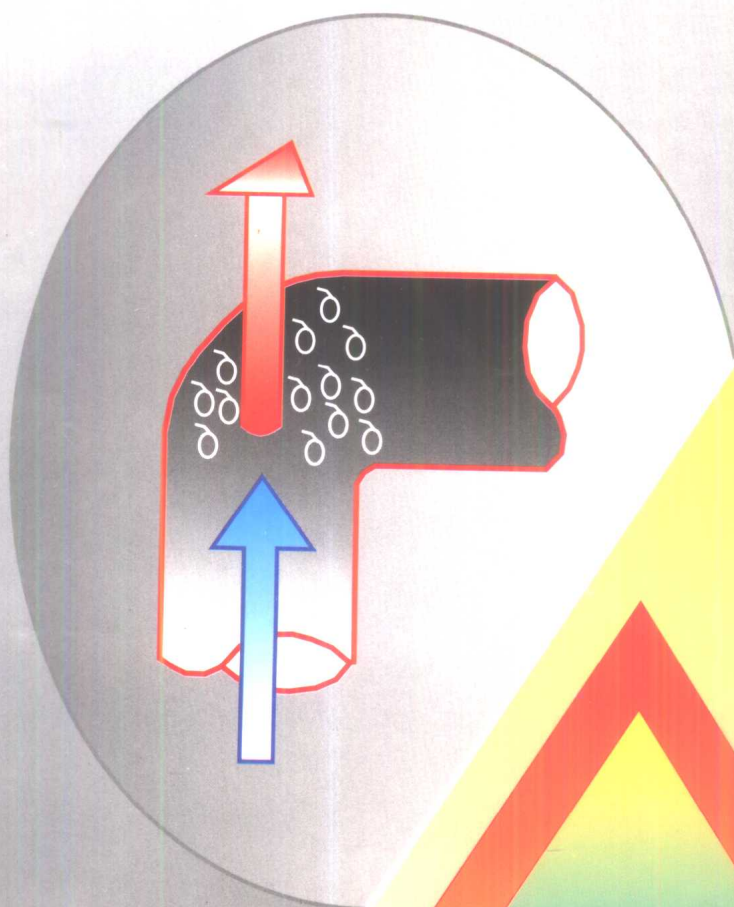


高等学校适用教材

温度计量与测试

崔志尚 主编



中国计量出版社

高等学校适用教材

温度计量与测试

崔志尚 主编

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

温度计量与测试/崔志尚主编。—北京：中国计量出版社，1998

ISBN 7-5026-1064-2

I. 温… II. 崔… III. ①温度-计量②温度测量 IV. TB 942

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 04229 号

内 容 提 要

本书系统、全面地介绍了温度计量与测试的基本原理和技术。内容包括温度与温标的基本概念和基础知识,各种温度计及温度显示仪表的原理、结构、特性、使用、检定、误差分析以及温度测量的方法及其应用等。

本书可作为高等工科院校计量测试类专业及其他相关专业教材,也可供从事温度计量测试工作的科研人员和工程技术人员参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

河北省永清县第一胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787×1092 毫米 16 开本 印张 24.75 字数 601 千字

1998 年 8 月第 1 版 1998 年 8 月第 1 次印刷

*

印数 1—4000 定价: 38.00 元

本书编委会名单

主 编 崔志尚

副主编 竺惠敏

编 委 (以姓氏笔画为序)

刘 巍	李江蛟	竺惠敏
周嘉龄	崔志尚	

前 言

自 1985 年以来,除中国计量学院以外,不少高等工科院校相继设立了计量测试类专业。在这些专业中,“温度计量与测试”是主要的课程之一。多年来,该门课程一直缺乏合适的教材。本书是根据中国计量学院及有关高等工科院校的“温度计量与测试”课程的教学大纲,结合我们多年的教学经验编写而成。该书系统地介绍了温度计量与测试的基本原理和技术。内容包括温度与温标,各种温度计及温度显示仪表的原理、结构、特性、使用、检定、误差分析以及温度测量的方法及其应用等。

在该书编写过程中,我们力图做到内容的科学性、系统性和先进性,并突出实用性。我们认为,这样做对提高学生分析问题和解决问题的能力,适应今后的实际工作以及扩大本书的适用面会大有裨益。

