	241
二、我国常用的定型热电偶分度表(参比端温度为 0℃)	242
三、已被淘汰的几种热电偶分度表(参比端温度为 0℃)	271
四、我国工业铂热电阻分度表	288
五、已被淘汰的铂热电阻分度表	294
六、我国工业铜热电阻分度表	298
七、已被淘汰的铜热电阻分度表	299
八、非定型的热电偶分度表(参比端温度为 0℃)	300
附录一 中华人民共和国法定计量单位	305
附录二 铂铑 ₁₀ -铂热电阻函数 $f(e, t)$ 数值表	311
附录三 热电偶、热电阻型号命名表	321

第一章 温度、温标和热交换

一、温度的概念

温度是工业生产和科学技术中最常遇到的一个参数。“温度”术语是表征物体冷热程度的数值。由人们的直接感觉，可以感知物体的冷热，但是只凭我们的直接感觉是不能定量地表示物体的冷热程度的，而在物体很热或很冷的情况下，连续地、定量地确定它们的冷热程度，事实上是不可能的。因此，要正确地、定量地表示出物体的冷热程度，必须对温度的概念给出一个严格的科学定义。

温度概念的建立及温度定量的测量，都是以热平衡现象为基础的。温度的特性，可定性地用物体间热交换的事实来说明。如果两个具有不同温度并与其它物体隔开的物体，处于相互热接触状态中，那么，比较热的物体就要把热能传送给比较冷的物体，同时它自身也就逐渐变冷，而比较冷的物体，则因由比较热的物体获得了热能而逐渐变热。这种由一个物体向另一个物体传递热能，从而温度也同时发生变化的过程，一直要到它们之间暂时达到热平衡，于是温度也同时达到平衡的状态为止。因此，在物体间具有热交换的情况下，温度确定热能传递的方向。

由热平衡定律知，如果某一个物体同第二个和第三个物体同时处于热平衡状态中，那么，第二个和第三个物体彼此处于同样的热平衡中。而处于同一热平衡状态的物体，必定拥有某一共同的物理性质，表征这个物理性质的量就是温度。热平衡不仅给出了温度的概念，并且指明了比较温度的方法。因为处在同一热平衡状态下的物体都有相同的温度，所以我们比较各个物体的温度时，不需要各个物体都相互直接接触，而只需借助某一个辅助的物体，把它作为“标准”分别与各个物体来比较就够了，并且保证了能够以某一单位制来测量物体的温度。这个作为标准的物体就称为温度计。

比较热的物体在它和较冷物体进行热交换时，温度的降低表征着这样的事实，即温度是确定物体自身内能的储存。内能的携带者是物体的分子，它的位能和动能取决于温度。

因为温度既然是动能的量度，所以，它亦即是物质运动速度的量度，于是，在自然界中应该存在着极限温度。根据相对论原理得到，物质不可能具有超过光速的速度。据此，在自然界中，可能的极限温度为 $\sim 10^{12}$ K。实际上，在各种过程中所有被观察到的温度均在 $0\sim 10^{12}$ K范围内。

对于大多数物理量来说，测量过程在于用实验确定被测量与作为测量单位的量彼此间的数量比例关系。具有同某些其它物理量测量一样的温度测量，其情况就不一样了，在不同的温度下，物体具有不同的能量状态和不同的物理性能。所以1度不可视为温度测量的单位，它只是代表温度标尺的比例尺，而温度测量的过程，也就是确定被测温度值在温度标尺上的位置。

二、温标建立原理

热力学定律只是原则上给出了测量温度的方法，要定量地确定温度数值，还必须对作为温度计的物体的某些性质进行研究，我们把能作为测量使用的物质叫作测温物质。大家都知道，液体、气体及固体都可以用来作为测温物质，因为它们的某些性质都随温度在变化。通过对测温物质的某种物理性质变化的测量，就可以判断物体的温度。用来判断物体温度变化的一些物理性质，应能连续地、单值地随温度成线性或按某一规律变化而又与其它因素无关，并且这个物理量又便于测量。实际上，在物质的特性中，根本没有一种性质能完全满足这些要求。

