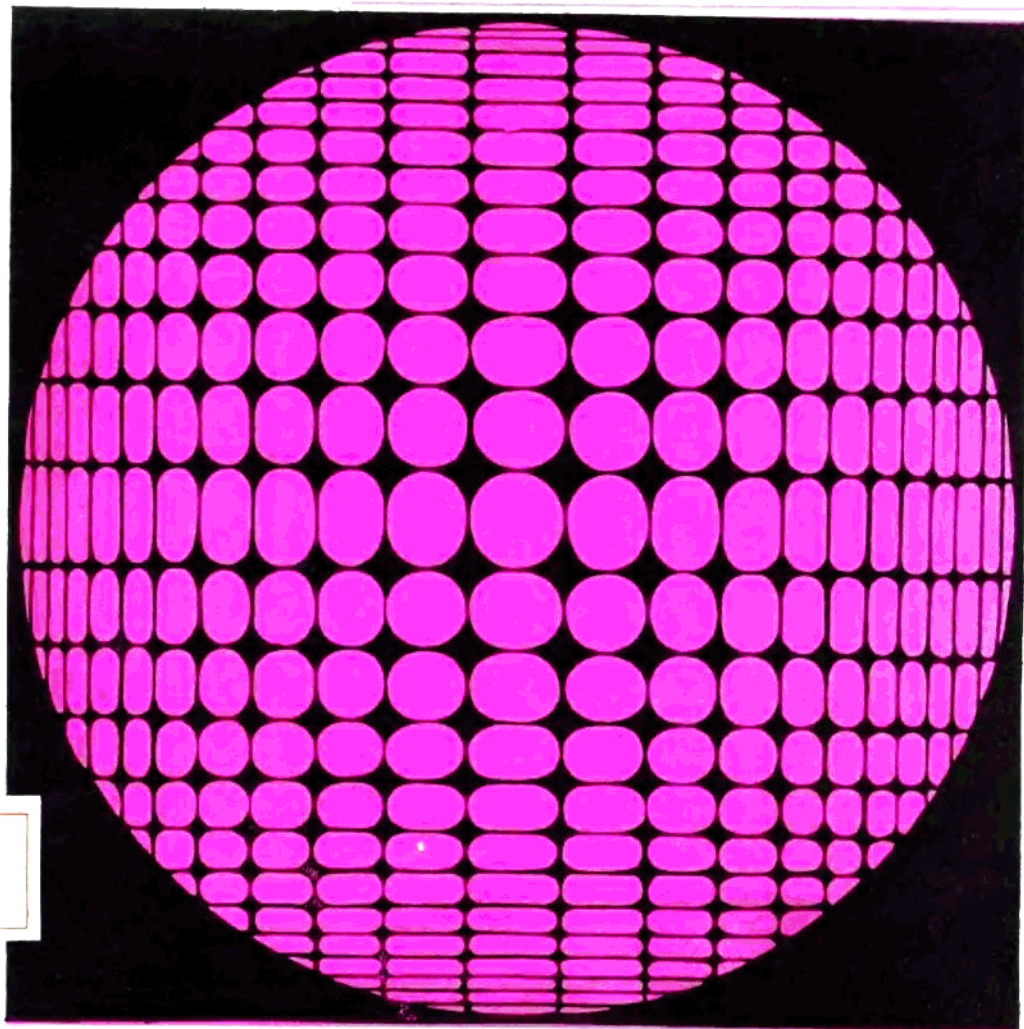


计量技术初级教材



温度计量

北京标准计量局 编 ● 中国计量出版社



内 容 提 要

本书是计量技术的初级教材。书中系统介绍了温度与温标的概念及温度计的基础知识，着重讲述了温度计量的各种原理、标准仪器和设备以及检定和操作方法、数据处理等。对温度计量使用的二次仪表，也按种类、原理、使用方法作了专门介绍。本书可供具有中等文化程度地、县计量部门和相应的厂矿企业计量工作人员作培训教材，也可供中等专业学校师生及计量测试人员参考。

计量技术初级教材

温度计量

北京市标准计量局 编

责任编辑 陈葵

◆

中国计量出版社出版

(北京和平门11区7号)

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

◆

开本 787×1092 1/16 印张 21.25

字数 515 千字 印数 1—31000

1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷

统一书号 15210·719

定价 4.40 元

前 言

为了使计量队伍适应四化建设的需要，必须加强在职人员的教育培训工作，以提高他们的技术水平和管理水平，而初级计量技术人员的系统培训工作又是当务之急。为此，我们从1981年开始组织了一套“计量技术初级教材”，它包括长度计量、温度计量、力学计量、电学计量、无线电计量测试五种。

这套教材主要是供具有初中以上文化程度的、有一定实际工作经验的地、县和相应的厂矿企业计量人员短期训练班使用。其目的是使初级计量人员具有进行业务工作所必备的基础知识，并为他们进一步提高业务能力打下基础。这套教材也可作为具有相应程度的计量人员的自学用书。

我们希望这套教材的出版，对计量系统的职工培训工作，能起到推动作用。

国家计量局教育处

编者的话

温度是表征物体冷热程度的物理量。温度量值如何确定以及怎样保证温度量值的准确一致, 这些就是现代计量科学技术的重要组成部分——温度计量所要研究和解决的问题。

温度是国际单位制(SI)中七个基本单位之一, 它与工农业生产、科学研究以及人们的生活都有着极为密切的关系。

钢铁的冶炼, 机械零部件的热加工, 化工、轻工、纺织、食品等工业部门的生产飞机、轮船、汽车的安全行驶, 现代化的农业生产以及人造地球卫星和宇宙飞船的发射, 新型材料的研究诸方面都需要准确的温度测量。北京某工厂因使用一支不合格的温度计, 一天多时间就造成了十余万元的经济损失。