本书第一章和第三章由周嘉龄(中国计量学院)编写;第二章、第五章和第七章由崔志尚(中国计量学院)编写;第四章由李江蛟(常州工业技术学院)编写;第六章和第八章由刘巍(天津市计量技术研究所)编写;第九章由竺惠敏(天津理工学院)编写;第十章由李江蛟和竺惠敏编写。全书由崔志尚统稿。

中国计量科学研究院赵琪研究员、上海工业自动化仪表研究所张继培研究员、辽宁省计量测试技术研究所宋德华教授级高工、天津钢管公司张怀明高工对本书进行了审定,提出了许多宝贵的指导性意见;在本书的编写过程中,中国计量出版社的领导及陈小林副编审、王红编辑给予了大力的支持和热情指导。在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中的疏漏及不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

1997 年 10 月

目 录

第一章 温度与温标	(1)
第一节 温度的基本概念	(1)
一、热力学基础	(1)
二、统计概念	(1)
第二节 温度单位	(2)
一、历史回顾	(2)
二、发展趋势	(3)
第三节 早期温标	(4)
第四节 热力学温标	(5)
一、由来和特点	(5)
二、实现途径	(5)
第五节 国际温标	(6)
一、目的和要求	(6)
二、发展概况	(7)
第六节 1990 年国际温标综述	(8)
一、固定点	(8)
二、内插仪器和内插方程	(10)
三、ITS-90 的准确性	(14)
四、ITS-90 与前期温标的差值	(16)
五、历次国际温标比较	(17)
第二章 温度计的物理原理	(21)
第一节 引言	(21)
第二节 热力学温度计	(21)
一、气体温度计	(21)
二、声学温度计	(26)
三、介电常数温度计	(27)
四、折射率温度计	(28)
五、噪声温度计	(29)
六、 ^3He 熔化曲线温度计	(32)
七、核定向温度计	(33)
八、蒸气压温度计	(34)
九、磁温度计	(36)
第三节 实用温度计	(37)

一、二极管温度计	(37)
二、核四极场共振温度计	(39)
三、石英晶体温度计	(41)
四、超声波温度计	(42)
第三章 电阻温度计	(44)
第一节 测温原理	(44)
一、导体电阻率	(44)
二、半导体电阻率	(45)
第二节 铂电阻温度计	(47)
一、结构	(47)
二、技术性能	(51)
三、内插方法	(54)
第三节 其它电阻温度计	(57)
一、铜电阻温度计	(57)
二、钢电阻温度计	(58)
三、铑铁电阻温度计	(59)
四、铂钴电阻温度计	(63)
第四节 半导体温度计	(64)
一、锗电阻温度计	(64)
二、碳电阻温度计	(65)
三、碳玻璃电阻温度计	(66)
四、热敏电阻温度计	(67)
第五节 检定与分度	(70)
一、定点法	(70)
二、比较法	(72)
第六节 电阻温度计的正确使用	(74)
一、震动与应力	(74)
二、淬火与氧化效应	(75)
三、磁阻效应	(75)
四、自热效应	(76)
五、压力影响	(76)
六、引线电阻影响	(77)
七、传热误差	(77)
八、计算 $W(T)$ 时的正确取值	(78)
第四章 热电偶	(79)
第一节 热电偶测温	(79)
一、测温原理	(79)
二、基本定律及其应用	(82)
三、测温电路	(90)

第二节 分类和特性	(92)
一、材料和种类	(92)
二、国际标准化热电偶	(94)
三、非国际标准化热电偶	(107)
第三节 结构型式	(112)
一、装配式热电偶	(112)
二、铠装热电偶	(116)
三、特种热电偶	(122)
第四节 热电势的影响因素	(127)
一、参考温度	(127)
二、热电极不均匀性的影响	(131)
三、使用气氛的影响	(132)
四、高温的影响	(136)
五、磁场的影响	(138)
六、高压与核辐射的影响	(138)
第五章 辐射温度计	(140)
第一节 引言	(140)
第二节 有关热辐射的基本概念	(140)
一、热辐射	(141)
二、辐射度量	(142)
三、辐射特性	(146)
四、黑体空腔	(149)
第三节 黑体辐射定律	(151)
一、普朗克定律	(151)
二、维恩位移定律	(153)
三、斯忒藩-玻耳兹曼定律	(154)
四、实际物体	(156)
第四节 表观温度	(157)
一、亮度温度	(157)
二、辐射温度	(159)
三、颜色温度	(161)
第五节 有效波长概念	(163)
一、平均有效波长	(164)
二、极限有效波长	(166)
三、有效波长的应用	(167)
第六节 辐射温度计的构成	(170)
一、光学系统	(170)
二、探测器	(174)
三、信号处理装置	(176)