“温度标尺”简称温标，此术语乃是温度数值的表示方法，是用来衡量物体温度的标尺。各种各样的温度计的数值，都是由温标决定的。所以，可以说温标就是温度的标尺。

在建立温标的时候，首先必须选定一个分段法，即选择任意两个基本点或称固定点。它应该是容易被复现的温度。温度的不变性可以普通物理概念为基础，例如纯物质的沸腾和凝固温度。其次再选定一种测温物质的某一物理特性，规定出这特性随温度变化的关系。后者即是此种温标的物理基础。

选定的固定点温度，随意地写为量值 t_1 和 t_2 ，温度范围 $t_2 \sim t_1$ 通常称作温标的基本间隔。把它除以某个整数 N 等分之，并把基本间隔的 $\frac{1}{N}$ 部分认作一个单位或者标尺的比例尺，同时把它写成“度”的名义。因此

$$1 \text{ 度} = \frac{t_2 - t_1}{N} \quad (1-1)$$

接着选择某个物理特性或者象通常所说的“测温特性” E ，并假定 E 同温度呈线性关系，也就是说遵从等式：

$$dt = K dE \quad (1-2)$$

式中 K —— 比例系数

将方程式 (1-2) 积分得：

$$t = KE + D \quad (1-3)$$

式中 D —— 常数

为了确定常数 K 和 D ，利用上面所选择的两个温度。实际上，在温度 t_1 情况下，确定了物理特性 K_1 值，而在另一个温度 t_2 时，确定了它的 K_2 值后，根据方程式 (1-3) 可获得

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{E_2 - E_1} (E - E_1) \quad (1-4)$$

这最后一个方程式称作温标方程式。

在温度计的发展史上，曾经出现过好几种不同的温标。例如摄氏百度温标，它把标准大气压下冰的融点和水的沸点作为基本间隔，相应地写为 0 和 100，因此， N 认为等于 100。再用一支装有水银的玻璃温度计放在冰点和水沸点中刻度。因为物质有热胀冷缩的特性，水银的膨胀系数又比玻璃大得多，温度变化时，玻璃毛细管中的水银面就会上升或下降，把对应于水沸腾时水银面的位置刻一条线，再把对应于冰融化时的水银面位置刻一条线，在这两条线距离之间等分成一百格，每格就相当于摄氏一度。其它温度计都要和它比较以确定其刻度的

示值。这样的温标，就是最初的百度摄氏温标。而华氏温标是把标准大气压下冰的融点定为 32°F ，水的沸点定为 212°F ，因此， N 认为等于180。在这之间等分成180份，每一份就叫作华氏温标的一度。显然，华氏温标的一度和摄氏温标的一度的大小是不一样的。

在一段较长时期内，百度摄氏温标满足了实际要求。但是随着测量技术的提高，曾发觉，具有按同样原理刻度标尺的温度计，如水银温度计和酒精温度计，它们所给出的示值，仅在零度和一百度两点符合，而在这些温度计标尺的所有其它各点，它们的示值均有差别。这种差别在于假设水银和酒精的膨胀与温度的关系是线性的，并把这种完全是任意的假设作为在建立这些温度标尺时的基础。但在实际上，它们是不遵从这种关系的，水银和酒精的膨胀系数与温度的关系是不相同的。人们还发现，用不同牌号的玻璃制成的水银温度计，尽管在零度和一百度时指示值是互相一致的，但是在中间温度的示值可能不完全一样，这是由于不同牌号玻璃的膨胀系数稍有不同而引起的。

假如我们采用其它任何与温度同时变更的性质（例如金属的电阻值等）为基础来建立温度标尺，那么我们也一定会遇到同样的困难。在这种情况下也会发现，随着采用的金属的不同，得到的温标也不相同，正如水银和酒精温度计一样，尽管基本刻度点是相符的。

研究表明，在自然界中和温度具有严格线性关系的物理特性的物质一般是不存在的。对于任一个测温特性来说，方程式(1-2)中的系数 K ，本身也是温度的函数。特性不同，这种函数关系也不同。由此可以看出，选择测温特性 E 有多少，就可用上述方法建立多少温标。此外，用具有同一测温特性建立起来的温标，而对于不同的测温物质，同样也是互不相同的，仅在固定点 t_1 和 t_2 相符合。