同样, 在人们日常生活中, 准确的天气预报、医疗诊断以及环境监测等方面也离不开温度测量。

随着生产和科学技术的不断发展, 对计量测试技术提出了更高的要求, 计量工作也随之有了很大发展, 计量人员的队伍在不断扩大, 从而提出了人员培训与编写教材的要求。

本书可供具有中等文化程度的在职计量检定测试人员作为温度计量短训班(约三个月)教材使用。书中主要内容是根据地、市两级计量部门和相应的厂矿企业计量人员工作范围而确定的。书中第一章是温度计量的基础部分, 着重讲解了温度及温标的基本概念以及现行国际实用温标的主要内容。其它各章则是按照测温仪表的类型分别讲解了仪表的工作原理、结构、如何正确使用以及检定和调修的方法。由于检定规程的具体内容是不断更新的, 所以, 检定部分着重介绍了主要检定项目与要求、检定用的标准器与设备以及检定的基本原则等等。

本书在编写过程中得到了国家计量局、中国计量出版社、北京市标准计量局等部门的指导与帮助, 并得到清华大学等院校以及兄弟省市计量部门的支持, 在此一并表示感谢。

本书由汪开道统编, 清华大学自动化系师克宽教授主审。书中第一、二、三章由汪开道编写, 第四、七章由张锦霞编写, 第五、六、八章由李吉林编写。由于我们的理论水平有限, 实践经验不足, 书中难免有错误和不妥之处, 恳切地希望读者批评指正。

目 录

第一章 温度与温标	(1)
1.1 温度的概念.....	(1)
1.2 温标.....	(2)
1.3 温标的传递.....	(15)
第二章 膨胀型温度计与压力式温度计	(18)
2.1 玻璃液体温度计.....	(18)
2.2 双金属温度计.....	(40)
2.3 压力式温度计.....	(43)
第三章 电阻温度计	(47)
3.1 电阻温度计工作原理.....	(47)
3.2 工业热电阻.....	(48)
3.3 半导体热敏电阻.....	(51)
3.4 标准铂电阻温度计.....	(54)
3.5 测量电阻温度计的电阻值.....	(57)
3.6 工业热电阻的检定.....	(61)
第四章 热电偶	(64)
4.1 热电偶的工作原理.....	(64)
4.2 热电偶的构造.....	(72)
4.3 热电偶的类型.....	(89)
4.4 热电偶的正确使用.....	(97)
4.5 热电偶的检定.....	(111)
第五章 光学高温计	(137)
5.1 概述.....	(137)
5.2 辐射理论基础.....	(137)
5.3 光学高温计的结构.....	(145)
5.4 光学高温计的正确使用与维护.....	(153)
5.5 影响光学高温计测量准确度的因素及其消除方法.....	(155)
5.6 国产光学高温计的类型和结构特点.....	(159)
5.7 光学高温计的检定.....	(175)
第六章 辐射感温器	(183)
6.1 概述.....	(183)
6.2 辐射感温器的工作原理.....	(183)
6.3 辐射感温器的分类、结构.....	(185)
6.4 辐射感温器的辅助装置.....	(190)
6.5 辐射感温器与显示仪表.....	(191)
6.6 辐射感温器的技术要求.....	(192)
6.7 辐射感温器检定所需仪器设备.....	(195)

6.8	辐射感温器的检定方法	(205)
6.9	辐射感温器检定中应注意的问题	(209)
6.10	辐射感温器的正确使用和维护	(211)
6.11	光电温度计	(211)
6.12	辐射温度计的发展动向	(216)
第七章	动圈式测量仪表	(219)
7.1	动圈式测量仪表概述	(219)
7.2	动圈式温度指示调节仪的原理与结构	(221)
7.3	动圈仪表的正确使用	(254)
7.4	动圈仪表的检定	(259)
第八章	电子自动平衡显示仪表	(283)
8.1	概述	(283)
8.2	电子电位差计的工作原理	(285)
8.3	晶体管放大器	(290)
8.4	可逆电动机	(309)
8.5	同步电动机与记录装置	(312)
8.6	电子电位差计的正确使用	(314)
8.7	电子电位差计的检定	(319)
8.8	电子平衡电桥	(323)
8.9	电子平衡电桥的检定	(328)

第一章 温度与温标

1.1 温度的概念

人们在日常生活和工作中，经常会遇到许许多多冷与热的现象。凭借我们的感觉器官，可以分辨出物体的冷和热。比如，众所周知的天气谚语：“热在三伏、冷在三九。”夏季“三伏”天使人感到“闷热”，而冬季“三九”天则使人感到异常寒冷。人体得了病，常会感到浑身发烧，一旦病除，又会恢复正常。靠近火炉，会使你感到“烤得很”，进了冷库则会感到“冻得很”。汽车运行了一段时间，发动机要发热，停驶以后发动机又逐渐“冷”下来。但是，光凭人们的感觉，有时也靠不住，甚至得出错误结论。如果恒温室的电测工作台上，放置着一块铝板和一块绝缘橡皮，当我们用手分别触及它们时，由于铝板比绝缘橡皮的导热性能好，常常会使我们错误地感觉到铝板比绝缘橡皮“冷”。由此可见，光凭感觉，不但不能定量地表示出物体的冷热程度，有时还会得出错误的结论。