第七节 辐射温度计的类型	(178)
一、单波段温度计	(178)
二、全辐射温度计	(182)
三、比色温度计	(182)
四、多波长温度计	(183)
五、特殊温度计和方法	(185)
第八节 分度或检定	(188)
一、绝对法分度	(188)
二、比较法检定	(191)
第九节 发射率测量技术	(193)
一、引言	(193)
二、影响因素	(193)
三、测量技术的适用性	(194)
四、直接技术	(195)
五、间接技术	(200)
六、混合技术	(201)
第六章 膨胀式温度计	(203)
第一节 概述	(203)
第二节 玻璃液体温度计	(203)
一、结构与原理	(203)
二、分类与用途	(208)
三、误差来源	(215)
四、检定	(218)
第三节 压力式温度计	(225)
一、工作原理及结构	(225)
二、分类及使用	(227)
三、检定	(231)
第四节 双金属温度计	(231)
一、工作原理及结构	(231)
二、分类及使用	(233)
三、检定	(235)
第七章 热通量传感器	(237)
第一节 引言	(237)
第二节 热通量传感器	(237)
一、测量原理	(237)
二、结构与制造技术	(239)
三、应用和测量误差	(240)
四、热通量传感器的检定	(244)
五、热通量传感器的结构对检定以及误差的影响	(245)

第三节 热流传感器·····	(246)
第八章 常用温度测试技术·····	(248)
第一节 概述·····	(248)
第二节 固体表面温度的测量·····	(248)
一、传热机理 ·····	(248)
二、特点 ·····	(248)
三、测温误差分析 ·····	(249)
四、典型的表面测温 ·····	(253)
五、提高测量准确度的方法 ·····	(256)
六、表面温度计的检定 ·····	(259)
第三节 气流温度测量·····	(261)
一、概述 ·····	(261)
二、低速气流的温度测量 ·····	(262)
三、高速气流的温度测量 ·····	(268)
四、动态温度的测量 ·····	(274)
五、动态测温元件与装置 ·····	(278)
第四节 液体温度测量·····	(280)
一、测温方法 ·····	(281)
二、不同溶液的温度测量 ·····	(282)
第九章 温度显示仪表·····	(291)
第一节 概述·····	(291)
一、质量指标 ·····	(291)
二、分类 ·····	(292)
第二节 温度变送器·····	(294)
一、概述 ·····	(294)
二、四线制温度变送器 ·····	(295)
三、二线制一体化温度变送器 ·····	(302)
四、具有温变功能的数显仪表 ·····	(305)
第三节 数显温度仪表·····	(306)
一、概述 ·····	(306)
二、基本组成 ·····	(309)
三、工作原理 ·····	(310)
第四节 微机化数字温度仪表·····	(326)
一、基本组成和 workflow ·····	(327)
二、硬件结构和电路 ·····	(328)
三、软件结构和程序框图 ·····	(332)
第五节 检定·····	(337)
一、标准仪器 ·····	(338)
二、检定条件 ·····	(338)

三、检定方法	(339)
四、绝缘电阻测定	(339)
五、注意事项	(339)
第十章 特殊条件下的温度测量	(340)
第一节 概述	(340)
第二节 低温测量	(340)
一、低温的获得	(340)
二、实用低温温度计	(343)
三、超低温测量	(346)
四、低温温度计的选择、安装和使用	(350)
第三节 等离子体的温度测量	(355)
一、特点及分类	(355)
二、局部热力学平衡状态	(356)
三、谱线强度法	(358)
四、谱线展宽法	(362)
五、辐射吸收法	(364)
第四节 光纤测温	(366)
一、概述	(366)
二、构造与原理	(367)
三、光纤温度传感器	(369)
四、光纤测温的应用	(372)
第五节 火焰温度的测量	(375)
一、特点	(375)
二、发光火焰和透明火焰	(376)
三、发光火焰的温度测量	(376)
四、透明火焰的温度测量	(378)
第六节 热像仪及其应用	(379)
一、概述	(379)
二、工作原理	(379)
三、应用	(381)
参考文献	(383)