上述方法表明，温度标尺完全可以任意选择，这样，不就造成温度量值上的混乱了吗？再说，上述温标只规定了冰点和沸点之间的温标，这个范围也太窄了，不能满足日益发展的生产和科学研究的要求。因此，随着人们对温度计，对温标的认识不断深化，温标也随着不断改变和更加科学化。为了使温度测量统一，不致造成温度量值上的混乱，就必须建立统一的温标，它同不论什么样的测温特性无关，并适用于广阔的温度范围，且又能以最大可能的准确度定出它的大小和复现出来，从而保证世界各国的“比例尺”单位概念“度”相一致。

人们总结了在生产活动和科学实验中温度测量的经验，并从理论分析得出结论，建立在热力学第二定律基础上的热力学温标是最科学的温标。

三、热力学温标

热力学温标是按照卡诺循环工作的理想热机的特性建立的。如果理想热机按两个等温和两个绝热曲线完成闭合循环，那么，就象热力学所证明的那样，这种机器的效率，既不与过程的方向有关，也不取决于压力或者物质的容积或者它的物理特性，而仅决定于冷源温度 T_1 和热源温度 T_2 ：

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (1-5)$$

式中 Q_2 和 Q_1 —— 相应于由工作物质从热源获得的和送给冷源的热量。

根据卡诺循环，开利文首先提议按照下列等式确定温度的概念。

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1-6)$$

如果对于两个简单固定点的温度定出数值，则在这个条件下，温标即被确定。在一个长时期内，冰的融点和水的沸点温度用作热力学温标的固定点，相应等于 0 和 100，在这些温度间隔内，分成 100 等份，这每一份称作热力学温标的度，按照这个原理建立的温标，本身就叫作百度热力学温标。在百度热力学温标中所表示的温度数值，标以符号 $^{\circ}\text{C}$ （摄氏度）。与此温标同时，曾确立了绝对热力学温标，它的一度的数值精确地等于百度热力学温标的每度值，但它刻度的起点确定在温度的绝对零度。绝对热力学温标中所表示的温度数值，标以符号 $^{\circ}\text{K}$ （开利文度）。根据1968年国际实用温标（ IPTS-68 ）规定已以符号 K （开利文）表示热力学温度的单位。在绝对热力学温标中，冰的融点温度值，根据一系列研究结果，它等于 273.15K 。所以在绝对热力学温标中温度 T 的数值与在百度热力学温标中温度 t 的数值的关系，可用下式确定：

$$T = t + 273.15\text{K} \quad (1-7)$$

如果我们要用上述方法测量温度，即可用一个卡诺热机在温度为水沸点（ T_2 ）与未知温度（ T ）的两个热源间工作，则有：

$$\frac{T_2}{T} = \frac{Q_2}{Q} \quad \text{或} \quad T_2 = \frac{Q_2}{Q} T \quad (1-8)$$

再使热机在冰点（ T_1 ）热源与未知温度热源间工作，又有：

$$\frac{T}{T_1} = \frac{Q}{Q_1} \quad \text{或} \quad T_1 = \frac{Q_1}{Q} T \quad (1-9)$$

将（1-8）式与（1-9）式相减得：

$$T_2 - T_1 = \frac{Q_2 - Q_1}{Q} T$$

$$\text{故} \quad T = \frac{Q}{(Q_2 - Q_1)} (T_2 - T_1) \quad (1-10)$$

若 $T_2 - T_1 = 100\text{K}$ ，则得

$$T = \frac{Q}{(Q_2 - Q_1)} \times 100\text{K} \quad (1-11)$$

由（1-11）式可见，如果测出热量 $Q_2 - Q_1$ 和 Q 来，即可求出温度 T ，它与测量物质和特性无关。

上述的热力学温标只有纯理论意义，因为实际上不可能实现理想的卡诺循环，因此这个温标没有实际意义，但理论上它是比较理想的。所以为了实现热力学温标，人们又进一步研究在理论上与热力学温标相符的绝对温标，即用其它某种物理定律来实现。在这个定律中，热力学温度 T 与其它能直接测量的物理量相联系。在这个关系中，气体定律是最方便的。于是出现了所谓的绝对气体温标。

四、气体温标

从波义耳定律出发，即在一定的温度下的理想气体，其体积和压力有如下关系，即所谓理想气体状态方程式。

$$PV = RT \quad (1-12)$$

式中 R ——通用气体常数 (8.310焦耳/克分子度)