怎样才能科学地、定量地表示出物体的冷热程度呢？这就要借助于“温度”这个物理量。按照人们的习惯，在确定温度数值的时候，使较热状态具有较高的温度数值，较冷状态具有较低的温度数值。所以，温度是描述物体冷热程度的物理量。

温度概念的建立以及温度的测量，都是以热平衡现象为基础的。两个冷热程度不同的物体，当它们互相接触以后就会产生热量交换，使原有的平衡状态受到破坏，较热的物体逐渐变冷些，较冷的物体逐渐变热些，经过一段时间以后，就不再发生热量交换，两个物体处于同样的冷热状态，即称为处于热平衡状态。

如果两个物体分别和第三个物体处于相同的热平衡状态，则将这两个物体互相接触时也必然处于同样的热平衡状态。这个实验事实就称为热平衡定律。由热平衡定律可以得知，处于同一个热平衡状态的物体必定拥有某个共同的物理性质，而温度就是表征这种物理性质的一个量。所以，处于同一热平衡状态的物体具有相同的温度。这是温度最基本的性质。在比较每个物体温度的时候，不必让它们互相接触，只要将一个被选做“标准”的物体分别与每个物体接触就行了。这个被选做标准的物体就是测量物体温度的温度计。这就是使用温度计测量温度的原理。

上述的温度定义仅仅是定性的，还是不完全的，完全的定义还应当包括温度的数值表示方法。温度这个物理量还有一个特性，那就是温度本身具有的标志性。两个受热状态不同的物体，它们只能被标志成温度的高低不同，而不能说某物体的温度是另一物体温度的几倍，换句话说，两个物体的温度的数值是不能相加的，否则是毫无意义的。

温度也是一个重要的物理量，经常用它来表征物体冷热的程度。国际单位制（简称SI）规定了七个基本单位，温度就是其中之一。这七个基本单位所表示的物理量是相互独立的基本物理量（见SI基本单位）。

热力学温度的单位是开尔文。开尔文一度等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

SI 基本单位

量	SI 单位名称	SI 单位代号	
		中文	国际
长度	米 (metre)	米	m
质量	千克 (kilogramme)	千克	kg
时间	秒 (second)	秒	s
电流	安培 (Ampere)	安	A
热力学温度	开尔文 (Kelvin)	开	K
物质的量	摩尔 (mole)	摩	mol
光强度	坎德拉 (candela)	坎	cd

目前,国际上通用的温标是国际实用温标(符号 IPTS),它能在各国得到复现,从而将温度量值逐级传递,直到各种测温仪表。

1.2 温 标

为了定量表示物体的冷热程度,必须用数值将温度表示出来。用数值表示温度的方法称为温度标尺,简称温标。

建立任何一种温标都必须具备以下三个条件:

1. 测温仪器

确定测温仪器的实质是确定测温质和测温量。利用某种物质的物理性质(如热膨胀、热电阻等)随温度的改变而变化的特性进行温度测量,这种被用来测定温度的物质称为测温质,用来测定温度的物理量称为测温量。例如利用水银体积随温度的变化,来测定温度的水银温度计和利用铂丝电阻值随温度变化,来测定温度的热电阻等,其中水银和铂丝就是测温质,而热膨胀和热电阻则是测温量。

2. 固定温度点

任何物质都是由分子组成的,在不同条件下通常都可以呈现为固体、液体、气体三种不同状态,称为物质的三“态”或三“相”。在一定条件下物质的三相可以互相转化,或是维持在两相或三相共存的平衡状态。

利用一些物质的“相”平衡温度(如水的汽相和液相的平衡温度——水沸点,水的液相和固相的平衡温度——冰点等)做为温标基本点,并对每个点的温度给以确定的数值。这些点就称为固定温度点(被选用的固定温度点其数值应当恒定,固定点的实现装置也应当便于制造和复现)。

3. 温标方程

用来确定各固定点之间任意点温度数值的数学关系式。以线性关系举例说明:

设: y 为测温量;

t 为温度。

则有:

$$y = Kt + C$$

(1-1)

式中：K——待定比例系数；

C——决定于初始值的常数。

利用两个已知温度数值 t_1 、 t_2 的固定温度点可以求出常数 K 和 C

$$y_1 = Kt_1 + C \quad (1-2)$$

$$y_2 = Kt_2 + C \quad (1-3)$$

两式相减得：

$$K = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}$$

将 K 值代入上式中之一式得：

$$C = y_1 - \left(\frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \right) t_1$$

将 K、C 值代入式 (1-1) 得到线性温标方程如式 (1-4)。

$$t = \left(\frac{t_2 - t_1}{y_2 - y_1} \right) y + \left(t_1 - \frac{t_2 - t_1}{y_2 - y_1} y_1 \right) \quad (1-4)$$

1.2.1 经验温标

由特定测温质、特定测温量所确定的温标称为经验温标。

十七世纪初，伽利略制成第一个测温器只能定性的测定温度。直到 1660 年福洛伦丁提出了第一个温标。他规定用玻璃酒精温度计测定温度，以当地冬季最冷之日的温度定为 11 度，夏季最热之日的温度定为 40 度。其后又有很多人提出了不同形式的温标，其中影响较大的是摄氏温标和华氏温标。