第一章 温度与温标

第一节 温度的基本概念

温度是度量物体冷热程度的物理量，是国际单位制中 7 个基本物理量之一。在生产和科学研究中，许多物理现象和化学过程都是在一定的温度下进行的，人们的日常生活也和它密切相关。

作为一个重要的物理量——温度，必须对它建立一个严格的、科学的定义。但是，由于温度是强度量，它代表着物质内在性质，这就增加了人们对温度的理解和准确测量的难度。早期人们以直感出发，凭感觉到的或接触到的冷热程度区别温度的高低。用这种简单方法去认识温度，难以得出正确的结论。随着科学的发展，热力学和统计物理学的兴起，人们对温度的理解由定性发展到定量阶段，从而揭示了它的本质。

一、热力学基础

热力学是利用宏观方法研究热现象中物态转变和能量转换规律的一门科学，其中最重要的概念是热平衡。

在热力学中，根据系统达到热平衡状态的特征，得出通常所说的热力学第零定律：“在三个热力学系统中，如果其中两个系统中每一个系统都与第三个系统处于热平衡，则它们彼此也必定处于热平衡”。该定律表明，一切互为热平衡的系统必定具有一个数值相等的状态参量，此参量称为温度。它是系统是否与其它系统处于热平衡的标志，并能证明一切互为热平衡的系统都有相同的温度。

以上叙述不仅指出了温度的宏观概念，而且还为测量温度和检定温度计提供了依据。如选择适当的系统作为标准温度计，使其与待测温度的系统或某支温度计处于同一热平衡状态，这时，标准温度计的温度就等于待测系统或该温度计的温度。

二、统计概念

上一节我们运用了热平衡和热力学第零定律叙述了温度的宏观概念。下面我们从气体分子运动论和统计规律分析温度的微观因素。

设有一定质量的理想气体被封闭在处于平衡态的容器内，其压强与各分子运动速率有关，根据理想气体模型可导出理想气体压强公式为

$$p = \frac{1}{3} nm \bar{v}^2 \quad (1-1)$$

式中 n 为单位体积分子量； m 为气体分子质量； $\bar{v}^2$ 为气体分子速率的平均值。

式中气体分子的速率与其运动状况有关，通常在容器内每个分子都不断地和其它分子无规则地发生碰撞，故每个气体分子的速率都是随机变化的。然而，从统计意义上来看，气体分子速率的方均值会遵守一定的规律。这种规律表现在：在一定的条件下，气体分子按速率的分布是一定的；或者说，速率分布函数具有确定的形式。

早在 1860 年，麦克斯韦 (Maxwell) 从理论上得出在平衡态下气体分子的速率分布定律，或称麦克斯韦分布函数，其形式为

$$\overline{v^2} = 3kT/m \quad (1-2)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数； T 为热力学温度。

将上式代入式 (1-1)，得

$$p = nkT \quad (1-3)$$

考虑到气体分子的平均平动能为

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} \quad (1-4)$$

将上式代入 (1-1) 式，得

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon} \quad (1-5)$$

由 (1-3) 式和 (1-5) 式，可得

$$\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT \quad (1-6)$$

由 (1-4) 式，可知

$$T = \frac{m}{3k} \overline{v^2} \quad (1-7)$$

上述结果表明：理想气体分子平均平动能与热力学温度成正比。温度标志着物体内部分子无序运动的剧烈程度，这种剧烈程度可用 $\bar{\epsilon}$ 和 $\overline{v^2}$ 的大小表示。上述等式把温度和统计平均值联系了起来，表达了温度的微观意义。它只能应用于大量分子的集体效应。就单个分子而言，不存在温度的意义。

这些等式也表明：宏观物理量温度 T 与微观量分子的平均平动能 $\bar{\epsilon}$ 或分子平均速率 $\overline{v^2}$ 通过基本物理常数 k 联系了起来，从而为用基本物理常数来精确地确定温度单位提供了理论依据。