在温度不太低和压力不太大的情况下, 无论何种气体都相当精确地遵守这个定律。用这个物理基础, 按照方程式 (1-12) 原理所建立的仪器, 目前对于实现热力学温标是主要的, 故把它称为气体温度计。

热力学温度 T 可根据方程式 (1-12) 来确定。为了便于用上述方法测出温度 T , 可以保持一个参数压力 P 或容积 V 固定不变, 这样剩下的一个参数 V 或 P 就成了温度 T 的单值函数关系了。因此气体温度计实际上又分为定压式或定容式气体温度计。

根据气体温度计, 实现热力学温标, 对于定容式的气体温度计可写成:

$$T = T_0 \frac{P}{P_0} \quad (1-13)$$

对于定压式的气体温度计可写成:

$$T = T_0 \frac{V}{V_0} \quad (1-14)$$

式中 P_0 和 V_0 ——对应于冰的融化温度 T_0 情况下所测得的气体温度计中的工作气体的压力和体积的数值。

由 (1-13) 式和 (1-14) 式可以看出, 要用此气体温度计测量温度, 只要一个标准点就够了。这个点可选用冰点, 但目前是选用水三相点, 其温度为 273.16K 作为标准点。

利用绝对气体温标时, 测得的温度只依赖于一切气体的共同性质, 而不依赖于个别气体的特殊性。作为气体温度计中的测温物质, 对于测量低温, 通常采用氢或氦, 而对于高温则采用氮。在广阔的温度范围内, 真实气体在本身的性质方面与理想气体的区别是很少的。因此, 在知道所采用的真实气体对理想气体定律的偏差以后, 根据许多辅助试验和这些数据计算出修正值, 再把相当于它与热力学温度标尺之间相差的修正值加到气体温度计的指示值上。这样, 两个温标就是完全一样的了。因而, 绝对热力学温标就通过绝对气体温标得以实现了。

但是, 气体温度计只能在所测温度不超过 1100°C 的时候, 才可用来作为复制热力学温标的基本仪器, 这样还不能满足科学和技术方面的要求, 而用这样的气体温度计来测量更高的温度, 将会遇到很大的技术上的困难, 这些困难, 在目前还是难以克服的。此外, 气体温度计相当笨重而复杂, 在实际工作中用它来复制温度标尺和每一度的实际大小是很不方便的, 同时, 气体温度计并不能保证温度测量有充分的可靠性, 而在用它来作次数较少的温度测量时, 可能产生较大的误差。

所有这些, 导致必须研制实现某种温标的方法, 这种方法在实际上既与热力学符合, 又可用来进一步扩展高温, 并且使用方便和具有很高精度的复现性。由于许多国家进行研究的结果, 产生了国际实用温标 (IPTS)。

五、国际实用温标

前边介绍了理想的绝对热力学温标, 并且可以借助于气体温度计实现温度的测量。为了实用上的简便和准确, 在我国以及全世界其他国家, 都采用了国际实用温标来作为基本温度标尺, 这种温度标尺就是绝对热力学温标的实际表现。国际温标是在 1927 年第七届国际权度大会上通过采用的, 这是近代第一个国际温标, 它是一个国际协议性的温标, 叫 1927 年国际

温标。它具有三个基本条件：

1. 尽可能和热力学温标一致；
2. 复现精度高，各国都能以很高的准确度复现同样的温标，以保证温度量值的统一；
3. 规定的温度计用起来方便。

50多年来，由于科学技术的不断发展，国际温标作过几次修改，但都是数值上的修改，而基本原则和方法一直保持不变。1948年对1927年温标作了九处重大改变，更名为1948年国际温标，1960年第十一届国际权度大会又批准了对1948年国际温标的六点修正而建立1948年国际实用温标（1960年修正版）。我国在1972年以前所使用的温标，均是1948年国际实用温标（IPTS-48），而从1973年起开始推行新的1968年国际实用温标（IPTS-68）。1968年国际实用温标是1968年10月国际权度委员会对1948年国际实用温标作了八处重要修改而建立的，它在目前测温准确度极限之内与热力学温标是相符的。1968年国际实用温标和1948年国际实用温标之间的差值示于表1-1，由此表可以看出，在较低温度譬如900℃以下，两者的差别是不大的，最多尚不到1℃。