1714 年德国人华伦海脱 (Fahrenheit) 制造了玻璃水银温度计。他规定水的沸腾温度为 212 度，氯化氨和冰的混合物为 0 度用来标定玻璃水银温度计。温度计两固定温度点之间的距离等分为 212 份，每一等分称为华氏一度，记做 1°F 。这种标定温度的方法称为华氏温标。冰的融化温度相当于 32°F 。

1740 年瑞典人摄氏 (Celsius) 把冰的融化温度规定为 0 度，把水的沸腾温度规定为 100 度。用这两个固定温度点来标定玻璃水银温度计，将两固定温度点之间的距离等分为 100 份。每一等分称做摄氏一度，记做 1°C 。这种标定温度的方法称为摄氏温标。

华氏温标与摄氏温标的换算关系如下：

$$\therefore \frac{C}{F - 32} = \frac{100}{212 - 32} \quad (1-5)$$

$$\therefore C = \frac{5}{9}(F - 32) \quad (1-6)$$

$$F = \frac{9}{5}C + 32 \quad (1-7)$$

经验温标的缺点在于它的局限性和任意性，特别是后者，它来源于选择测温量和测温质的任意性，如果温标选定的温度计是玻璃水银温度计，那么就不能用玻璃酒精温度计去测定温度。此外，还有经验温标的上限和下限都受特定物的限制，不能超过规定值，如果超过规定

值就不能标定温度了。

1.2.2 热力学温标

如前所述，经验温标具有局限性和任意性两个缺点，因而是科学的。只有超脱于任何特定物质，而由普遍适用的自然规律所决定的温标，才能将温度计量建立在科学的基础上。

由于温度这个物理量在热力学中占有特殊地位，所以对温度进行标志所选定的普遍适用的自然规律，应在热力学范围以内。这项工作是由物理学家开尔文 (Kelvin) 在 1848 年完成的。他所提出的以热力学第二定律为基础的热力学温度于 1967 年第十三届国际计量大会上被正式肯定，并将热力学温度的单位开尔文 (符号 K) 列为国际单位制 (SI) 七个基本单位之一。

为了弄清热力学温标的含义，必须对热力学的基本内容有所了解。热力学是以经验为基础，以热能和功之间的转换和热运动为研究对象的科学。为了叙述方便以下简要介绍热力学第一定律、第二定律和卡诺定理等基本概念。

热力学第一定律是由迈尔 (Mayer) 和焦耳 (Joule) 在 1842 年和 1843 年先后独立提出的。其主要实质是能量守恒和能量转化定律在热现象上的应用。它可以简略概括为：热是能的一种，当它与另外形式的能或功之间转换时，总量不变。热力学第一定律指明，不消耗任何能量而做功或用较少能量而做较多功的机器是不可能实现的。人们把这类机器称为第一类永动机。所以热力学第一定律又可以简叙为第一类永动机是不可能实现的。

热力学第一定律指明了热过程的能量关系，但没有说明热过程进行的方向。而热力学第二定律指明了热过程进行的方向。热力学第二定律是由克劳修斯和开尔文在 1850 年和 1856 年先后提出的。定律本身有不同的说法，但在实质上都是等效的。

克劳修斯对热力学第二定律的解释是这样的：不可能制造出一种循环动作的机器，把热量自低温物体传送到高温物体，而且不消耗其它形式的能量。

开尔文提出：不可能制造出一种循环动作的机器，它只使一个热源冷却而动作，而使其它物体不发生任何变化。

上述这一类机器被称为第二类永动机。所以热力学第二定律也可以简叙为第二类永动机也是不可能实现的。

卡诺定理的提出，远在热力学第一定律和第二定律明确之前，并且成为热力学第二定律的出发点。但是，卡诺定理的严格证明，必须依赖热力学第一定律和第二定律的明确叙述。

卡诺定理可简述如下：所有工作于两个恒定温度热源之间的热机，以可逆热机的效率最高，并且所有可逆热机效率相等。

遵守卡诺定理的可逆热机热效率 η 为：

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1-8)$$

式中： Q_1 ——卡诺热机从高温热源吸收的热量；

Q_2 ——卡诺热机向低温热源发出的热量；

W ——卡诺热机所做的功（由热力学第一定律可得知 W 、 Q_1 、 Q_2 ）；

T_1 ——高温热源的温度；

T_2 ——低温热源的温度。

简化后可得：

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ 则: } T_1 = \frac{Q_1}{Q_2} T_2 \quad (1-9)$$

不难看出，工作于两热源之间的卡诺热机，其与两热源之间交换热量之比等于两热源温度之比。

1848年开尔文建议，利用卡诺定理及其推论，可以建立一个与测温质无关的温标，即热力学温标，热力学温标所确定的温度数值称为热力学温度亦称绝对温度。用符号 K 表示。它选用卡诺热机作为测量量（即温度计），而选择热量比作为测量量（即温度计参数）。

如拟测定或标志某待测热源的热力学温度数值 T ，需先确定具有水三相点热力学温度 T_3 的热源为标准热源，并指定其标志的数值为 273.16 K（即 $T_3 = 273.16$ K）。利用卡诺机进行测温，令其工作在 T 与 T_3 两热源之间。则卡诺机与两热源之间交换热量之比，与两者热力学温度数值之比应相等。即：

$$\frac{T}{T_3} = \frac{Q}{Q_3} \quad T = \frac{Q}{Q_3} T_3 = \frac{Q}{Q_3} 273.16 \quad (1-10)$$