综上所述，温度可概括成：“温度是度量物体热平衡状态下冷热程度的物理量，它体现了物体内部微粒运动状态的特征”。

第二节 温 度 单 位

一、历史回顾

由于温度属基本物理量，故科学地，合理地定义单位十分重要。回顾温度单位的演变过

程可知,单位选取往往与温度数值表示方法密切相关。18世纪使用过的温度单位有“摄氏度”、“华氏度”、“列氏度”等,它们分别用 $^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$, $^{\circ}\text{R}$ 表示温度单位的符号。这些单位在当时温度测量中曾发挥过作用。但是,由于选用的单位不同,在同一热平衡状态下的被测对象,将会得到不同的测量结果。如在标准大气压下沸腾的水,用华氏度表示为 212°F ,用摄氏度表示为 100°C ,用列氏度表示为 80°R 。

为了统一温度量值,1887年国际计量委员会(CIPM)作出决议,采用佩埃内脱(Permet)和卡比伊(Chappuis)研制成的氢气气体温度计测得的冰点(0°C)和一个标准大气压下的水沸点(100°C)之间百分之一作为统一使用的温度单位,名称为百分度,符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。1927年把它列入了第一个国际温标的文本中。

1948年第九届国际计量大会认为:用水三相点作为温度固定点时,其复现性比用冰点高出两个数量级。因此决定用水的三相点代替冰点,作为温标的零点,另一个固定点仍为水沸点。冰点值用低于水三相点 0.01 度表示,并决定温度单位用“摄氏度”代替百分度。此时,其符号虽然仍为 $^{\circ}\text{C}$,但其含义已与百分度所用的 $^{\circ}\text{C}$ 有所区别。

1954年第十届国际计量大会决定用水三相点为基本固定点,定义热力学温标,而水三相点的准确温度为 273.16 开氏度。此决定在1960年第十一届国际计量大会上再次获得了通过,并把它列入新修改的国际实用温标中。它决定以开氏度作为表示热力学温度的SI基本单位,它的符号为 $^{\circ}\text{K}$ 。

1968年第十三届国际计量大会对温度单位作出新规定:“热力学温度(符号为 T)是基本物理量。其单位开尔文(符号为 K),定义为水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。由于历史原因,允许继续使用摄氏度作为温度单位,其符号仍为 $^{\circ}\text{C}$ 。用这种方法表示的热力学温度称为摄氏温度(符号为 t),定义为

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

根据定义,它的大小等于开尔文,温度差可以用开尔文表示,也可以用摄氏度表示。

二、发展趋势

计量学研究的一个重要方面是计量单位。它包括定义、复现手段和计量方法。早在1906年,著名物理学家普朗克曾提出过一种设想,建议用基本物理常数作为单位制的基础。80年代以来,在基本物理常数与计量学相关的研究领域取得了一系列出色的成就,使得有些基本物理量单位的复现精度达到令人满意的程度。如早期长度单位用实物标准——铂铱合金米尺复现米时复现精度为 10^{-7} 量级,用氦-86原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中波长的 $1\,650\,763.73$ 倍作为长度单位时,由此而得出米的复现精度为 10^{-8} 。1983年第17届国际计量大会通过的“米”新定义中采用基本物理常数中的光速来定义“米”,使得由此而得的长度单位的不确定度达到 10^{-9} 量级。又如电量程的基本物理量的电压单位,早期运用实物标准复现时,由于标准电池的年稳定性为 10^{-7} 量级,不确定度为 2×10^{-6} ,基准电阻的不确定度为 1×10^{-7} 。故用实物标准和欧姆定律确定的电压,其不确定度不会超过 10^{-6} 量级。80年代开始利用交流约瑟夫森效应建立了电压与频率的直接关系,其系数使用了基本常数组含量 $2e/h$ 。由此而得的电压不确定度可达 10^{-7} 量级。