表1-1 IPTS-68和IPTS-48给出的温度值间的近似差值 $(t_{68}-t_{48}) \cdot (K)$

$t_{68}/^{\circ}C$	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100
-100	0.022	0.013	0.003	0.006	0.013	0.013	0.005	0.007	0.012		
-0	0.000	0.006	0.012	0.018	0.024	0.029	0.032	0.034	0.033	0.029	0.022
$t_{68}/^{\circ}C$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0.000	-0.004	-0.007	-0.009	-0.010	-0.010	-0.010	-0.008	-0.006	-0.003	0.000
100	0.000	0.004	0.007	0.012	0.016	0.020	0.025	0.029	0.034	0.038	0.043
200	0.043	0.047	0.051	0.054	0.058	0.061	0.064	0.067	0.069	0.071	0.073
300	0.073	0.074	0.075	0.076	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.076	0.076
400	0.076	0.075	0.075	0.075	0.074	0.074	0.074	0.075	0.076	0.077	0.079
500	0.079	0.082	0.085	0.089	0.094	0.100	0.108	0.116	0.126	0.137	0.150
600	0.150	0.165	0.182	0.200	0.23	0.25	0.28	0.31	0.34	0.36	0.39
700	0.39	0.42	0.45	0.47	0.50	0.53	0.56	0.58	0.61	0.64	0.67
800	0.67	0.70	0.72	0.75	0.78	0.81	0.84	0.87	0.89	0.92	0.95
900	0.95	0.98	1.01	1.04	1.07	1.10	1.12	1.15	1.18	1.21	1.24
1000	1.24	1.27	1.30	1.33	1.36	1.39	1.42	1.44			
$t_{68}/^{\circ}C$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1000		1.5	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2
2000	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.0	5.3	5.6	5.9
3000	5.9	6.2	6.5	6.9	7.2	7.5	7.9	8.2	8.6	9.0	9.3

国际实用温标是基于许多固定点而建立的。这些点是一些平衡的温度。它们的数值是利用几个国家的气体温度计定出来的，并在这些数值上加上由于它和热力学温标的温度有差异而应加的修正值。

为了建立国际实用温标，采用了下列各种固定的温度点以及它们所代表的温度数值(℃)。

为了定出国际实用温标各固定温度点间的插入值，把国际温标分成四个部分。

(1) 在由平衡氢三相点(13.81K)到冰点(273.15K)之间的温度间隔中，温度 T_{68} 由

表1-2 IPTS-68定义的固定点(1)

平衡状态	国际实用温标指定值	
	$T_{68}(K)$	$t_{68}(^{\circ}C)$
平衡氢固态、液态、气态间的平衡(平衡氢三相点)	13.81	-259.34
平衡氢液态、气态在23330.6N/m ² (25/76标准大气压力下的平衡)	17.042	-256.108
平衡氢液态和气态间的平衡(平衡氢沸点)	20.28	-252.87
氦液态和气态间平衡(氦沸点)	27.102	-246.048
氮固态、液态和气态间的平衡(氮三相点)	54.361	-218.789
氧液态和气态间的平衡(氧沸点)	90.188	-182.962
水固态、液态和气态间的平衡(水三相点)(2)	273.16	0.01
水液态和气态间的平衡(水沸点)(2)(3)	373.15	100
铟固态和液态间的平衡(铟凝固点)	692.73	419.58
银固态和液态间的平衡(银凝固点)	1235.08	961.93
金固态和液态间的平衡(金凝固点)	1337.58	1064.43