此时，用卡诺机来测定比值 Q/Q_3 ，就可由公式求出待测热源的热力学温度数值。式（1-10）就是热力学温标的温标方程。

由热力学温标所确定的待测热源的温度称为热力学温度。它为温度计量奠定了牢固的科学基础。热力学温度的内容既包括了热力学温度的定义，也包括了热力学温度单位的定义。前者是后者的基础，后者是前者的补充。热力学温标是以热力学第二定律为理论基础，只有在严格的热力学温度和热力学温度单位的定义确定之后，才能依照温度本身的比较意义来进行温度测量。这里所说的测量只是一种手段，其最终目的是要对温度进行标志。

热力学温度单位开尔文（符号 K）是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ ，它是在热力学温度定义基础之上，首先确定了水三相点热力学温度的标志数值，再取其 $1/273.16$ 定为开尔文，将计量单位 K 加在所标志的温度数值上就形成了完整的量值表示形式，它可以不受限制地对任何温度间隔的任何温度给以科学的标志。

热力学温度不能根据其定义直接实现，因为直接测定其温度必须测量卡诺机在工作过程中的热量变化，而热量变化不能直接测量，它又必须依赖于温度的测量来确定。

可以证明理想气体温标与热力学温标是完全等值的。所以，热力学温标的实现可以借助于理想气体温标。在一定范围内的热力学温度可直接由气体温度计进行测量，超出这一范围，气体温度计不能正常工作。因而在极高温区是以黑体辐射的普朗克公式来确定温度，而在极低温区，则采用声学测温法和磁学测温法来确定温度。它们同样是以热力学第二定律为

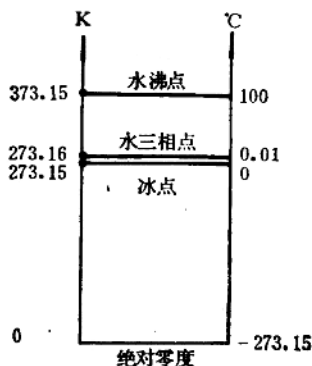


图 1-1 K-°C 对应图

基础导出的，所以仍然称作热力学温度。

由于历史原因，联系到温标原始定义的方法，仍然保留了摄氏温标的形式，给予热力学温度以第二种表示方法——摄氏温度（符号 t ）。摄氏温度的单位是摄氏度，符号 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温度与开尔文完全是等值的。表示温度差时可用开尔文表示，也可用摄氏度表示。

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta t(^{\circ}\text{C})$$

其中：

$$t = T - T_0, \quad T_0 = 273.15 \text{ K}$$

故：

$$t = T - 273.15$$

$$T = t + 273.15$$

通常在 0°C 以下习惯用开尔文表示，而在 0°C 以上用摄氏度表示，这样可以避免使用负值。两者之间的关系可用图 1—1 表示。

1.2.3 理想气体温标

以理想气体的绝对零度 T_0 及水三相点温度 T_3 为两个定义固定点，并确定其温度数值的指定值分别为 $T_0 = 0 \text{ K}$ ， $T_3 = 273.16 \text{ K}$ 。由遵守气体实验三定律的理想气体所决定的温标就称为理想气体温标。

一定质量的气体，其热平衡状态可以由它的压强 p 、体积 V 、温度 T 这三个物理量来描述。 p 、 V 、 T 称为气体的状态参量。气体实验三定律是以大量的实验为基础，以理想气体为研究对象，利用真实气体经过修正，通过 p 、 V 、 T 三个气体状态参量来描述理想气体热平衡状态的规律。是分子物理学的基础内容之一。

1. 波以耳-马略特定律

实验证明，一定质量的气体，处于一定温度下，其压强 p 与体积 V 的乘积是个恒量。这种关系就是波以耳-马略特定律。它可用数学式表示如下：

$$pV = C \quad (1-11)$$

式中： C ——与温度有关的常数。

大量实验表明，任何气体，当压力不太大或温度不太低时，都很精确地遵守这个定律。

现在以 p 为纵坐标， V 为横坐标，作出 $pV = C$ 的图形，可得到一条理想气体的等温线。对不同温度作理想气体等温线，便可得到一簇等温线。如图 1—2 所示。

在图中 V_1 处作一条平行于 p 轴的平行线，则此线和等温线簇有一系列的相交点，每点的体积都相同，但各点代表的温度与压力却不相同。因此，当保持气体体积恒定时，可利用压力变化来测量温度，根据这种原理制成的温度计称为定容气体温度计。

按照同样办法在上图中 p_1 处作一条平行于 V 轴的平行线，也可将气体的压强保持恒定，利用体积变化来测量温度，这种温度计称为定压气体温度计。在实际应用中，由于体积变化不易测量，故多采用测定压强变化的定容气体温度计。

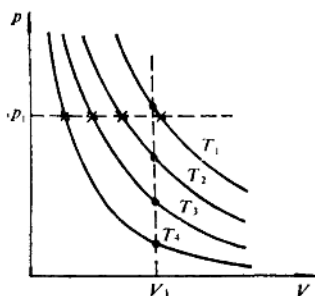


图 1—2 p - V 图

2. 查理定律 (1787年)