上述情况表明,提高这些基本物理量精度的主要途径是使用基本物理常数。回顾温度单位的定义与复现方法,至今仍停留在水三相点的实物标准阶段。尽管目前水三相点的最佳复

现性可达 5×10^{-5} ，但是，此精度与采用基本物理常数复制的单位精度相比，相差甚远。为提高其复现精度，可充分利用基本物理常数具有不因地点、时间而异、不受环境和实验条件及材料性能影响并有最佳稳定性的特点，如上述几种基本物理量那样，用它来定义和复现温度单位。对此，我们在上一节的式 (1—6) 和 (1—7) 中已从理论上表明了完全有可能通过玻尔兹曼常数来定义温度单位。事实上，早已有人对此进行了探索和研究。预计，如能达到预期目的，这将能使温度单位的复现精度提高 2 个数量级。从目前进展情况而言，虽然还未获得最终结果，但是，它已成为改变和提高温度单位复现精度的一种良好途径。为温度单位的进一步发展开辟了广阔前景。

第三节 早期温标

有了温度单位定义，并未解决温度测量方法。为了定量地描述温度，必须具有能衡量温度高低的方法。通常将能用来表示温度数值的方法称为温标。它的演变和发展与人们的需要、科学研究和实验技术不断进展有关。

自然界中许多物质的物理属性与温度有关，如气体、液体的体积，导体的电阻，灼热物体的颜色和辐射能量都与其本身温度密切相关。运用这些物质，便能制成测温工具，即温度计。为了用它来表示温度的高低，于是结合选用的温度计，以实验方法或经验公式构成了温标。这种温标称为经验温标。早期的温标属经验温标，它起源于温度计的制造。1592 年，意大利的伽利略 (Galileo) 根据气体热膨胀现象，制造了一个感温器，用它能定性地表示温度的高低。1641 年，意大利费狄南 (Ferdinand) 首次制造了简易型玻璃液体温度计，在感温泡和毛细管内充注酒精，并加以密封。定度的方法是以当地即托斯卡纳 (Tuscani) 最冷的冬天为 11 到 12 度，以正在熔化的冰为 13.5 度，以该地夏天最热时太阳下的温度为 40 度。接着，1694 年哈克 (Hooke)，1665 年玻意尔 (Robert Boyle)，1667 年马格罗蒂 (L. Magalotti)，1694 年雷纳尔迪尼 (Renaldini) 和 1701 年牛顿 (Newton) 以及 1730 年列莫 (Reaumur) 等人都各自提出了建立经验温标的方法。可是，在测温史上影响大、使用广泛的为下述两种经验温标。

1714 年德国的仪器制造商，华伦海特 (Daniel Fahrenheit) 建立了华氏温标，用冰水混合后的温度为 32 度，水的沸腾温度为 212 度，中间均匀地分成 180 格，每格为华氏温标 1 度 ($^{\circ}\text{F}$)。

1742 年瑞典天文学家摄尔修斯 (Anders Celsius) 创立了摄氏百度温标，零度是冰的熔点，以水的沸腾温度为 100 度，两点之间 100 等分，每一等分为摄氏温标 1 度 ($^{\circ}\text{C}$)。

经验温标有如下的共同特征：

(1) 任何一个经验温标都必须由三方面的内容组成，即固定的温度点，表示固定点之间温度的温度计，用来确定固定点之间温度量值的数学关系式。这三方面内容构成了温标的三要素。

(2) 温度测量依赖于选用的测温介质，并人为地选用某些自然现象作为固定点的温度值。

这种温标主要缺点是局限性较大，测温范围有限，缺乏合理的单位，量值与温度计材料有关。

第四节 热力学温标

一、由来和特点

热力学温标是英国物理学家开尔文 (Kelvin) 于 1848 年以热力学第二定律为基础所引出的与测温物质无关的温标。根据卡诺定理, 与工作物质有关的两个热量之比应等于温度之比, 即

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

开尔文引出此温标后, 于 1854 年建议用一个固定点来确定此温标。乔克 (Glauke) 于 1938 年提议用冰点作为该温标的固定点。之后, 人们发现水的三相点 (273.16 K) 的稳定性能长期维持在 0.1 mK 范围内。因此, 1954 年第 10 届国际计量大会决定采用水的三相点作为热力学温标的基本固定点, 此温标的表达式为

$$T = \frac{Q_2}{Q_1} 273.16 \text{ K} \quad (1-9)$$

这种温标的最大特点是与选用的测温介质性质无关, 克服了经验温标随测温介质而变的缺陷, 故称它为科学的温标或绝对热力学温标。由此而得的温度称为热力学温度。从此所有的温度测量都以热力学温标作为基准。