注：(1)除各三相点和一个平衡氢点(17.042K)外，温度的给定值都是指在 $P_0=1$ 标准大气压(101325N/m²)下的平衡态；

(2)所用的水应有海水的同位素成分；

(3)锡固态和液态的平衡温度(锡凝固点)被给定为 $t_{68}=231.9681^{\circ}C$ ，它可用来代替水沸点。

下式来确定：

$$W(T_{68}) = W_{CCT-68}(T_{68}) + \Delta W(T_{68}) \quad (1-15)$$

式中 $W(T_{68})$ 是标准铂热电阻的电阻比，定义为 $R(T_{68})/R(273.15K)$ 其中 R 为电阻， $W_{CCT-68}(T_{68})$ 由参考函数所给的电阻比。固定点温度的偏差 $\Delta W(T_{68})$ 由 $W(T_{68})$ 的测定值和 $W_{CCT-68}(T_{68})$ 的相应值得出。为了找出中间温度的 $\Delta W(T_{68})$ ，可利用插补公式。在 13.81K 和 273.15K 间的范围被分成四部分，即从 13.81~20.28K；20.28~54.361K；54.361~90.188K；90.188~273.15K，其中每一部分的 $\Delta W(T_{68})$ 是由 T_{68} 的多项式所规定。多项式中的常数是从固定点的 $\Delta W(T_{68})$ 值和温度范围内连接点的 $d\Delta W(T_{68})/dT_{68}$ 不应有不连续的条件所确定。

(2) 在由 0 $^{\circ}C$ (273.15K) 到 630.74 $^{\circ}C$ 范围内， t_{68} 用标准铂热电阻按下式确定：

$$t_{68} = t' + 0.045 \left(\frac{t'}{100^{\circ}C} \right) \left(\frac{t'}{100^{\circ}C} - 1 \right) \left(\frac{t'}{419.58^{\circ}C} - 1 \right) \left(\frac{t'}{630.74^{\circ}C} - 1 \right)^{\circ}C \quad (1-16)$$

式中 t' 由下式确定：

$$t' = \frac{1}{\alpha} [W(t') - 1] + \delta \left(\frac{t'}{100^{\circ}C} \right) \left(\frac{t'}{100^{\circ}C} - 1 \right) \quad (1-17)$$

式中 $W(t') = \frac{R(t')}{R(0^{\circ}C)}$ ，常数 $R(0^{\circ}C)$ ， α 和 δ 是根据水三相点，水沸点(或锡凝固点)和铟凝固点等测定的电阻来确定。公式(1-17)与下列公式相当

$$W(t') = 1 + At' + Bt'^2 \quad (1-17')$$

式中 $A = \alpha(1 + \delta/100^{\circ}C)$ ， $B = -10^{-4}\alpha\delta^{\circ}C^{-2}$ 。

(3) 从 630.74 $^{\circ}C$ 到 1064.43 $^{\circ}C$ 范围， t_{68} 由下式确定：

$$E(t_{68}) = a + bt_{68} + ct_{68}^2 \quad (1-18)$$

式中 $E(t_{68})$ 是铂铑合金-铂标准热电偶，当它的一端温度 $t_{68}=0^{\circ}C$ ，而另一端温度为 t_{68} 时的电动势。常数 a 、 b 和 c 是根据标准热电偶在 630.74 $^{\circ}C \pm 0.2^{\circ}C$ 及在银和金的凝固点测得的 E 值

计算出来的。

(4) 在1337.58K (1064.43℃) 以上范围, 温度 T_{68} 由下式确定:

$$\frac{L_{\lambda}(T_{68})}{L_{\lambda}[T_{68}(A_w)]} = \frac{\exp\left[\frac{c^2}{\lambda T_{68}(A_w)}\right] - 1}{\exp\left[\frac{c_2}{\lambda T_{68}}\right] - 1} \quad (1-19)$$

式中 $L_{\lambda}(T_{68})$ 和 $L_{\lambda}[T_{68}(A_w)]$ 是在温度 T_{68} 和金凝固点 $T_{68}(A_w)$ 时, 黑体辐射波长为 λ 的光谱密度, $c_2 = 0.014388\text{m} \cdot \text{K}$ 。

国际实用温标 (IPTS-68) 条例除了规定的 11 个定义的固定点外, 还推荐了第二类参考点——平衡温度, 它们的数值列于表 1-3。

表1-3 第二类参考点

平衡状态	国际实用温标		平衡状态	国际实用温标	
	$T_{68}(\text{K})$	$t_{68}(\text{°C})$		$T_{68}(\text{K})$	$t_{68}(\text{°C})$
正常氢三相点	13.956	-259.194	汞沸点	629.81	356.66
正常氢沸点	20.397	-252.753	硫沸点	717.824	444.674
氦三相点	24.555	-248.595	铜铝合金易熔点固态、液态间平衡	821.38	548.23
氮三相点	63.148	-210.002	铝凝固点	933.52	660.37
氮沸点	77.348	-195.802	铋凝固点	903.89	630.74
二氧化碳升华点	194.674	-78.476	铜凝固点	1357.6	1084.5
汞凝固点	234.288	-38.862	镍凝固点	1728	1455
冰点	273.15	0	钴凝固点	1767	1494
苯氧基苯三相点	300.02	26.87	钨凝固点	1827	1554
苯甲酸三相点	395.52	122.37	铂凝固点	2045	1772
铟凝固点	429.784	156.634	铈凝固点	2236	1963
铋凝固点	544.592	271.442	铀凝固点	2720	2447
镉凝固点	594.258	321.108	钨凝固点	3660	3387
铅凝固点	600.652	327.502			