一定质量的气体, 当体积不变时, 温度每升高 1°C 其压强增量等于零度压强的 $1/273.15$ 。

数学表达式如下:

$$\begin{aligned} p_t &= p_0 + \Delta p \\ &= p_0 + p_0 \alpha_p t \\ &= p_0 (1 + \alpha_p t) \\ &= p_0 \left(1 + \frac{t}{273.15} \right) \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中: p_t —— $t^{\circ}\text{C}$ 的压强;

p_0 —— 0°C 的压强;

t ——摄氏温度;

α_p ——气体定容膨胀系数, 其值为 $1/273.15$ 。

上述关系称为查理定律。

3. 盖吕萨克定律 (1802年)

一定质量的气体, 当压强不变时, 温度每升高 1°C 其体积增量等于零度体积的 $1/273.15$ 。

数学表达式如下:

$$\begin{aligned} V_t &= V_0 + \Delta V \\ &= V_0 + V_0 \alpha_v t \\ &= V_0 (1 + \alpha_v t) \\ &= V_0 \left(1 + \frac{t}{273.15} \right) \end{aligned} \quad (1-13)$$

式中: V_t —— $t^{\circ}\text{C}$ 的体积;

V_0 —— 0°C 的体积;

t ——摄氏温度;

α_v ——气体定压膨胀系数, 其值为 $1/273.15$ 。

上述关系称为盖吕萨克定律。

大量实验表明, 一切气体的 α_p 与 α_v 都近似相等。

在 $p-t$ 坐标上, 当气体质量固定时, 每选定一个体积 V , 则有一条直线与其对应, 对于不同体积 V_1, V_2, V_3, \dots 可画出一组直线系列如图 1-3 所示。

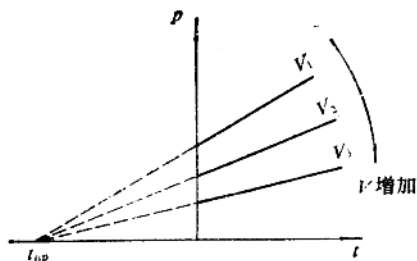


图 1-3 $p-t$ 图

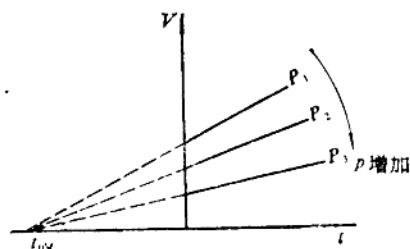


图 1-4 $V-t$ 图

将这些线段向下延长后都与 t 轴相交于一点 t_{0p} 。由于 $\alpha_p = 1/273.15$ ，所以 $t_{0p} = -273.15^\circ\text{C}$ 。这一点就是使理想气体压强为零的温度，即绝对零度。

同理，在 $V-t$ 坐标上，当气体质量固定时，可以画出一簇与 t 轴交于同一点 t_{0v} 的直线。由于 $\alpha_v = 1/273.15$ ，所以有 $t_{0v} = -273.15^\circ\text{C}$ 。这一点是使理想气体体积为零的温度，即绝对零度。

综上所述， $t_{0p} = t_{0v} = -273.15^\circ\text{C}$ ，即绝对零度。绝对零度也就是使理想气体的压强和体积都为零时的温度。

从查理定律和盖吕萨克定律出发，可以证明对一定质量的气体，压强 p 、体积 V ，温度 T 有如下的关系，即：

$$\frac{pV}{T} = \text{恒量} \quad (1-14)$$

在标准状况下，对一克分子的气体有以下关系，即： $pV = RT$ (1-15)
这就是理想气体的状态方程。 R 为普适气体常数。

当气体体积恒定时，一定质量的气体（例如 n 克分子气体），其压强与温度成正比。在选定水三相点温度的压强 p_3 为参考点以后可得：

$$\frac{p}{p_3} = \frac{T}{T_3} = \frac{nR}{V} = \text{恒量}$$

$$T = \frac{T_3}{p_3} p = \frac{p}{p_3} 273.16 \quad (1-16)$$

上式就是理想气体的温标方程，不难看出，它与热力学温标方程（式 1-10）有完全相同的形式。所谓气体体积恒定，是将气体盛在固定容积的容器内实现的。利用这种关系进行温度测量的温度计叫做定容式气体温度计，它通过压强的变化可以测量出温度的变化。这样，热力学温标难于实现的问题就解决了。

当然，精确地用定容式气体温度计来测量温度也不是一件很容易的事，还必须进一步考虑到许多影响测量准确性的因素，再对其逐项进行修正，如真实气体非理想性的修正、容器膨胀效应的修正、温度计有害容积的修正以及容器壁对气体分子的吸附作用的修正等等。

1.2.4 国际实用温标

国际实用温标（代号 IPTS）是根据现代科学技术水平，最大限度地接近热力学温标的一种国际协定性温标。它的特点是能够在世界各国准确而方便地得到复现。

前一节中已经讲过，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。现在热力学温标已经被国际计量大会采纳，成为最基本的温标，热力学温度作为基本温度。通常用气体温度计来实现热力学温标，但是气体温度计也存在一些缺点，例如装置较为复杂、使用极不方便等。为了实用上的准确与方便，1927年第七届国际计量大会决定采用国际温标。这是第一个国际协定性温标，叫做 1927 年国际温标（代号 ITS-27）。它具有三个基本特点：（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，以保证温度量值统一；（3）规定的温度计用起来方便。所以，五十年来尽管国际温标几次修改，但都只是数值上的改变，而基本原则和方法一直保持不变的。