二、实现途径

虽然热力学温标奠定了测量热力学温度的理论基础, 成为最基本温标。可是, 由于理想的卡诺循环是无法实现的。所以, 热力学温标是一种理论温标, 不能用实验方法直接实现。不过, 人们发现如用理想气体作为工作物质, 得出的结果与式 (1-8) 等同。

由热力学原理可知, 1 mol 的理想气体的状态方程为

$$pV = RT \quad (1-10)$$

式中 p 为理想气体压力; V 为摩尔体积; R 为普适气体常数; T 为理想气体的热力学温度。

由图 1-1 知, 当将理想气体作为卡诺循环的工作物质并进行卡诺循环时, 其过程由两个等温过程和两个绝热过程组成。图中 A 到 B 为等温膨胀, 其状态由 (V_1, T_1) 到 (V_2, T_1) 。此过程 $dT = 0$ 。由于理想气体内能是温度单值函数, 所以等温过程的内能保持不变, 即 $\Delta E = 0$ 。根据热力学第一定律, 其吸热量为

$$dQ = p \cdot dV \quad (1-11)$$

将上式积分, 并用式 (1-10) 代入, 得

$$Q_1 = \int_{V_1}^{V_2} dV \frac{R}{V} T_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (1-12)$$

同理, 从 C 到 D 为等温压缩过程。其放热量为

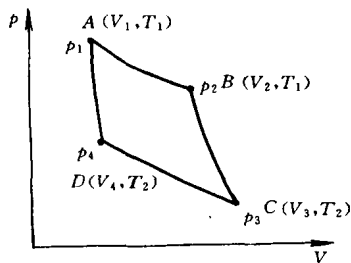


图 1-1 卡诺循环

$$Q_2 = \int_{V_4}^{V_3} dV \frac{R}{V} T_2 = RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4} \quad (1-13)$$

从 B 到 C 为绝热膨胀。由于绝热时系统不与外界进行热交换，即 $dQ = 0$ ，根据热力学定律可知，绝热时方程为

$$pV^\gamma = \text{恒量} \quad (1-14)$$

即

$$p_2 V_2^\gamma = p_3 V_3^\gamma = \dots$$

式中 γ 为理想气体的定压摩尔热容与定容摩尔热容之比值。利用式 (1-10) 可得

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

同理，在 D 到 A 的绝热压缩时，有

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$$

由此可得

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \quad (1-15)$$

代入式 (1-12)、(1-13)，得

$$Q_2/Q_1 = T_2/T_1 \quad (1-16)$$

上式称为理想气体温标表达式。它与式 (1-8) 等同。由此可知，热力学温标与理想气体温标具有相同的结果，如果这两个温标都选用同一个固定点，则两个温标表示的温度相等。至于实施理想气体温标的途径，可采用由实际气体构成的气体温度计经过非理想修正后实现。

在运用热力学原理实现热力学温度测量方法中还有：用声波在气体中传播速度与温度有关而建立的声学测温法，根据导体电阻两端产生的噪声电压与温度有关而建立的噪声测温法；利用顺磁场中磁离子的磁化率随温度而变的特性建立的磁测温法以及利用黑体的辐射亮度与温度之间关系建立的辐射测温法等。这些方法都能可靠地测定热力学温度。

第五节 国际温标

一、目的和要求

自从产生了热力学温标后，它已公认为最理想的、最基本的温标，成为基准测温法。但是，如果要求获得足够准确度，构成这类测温的装置将是非常复杂，成本昂贵，实验过程难度大，稍有不慎将会使得测量结果具有很大偏差，难以获得较高的复现性。因此，当时虽然某些条件较好的国家级实验室已相继建立了热力学温标。但是，在国际上仍难以广泛地实现温度量值的准确性和一致性。鉴于这些原因，很有必要建立一种国际温标。用它确定的温度应达到下列要求：

(1) 温标中使用的仪器、技术条件能体现当代科学水平，测得的温度应尽可能与热力学温度一致。

(2) 复现精度高，能使各国都能根据需要，方便、准确地复现此温标。