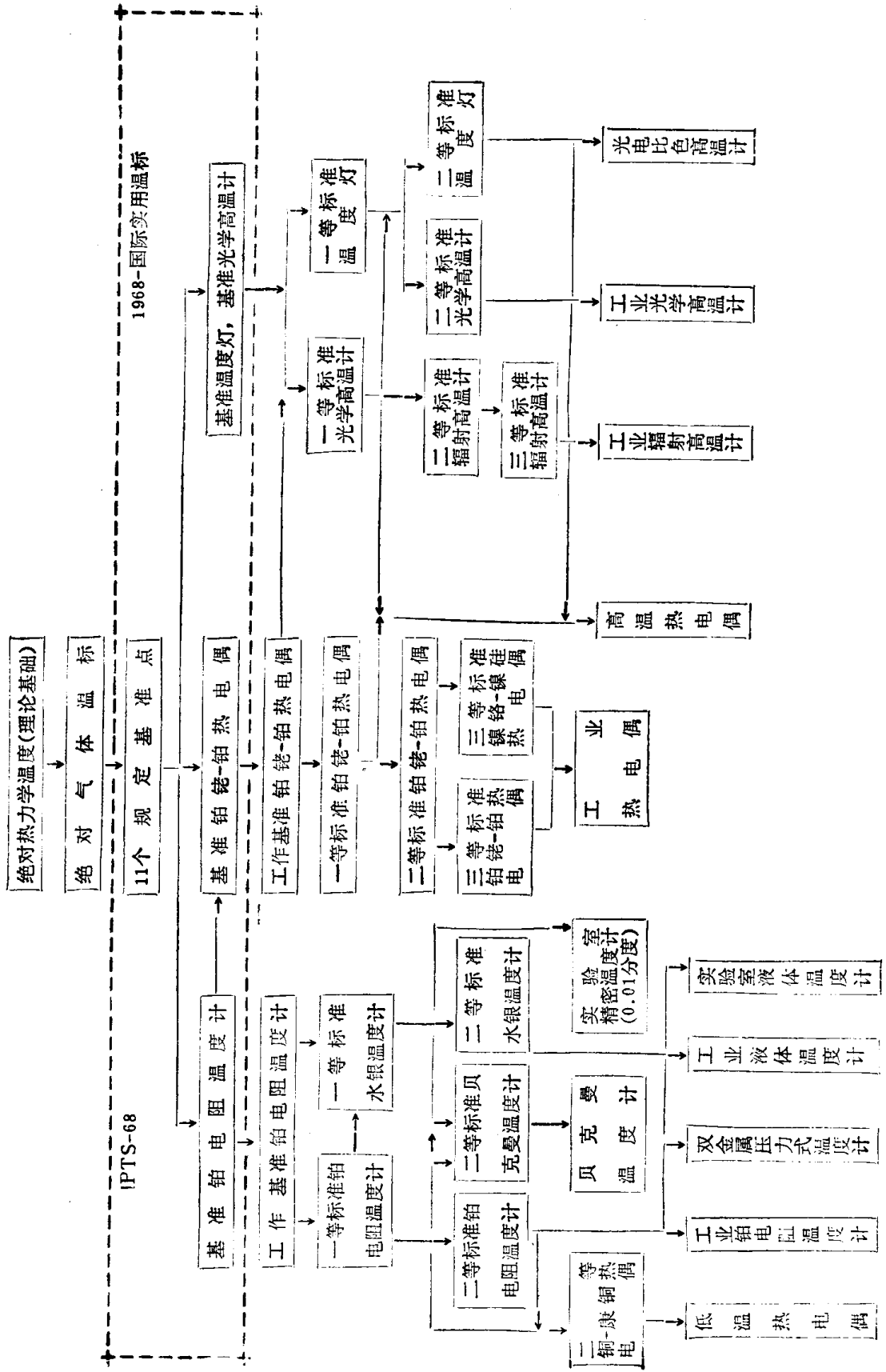
采用国际实用温标的多年试验证明, 它所实现的热力学温标的复现性是相当好的。譬如, 在0~100℃范围内分度过的铂热电阻的国际间的对比结果表明, 在不同的国家里, 在这个范围内所实现的复现性, 彼此的符合程度在 0.001 度范围内。在国际实用温标的热电偶段的复现性约为 0.1 度, 至于在光学段的国际实用温标的复现性, 对于 1064.43~2000℃ 范围内, 它可估计为 2~3 度。