1948年第九届国际计量大会对ITS-27作了九处重大改变，更名为1948年国际温标（代号ITS-48）。1960年第十一届国际计量大会又对ITS-48作了六点修正建立了1948年国际实用温标（1960年修订版），代号IPTS-48（60版）。1968年国际计量大会对IPTS-48（60版）又作了八处重要修改，提出了1968年国际实用温标（代号IPTS-68）。直到1975年第十五届国际计量大会继续对IPTS-68作了六项修改，提出了目前贯彻执行的1968年国际实用温标（1975年修订版）代号IPTS-68（75版）。

1. IPTS-68（75版）简介

1968年国际实用温标是以热力学温标为基础的，用它来测定的任何温度，数值上非常接近热力学温度，而且这种测量容易实现并且具有较高的复现性。

热力学温度是基本温度，符号是 T ，其单位是开尔文，符号为K。1开尔文等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

考虑到早期对温标的定义方法，通常在实践中习惯将温度用与水三相点温度以下 0.01K 热状态（即冰点）之差来表示，用这种方法来表示的热力学温度称为摄氏温度，符号是 t ，定义为：

$$t = T - 273.15 \text{ K}$$

摄氏温度的单位是摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。根据定义，它的大小等于开尔文。

为了与热力学温度符号 T 有所区别，IPTS-68使用国际实用开尔文温度（符号 T_{68} ）和国际实用摄氏温度（符号 t_{68} ）。 T_{68} 与 t_{68} 之间的关系与 T 和 t 之间关系相同，即：

$$t_{68} = T_{68} - 273.15 \text{ K}$$

T_{68} 与 t_{68} 的单位如热力学温度 T 和摄氏温度 t 一样，仍为开尔文（符号K）和摄氏度（符号 $^{\circ}\text{C}$ ）。

2. IPTS-68（75版）定义的固定温度点

它所定义的固定温度点，是利用一系列纯物质各相间可复现的平衡状态所建立起来的特征温度点。这些特征温度点温度数值的指定值是由国际上公认的最佳测量手段测定的。表1-1给出了这些平衡态和对它们给定的国际实用温度值。

表1-1 IPTS-68（75版）定义的固定温度点

平衡状态	国际实用温度指定值		平衡状态	国际实用温度指定值	
	$T_{68}(\text{K})$	$t_{68}(^{\circ}\text{C})$		$T_{68}(\text{K})$	$t_{68}(^{\circ}\text{C})$
①平衡氢三相点	13.81	-259.34	⑧水三相点	273.16	0.01
②平衡氢17.042点	17.042	-256.108	⑨水沸点	373.15	100
③平衡氢沸点	20.28	-252.87	⑩锡凝固点	505.1181	231.9681
④氮沸点	27.102	-246.048	⑪锌凝固点	692.73	419.58
⑤氧三相点	54.361	-218.789	⑫银凝固点	1235.08	961.93
⑥氩三相点	83.798	-189.352	⑬金凝固点	1337.58	1064.43
⑦氧冷凝固点	90.188	-182.962			

除了表 1—1 中给出的 13 个固定温度点以外，还提供了可以利用的第二类参考温度点共计 33 个。

3. IPTS-68 (75 版) 规定的标准测温仪器

(1) 基准铂电阻温度计：用于 13.81 K—630.74℃。用做温度计的电阻丝，必须是无应变的并经过退火的纯铂丝。电阻比 $W(T_{99.8})$ 定义为：

$$W(T_{99.8}) = R(T_{99.8})/R(273.15 \text{ K})$$

式中 R 是电阻。在 $T_{99.8} = 373.15 \text{ K}$ 时， W 值应不小于 1.39250。在 0℃ 以下，温度计的电阻-温度关系式是从一个参考函数和一些特定的偏差方程得出的。0—630.74℃ 电阻-温度关系式由两个多项式提供。

(2) 基准铂铑-铂热电偶：用于 630.74—1064.43℃，用做热电偶的偶丝应当经过退火，铂丝的纯度应当满足 W 值不小于 1.3920 的要求。铂铑丝名义上应是含铑 10%，含铂 90%（按重量）。它的电动势-温度关系用一个二次方程表示。热电偶在铑点、银点和金点的电动势值 $E(t_{99.8} \text{ Sb})$ 、 $E(t_{99.8} \text{ Ag})$ 和 $E(t_{99.8} \text{ Au})$ 应满足下列关系式：

$$E(t_{99.8} \text{ Au}) = 10334 \mu\text{V} \pm 30 \mu\text{V}$$

$$E(t_{99.8} \text{ Au}) - E(t_{99.8} \text{ Ag}) = 1186 \mu\text{V} + 0.17[E(t_{99.8} \text{ Au}) - 10334 \mu\text{V}] \pm 3 \mu\text{V}$$

$$E(t_{99.8} \text{ Au}) - E(t_{99.8} \text{ Sb}) = 4782 \mu\text{V} + 0.63[E(t_{99.8} \text{ Au}) - 10334 \mu\text{V}] \pm 5 \mu\text{V}$$

(3) 基准光学高温计：用于 1064.43℃ 以上，还可以用基准光电高温计。在这个温度范围用普朗克辐射定律来定义。用 1064.43℃ 为参考温度， C_2 值为 0.014 388 m·K。