六、温标数值从标准到工作仪表的传递

在我国, 国际温标的复现和保持, 是由中国计量科学院来执行的。为了把各部分标尺中‘度’的正确数值能刻到实用的温度测量器上去, 应按标准仪器的传递系统来实行。一等标准仪器是按照中国计量科学研究所的工作基准仪器来校验的, 二等标准仪器则是按一等标准仪器来校验的, 三等标准仪器则是按二等标准仪器来校验的, 而实用的温度测量仪表则是按照二等或者三等标准仪器来进行校验的。

在进行上述的校验工作时, 不可避免会发生偶然的测量误差。例如一等标准仪器的误

表1-4 温度标准传递系统



差，就是把它们的校验误差和工作基准仪器分度的误差相加而得；二等标准仪器的误差，则由这些仪器的校验误差和所采用的一等标准仪器的误差相加而得，并依此类推。

这样一来，把标准的数值转变为实用的温度测量仪表的指示值，必然会同时发生误差的积累。因此，实用的仪表就不可能具有和标准仪表相同的准确度了。这里需要顺便说明一下，严格地讲，准确度系指所测数值与真值符合的程度，而精确度则是指在测量中所测数值重复性的大小。两者是既有联系而又有区别的，但习惯上常将两者混用而不加区分。通常，实用的温度测量仪表，随着它们的运用条件不同，都具有某种程度的准确度。这种准确度，在工程测量的实际工作中，一般是用允许误差来衡量的。无论在实验室中或在运行工作条件下，当衡量温度测量的可靠程度时，都必须注意到上述情况。

有时为了减少校验误差，譬如对于精密的（即提高了精度的）测温仪表，就必须选用较高等级的标准仪器来对它们进行校验。

为此，需要正确地选择标准仪器。为使被检验的仪器能够得到所需要的准确度，所选用的标准仪器，其误差至少要小于被检仪器允差的三倍。

为了保持温度量值的统一，并与国际实用温标相一致，测温仪器应定期按规定进行检定，温度的最高基准由中国计量科学研究院保存。温度标准的传递系统示于表1-4。

七、热交换概述

(一) 基本概念

如前所述，温度确定热能传递的方向，而热能的传递是通过热交换的形式来实现的。因此有必要对表征物体状态和它们热交换条件的基本概念及其定义等给以明确的规定。

1. 热流量 Q 定义为在单位时间里在法线方向流过表面积的热能的数量，热流量的单位以瓦特或焦耳/秒表示；

2. 热流密度（比热流）相应等于

$$q = \frac{Q}{F} \quad \text{瓦特/米}^2 \text{或焦耳/厘米}^2 \cdot \text{秒}$$

3. 物体热容量 C （焦耳/度）是物体的温度升高1度所需要的热量；

4. 比热容 $c = \frac{C}{m} = \frac{C}{V\rho}$ （焦耳/千克·度或焦耳/克·度）

式中 m —— 物体质量(千克)

V —— 物体体积(米³)

ρ —— 密度(千克/米³)

5. 导热系数 λ (瓦特/米·度或焦耳/厘米·秒·度)定义为物体在单位温度1度下所产生的热流密度值，它是表征物质导热能力的物理量，其数据由试验来确定；

6. 导温系数 $a = \frac{\lambda}{C\rho}$ (米²/秒)；

7. 散热系数 α ，(瓦特/米²·度或焦耳/厘米²·秒·度)定义为通过系统界面单位表面的热流密度值。系统界面为：固体-液体、固体-气体和液体-气体；

8. 物体的温度场，定义为物体瞬时温度值空间分布的总和。