4. 温标方程（即内插和外推关系式）

(1) 从 13.81—273.15 K 的范围：

从 13.81—273.15 K，温度 $T_{99.8}$ 由下式决定：

$$W(T_{99.8}) = W_{\text{cor-99.8}}(T_{99.8}) + \Delta W(T_{99.8}) \quad (1-17)$$

式中 $W(T_{99.8})$ 是电阻温度计的电阻比， $W_{\text{cor-99.8}}(T_{99.8})$ 是由下面的参考函数给出的电阻比：

$$T_{99.8} = \sum_{j=0}^{10} a_j \left(-\frac{\ln W_{\text{cor-99.8}}(T_{99.8}) + 3.28}{3.28} \right)^j \text{ K} \quad (1-18)$$

式中的系数 a_j 列于表 1—2。固定点温度的偏差 $\Delta W_j(T_{99.8})$ 是由 $W(T_{99.8})$ 的测定值和 WCCT-68($T_{99.8}$) 的相应值得出。为了找出中间温度的 $\Delta W_j(T_{99.8})$ ，可利用插补公式，在 13.81—273.15 K 间的范围被分成四部分，其中每一部分的 $\Delta W_j(T_{99.8})$ 是由一个 $T_{99.8}$ 的多项式所决定。多项式的常数是各固定点的 $\Delta W_j(T_{99.8})$ 和在各温度范围内的连接点的 $d\Delta W_j(T_{99.8})/dT_{99.8}$ 不应有不连续的条件所确定。

从 13.81—20.28 K 的偏差函数是：

$$\Delta W_1(T_{99.8}) = A_1 + B_1 T_{99.8} + C_1 T_{99.8}^2 + D_1 T_{99.8}^3 \quad (1-19)$$

式中常数是依据平衡氢三相点、17.042 K 固定点和平衡氢沸点的以及从公式 (1—20) 得出的平衡氢沸点的偏差函数的一阶导数来确定。

从 20.28—54.361 K 的偏差函数是：

$$\Delta W_2(T_{99.8}) = A_2 + B_2 T_{99.8} + C_2 T_{99.8}^2 + D_2 T_{99.8}^3 \quad (1-20)$$

式中的常数是依据平衡氢沸点、氮沸点和氧三相点的测量偏差以及从公式 (1—21) 得出的氧三相点偏差函数的一阶导数来确定。

表1-2 a_j 数值表

j	a_j	j	a_j	j	a_j	j	a_j
0	38.59276	6	53.03828	12	-319.79981	18	-77.25660
1	43.44837	7	77.35767	13	-787.60686	19	66.76292
2	39.10887	8	-95.75103	14	179.54782	20	24.44911
3	38.69352	9	-223.52892	15	700.42832		
4	32.56883	10	239.50285	16	29.48666		
5	24.70158	11	524.64944	17	-335.24378		

从 54.361—90.188 K 的偏差函数是:

$$\Delta W_o(T_{os}) = A_o + B_o T_{os} + C_o T_{os}^2 \quad (1-21)$$

式中常数是根据氧三相点和氧沸点(或氩三相点)的测量偏差以及从公式(1-22)得出的氧沸点偏差函数的一阶导数来确定。

从 90.188—273.15 K 的偏差函数是:

$$\Delta W_o(T_{os}) = A_o t_{os} + C_o t_{os}^3 (t_{os} - 100) \quad (1-22)$$

式中 $t_{os} = T_{os} - 273.15$ K, 而常数是根据氧沸点(或氩三相点)和水沸点的测量偏差来确定。

(2) 从 0 (273.15 K)—630.74 °C 的范围:

从 0—630.74 °C, t_{os} 由下式确定:

$$t_{os} = t' + 0.045 \left(\frac{t'}{100} \right) \left(\frac{t'}{100} - 1 \right) \left(\frac{t'}{419.58} - 1 \right) \left(\frac{t'}{630.74} - 1 \right) \text{ °C} \quad (1-23)$$

式中 t' 由下式确定:

$$t' = \frac{1}{\alpha} [W(t') - 1] + \delta \left(\frac{t'}{100} \right) \left(\frac{t'}{100} - 1 \right) \quad (1-24a)$$

式中, $W(t') = R(t')/R_o$. 常数 R_o , α 和 δ 是根据水三相点、水沸点(或锡凝固点)和锌凝固点等电阻的测定来确定。

公式(1-24a)与下式等效:

$$W(t') = 1 + At' + Bt'^2 \quad (1-24b)$$

式中: $A = \alpha(1 + \delta/100)$; $B = -10^{-4} \alpha \delta \text{ °C}^{-2}$.

(3) 从 630.74—1064.43 °C 的范围:

从 630.74—1064.43 °C, t_{os} 由下式确定:

$$E(t_{os}) = a + bt_{os} + ct_{os}^2 \quad (1-25)$$

式中 $E(t_{os})$ 铂铑-铂热电偶在其自由端温度为 0 °C 工作端温度为 t_{os} 时的电动势。常数 a 、 b 、 c 是根据 630.74 ± 0.2 °C (由铂电阻温度计测定) 以及银和金的凝固点测得的 $E(t_{os})$ 值计算出的。

(4) 1064.43 °C 以上的范围:

在 1064.43 °C 以上的范围, 温度 T_{os} 由下式确定: