

温度计量测试丛书(一)

温 标

WEN BIAO

石质彦 编著 凌善康 审校

计 量 出 版 社

内 容 提 要

本书是“温度计量测试丛书”的第一分册,可说是全套丛书的“引言”。书中简述了温度的基本概念和有关温标的基础知识。并对几个主要经验温标、理想气体温标、热力学温标以及国际实用温标等都一一作了不同程度的介绍,尤其对现行温标(IPTS-68)及其修订版(1976年修订版)作了必要的分析和阐述。最后对近几年来各国对温标的研究成果和发展动向作了一点简单的介绍。本书可供从事温度计量,热物理,热工仪表以及与温度测量有关的其它专业人员和广大科技工作者参考,也可供高等院校的师生参考。

温度计量测试丛书(一)

温 标

石质彦 编著 凌善康 审校

责任编辑 窦绪昕

—**—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—**—

开本 787×1092 1/32 印张 6 1/4

字数 134 千字 印数 1—10 000

1985年1月第一版 1985年1月第一次印刷

统一书号 15210·383

定价 1.15元

编辑委员会

主任委员 王良楣

副主任委员 凌善康

委员 (以姓氏笔划为序)

石质彦 朱国柱 师克宽

汪时雍 陈守仁 陈锡光

张立儒 周本谦 赵琪

秦永烈 崔均哲 窦绪昕

戴乐山

前 言

本丛书是根据计量出版社关于按学科分类组编丛书的总体规划，由温度计量测试丛书编辑委员会配合计量出版社组织编写的。

党的“十二大”确定了到本世纪末力争使我国工农业总产值翻两番的宏伟目标，并决定把农业、能源、交通、教育、科学作为经济发展的战略重点。计量是现代化建设中一项必不可少的技术基础，在计量测试科学领域中，温度的计量与测试又是一个很重要的方面。温度是一个基本的物理量，它与其它许多物理参数有着密切的关系，因而在工、农业生产，在科学研究和日常生活中都离不开温度的准确测量和精密控制。广泛传播温度及温度测量仪表的基本知识，介绍国内外测温技术的先进经验，交流各项成果，培养技术人才，促进各项工作，为早日实现四个现代化创造条件，这就是组编本丛书的宗旨。

应该看到，目前，在基层企业中，受过计量测试训练的技术人员严重不足，很多职工渴望增长专业知识和提高操作技能；尤其是近年来，大批青年技术人员参加工作，这是发展计量测试科学的一支新生力量，但是他们深感知识不足，迫切需要系统地学习一些计量基础知识，熟悉各类仪器仪表的原理、特性、检定和使用方法，以便更快地掌握专业技术，提高生产效率。这套丛书主要是针对这部分人员编写的，当然也可作为温度计量短训班的教材及中等学校师生有关工程技术人员和科研工作者的参考书。

本丛书计划分成16分册，每一分册独立地、深入浅出地加以阐述，将陆续出版与读者见面。本丛书在组编过程中得到广大计量工作者和工矿企业技术人员的关心与支持，在此一并致谢。丛书编委会热忱地期望我国广大科学工作者共同促进本丛书的编辑出版工作。努力为我国早日实现四个现代化贡献力量。

限于我们的经验和水平，本丛书可能存在不少缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

温度计量测试丛书编辑委员会

目 录

第一章 温度和温标的基本知识	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 热平衡态	(3)
第三节 状态参量	(5)
第四节 温度的概念	(6)
第五节 温标	(7)
第二章 各种温标简介	(10)
第一节 经验温标	(10)
第二节 理想气体温标	(14)
第三节 热力学温标	(21)
第四节 国际温标	(33)
第五节 我国温标建立的概况	(55)
第六节 温标的传递	(62)
第三章 国际温标的发展及其修订	(64)
第一节 1927年国际温标 (ITS-27)	(64)
第二节 1948年国际温标 (ITS-48)	(67)
第三节 1948年国际实用温标 (1960年修订版)	(68)
第四节 1968年国际实用温标 (IPTS-68)	(70)
第五节 IPTS-68 与 IPTS-48 之间的差值	(74)
第六节 IPTS-68 的缺陷	(80)
第七节 1968年国际实用温标 (1975年修订版)	(89)
第八节 0.5—30K 范围 1976 年暂行温标	(113)
第四章 国际实用温标的近期发展	(122)
第一节 热力学温度的测量	(122)

第二节	固定点的研究.....	(128)
第三节	标准内插仪器的研究.....	(132)
第四节	关于内插公式的研究.....	(136)
第五节	未来国际实用温标的设想.....	(137)

附 录

附录一	1948年国际实用温标(1960年修订版)全文.....	(141)
-----	------------------------------	-------

附录二	1968年国际实用温标全文.....	(156)
-----	--------------------	-------

参考文献		(182)
------	-------	-------

第一章 温度和温标的基本知识

第一节 概 述

温度是国际单位制中七个基本单位之一，它的单位是开尔文，用 K 表示，是一个很重要的物理量，通常用它来表示物体的冷热程度。

在自然界中，任何物体的物理和化学性质都与温度有密切的关系，不论在工农业生产，科学研究以及在人们的日常生活中，温度是最常用，最重要的基本参数之一。例如在冶金工业中，若温度掌握不好，测量不准，对钢锭和铸件就会产生影响，甚至出现废品。反之，如能准确测量和控制炼钢过程中的热工参数或工作状态，就能保证产品质量，节约能源，提高生产效率，降低生产成本。无数事实有力地说明，温度测量在工业生产中起着重要的作用。其它如机械、化工、石油、环保、宇航工程、医药卫生以及农业和轻纺工业等各种行业，都离不开温度的测量和控制，而且随着生产的迅速发展，对温度测量的准确度有了更高的要求。对整个国民经济和人民生活具有极大的影响，所以，搞好温度测量是一项非常有价值的工作。

温度测量是一项比较复杂的工作，有它自己的特殊性，不象长度、质量等物理量那样，只要选定一个长度“米”或质量单位“公斤”之后，不管物体有多长或多重，都可以用直接比较的方法以决定长短或轻重。但对温度来讲，就不可能采用那样简单的办法。那末，究竟如何测量物体的温

度？这是一个非常实际的问题。人们在日常的生产劳动和生活实践中，习惯于用冷、热等主观感觉来定性地描述温度的高低，但凭这种感觉只能反映出一种现象，不能揭示实质问题，不能给出数量的概念。要想测出物体的温度，必须通过观察其它物体（叫测温物质）受热后物理性质的改变来实现，这就是温度测量的特点。一般来讲，只要物体的某一物理属性随温度的变化是线性的，就可以用来制造测温仪器（即温度计）。温度计是用于专门测量温度的仪器，已早被世人所熟悉。自从意大利科学家伽利略（Galileo）于1592年制成第一支温度计以来，为适应生产和技术的发展，至今已出现了各种不同的温度计，最常用的有：玻璃液体温度计、电阻温度计、热电偶以及辐射温度计等，真是种类繁多，规格各异。就其测温范围而言，可从接近绝对零度（ -273°C ）一直到几千度、几万度甚至上百万度。根据被测对象的不同来选择所需要的温度计，以满足实际要求的精度。

由上述可知，温度是一个很重要的物理量。测温仪器又是五花八门，那末，到底根据什么标准来判断温度计是否准确呢？又根据什么来决定温度计的刻度值呢？这就需要建立“温标”，也可以说是温度的“标尺”，也就是本书所要解决的问题。有了温标就能保证温度量值的准确一致。建立温标，必须满足三个基本条件：第一，选择合适的内插仪器；第二，必须决定内插仪器的测温参量和温度间的关系；第三，必须规定固定点并给出温度值，这三者的组合就构成温标。

在温度测量的历史上，曾出现过各种不同的温标，例如：摄氏温标，列氏温标和华氏温标等，它们都采用两个固定点（即水沸点和冰融点），但赋予不同的数值，而且中间的分度值也不一样，所有这些都称为经验温标。随着科

学技术和社会生产力的不断发展，以后又相继出现了气体温标，热力学温标和国际温标。这些温标的产生都是建立在当时的科学技术水平之上，各自具有不同的准确度。对统一温度量值，发展生产和促进科学技术的国际交流都起了重要的作用。

科学技术发展的进程表明，技术问题越复杂，建立的工业体系越庞大，对温度测量的要求就愈迫切。所以说，温度测量渗透到各个生产领域，它是促进生产发展的重要手段之一。

第二节 热平衡态

在自然界中，一个物体总是占有一定的空间，并经常随时间改变它的位置和状态。人们在分析物理现象时，往往把注意力集中于物体的某一部分，并设想将这部分物体与它周围的物体分隔开来，通常把单独分隔出来的某一部分物体叫做系统。在研究热现象及其规律时，总是首先把系统（此时称热力学系统）与周围的物体区别开来。

显然，系统是我们研究物体热现象的主要对象。除了系统本身外，凡是能影响系统的状态发生变化的一切外部因素，叫做外界或环境。当把系统和外界划清楚以后，人们就可以通过系统与外界如何相互影响来确定系统所处的状态。这种相互作用，主要表现在质量和热量的交换。例如，在考虑蒸汽管道的散热情况时，常把管道内的蒸气看作所研究的系统（以管道内壁面和进出口管道的截面为界）。此时，我们只研究管道的蒸气压强、温度、速度等，而对它的外界如大气、保温层及管道等则不去研究，只是分析和观察它们与蒸汽的热交换过程。

为了研究热力学系统，就必须知道系统在某一时刻所处

的状态及其变化情况，如系统是处于静止状态，还是处于运动状态；蒸气是处于饱和状态，还是处于过饱和状态……等。

众所周知，热力学是利用宏观方法研究物体热现象或热效应的一门科学。在大多数情况下，热力学所研究的是处于热平衡状态下的热力学系统的宏观特性及其变化规律。因此，热平衡态是热力学中最基本、最重要的概念。所谓热平衡态是指这样一种状态：当没有外界影响的情况下，即外界对系统既不作功又不传热，热力学系统在此时期内不发生任何变化。换句话说，如果没有外界的影响，系统在长时期内维持着它原来的平衡状态。假定有两个物体系统，原来各自处于平衡态，如果使这两个系统互相接触，它们之间就要发生热交换，即热的物体要变冷，冷的物体要变热，于是两个系统的状态都发生了变化。当经过足够长的时间后，它们的热状态将不再发生变化，这就说明两个系统达到了一个共同的平衡态。之后，如果把这两个物体再分开，重新又把它们放在一起，如果没有外界影响，它们不会再发生新的变化，继续维持着它们共有的平衡态。这种平衡是在两个系统发生热交换的条件下达到的，所以叫做热平衡。由于热平衡是一种动态平衡，因而又叫做热动平衡。

设有一个开口容器，将水装在该容器中，则水将不断地蒸发。若把容器密封，则经过一段时间后，水的蒸发现象将停止，也即水和蒸汽达到饱和状态（平衡状态）。如果没有外界影响，状态将不会发生变化。

再如，有两个物体 A 和 B ，它们的冷热程度不同，若使这两个物体互相接触，在经过足够长的时间后，则它们的冷热程度必然趋向一致，此时，物体 A 和 B 彼此处于热平衡态。

应该指出，热平衡态只是一种理想的概念。实际上并不存在完全不受外界影响的热力学系统，因而系统的宏观特性总是或多或少地随时间而发生变化。但是，如果系统的变化是如此的缓慢，以致于在有限的时间间隔内系统的宏观特性近似地保持不变，则这种状态仍然可以当作平衡态加以处理。

第三节 状态参量

现在我们讨论如何描述一个系统的热平衡态。经验告诉我们，系统处于平衡态时，可用某些确定的物理量来描述它，这些物理量通常称为状态参量。

假设我们研究的系统是装在密封容器中的一定质量的气体。因为气体的密度很小，可以忽略重力的影响。那末，在平衡态时，气体的密度和压强都是保持均匀的。也就是说，气体的密度和压强到处都是一样的。如将气体加热，则可发现气体的压强增加了，它的体积由于密封在容器内而没有发生明显的变化。反之，若在加热时，保持气体的压强不变，则气体的体积就会膨胀。由此可见，气体的压强和体积是可以独立地改变的。要想描述这个系统的状态，就得用压强和体积这两个参量。如果我们研究的是混合气体，还应该用能反映系统化学成分的参量。当有电磁现象出现时，除上述三种参量之外，还须引入电磁参量。

总起来讲，在一般情况下，对于一个物体的平衡态，需要用力学、化学、电磁等参量来予以描述。对于一个系统究竟用哪几个参量，完全取决于系统本身的特性。但上面提到的各类参量都不能直接表征系统的冷热程度。因此，为了完全描述热力学系统，就必须引进一个我们将着重讨论的热力学所特有的“新”的物理量——温度。

第四节 温度的概念

温度是从热力学角度来描述平衡态的宏观特性的基本物理量。在日常生活中，人们通常用温度来表示物体的冷热程度。这种表示法是建立在主观感觉的基础上，感觉越热，温度越高；反之，感觉越冷，温度就越低。这种通过触摸物体来判断物体温度高低的作法只能起到“定性”了解的作用，不能揭示物体的实质内容，因此，这样引入的温度概念是不严格的。

要精确地、定量地定义温度，必须与热平衡状态联系起来。热力学第零定律指出，若两个系统各自与第三个系统处于热平衡，则它们之间也必然处于热平衡，现取 A 、 B 、 C 三个热力学系统作实验。将 B 和 C 隔开，但让它们同时与 A 相接触，经过一段相当长的时间后， A 和 B 以及 A 和 C 将达到热平衡。然后再让 B 和 C 两个系统相接触，则可发现 B 和 C 之间也没有什么变化，说明它们也处于热平衡。由此，可以得出结论，存在着一个描述相互之间处于热平衡的各个系统所共同具有的热力学状态的宏观特性，这一宏观特性被定义为温度。这就是说，温度是决定一系统是否与其他系统处于热平衡的条件，一切互为热平衡的系统都具有相同的温度。若离开了热平衡态，温度本身就失去了其固有的特性。也就是说，对于非平衡态，就无所谓温度而言。

从统计物理的观点出发，物体的温度直接与组成该物体的分子的能量有关，随着温度的升高，分子运动就会加剧。具体说来，温度是与物体内分子的平均动能成正比。因此，温度是物体分子平均动能的量度。应该懂得，温度是一个宏观的物理量，是对大量分子的平均动能的统计平均结果，它对于单个分子来说是没有意义的。当然，确定温度并不需要

考虑分子运动，这里指出它们之间的关系，只是为了揭示温度的实质，进而加深对温度这一概念的理解。

严格讲来，要想给温度下一个简单而明确的科学定义，并使其适应于各种情况，就目前而言，还是相当困难的，尤其在超高温和超低温情况下，如何给温度以确切的定义，还是一个需要进一步深入研究的问题。我们这里谈的温度概念，是人们早已熟知的传统的概念，只适应于当前我们所介绍的温标建立和温度测量的范围。

总之，温度是一个极其特殊的物理量，它与其他基本物理量不同，它是强度量，或者说是不可相加的量，这就使建立温度标准变得较为复杂。

第五节 温 标

上述关于温度的定义仍然是定性的，不完整的，完整的定义还应包括温度的数值表示法。这一套用数值表示温度的方法（包括定义和内插方程等）就叫温标。或者说温标就是温度的标度方法。而测量温度的仪器叫做温度计。

从上面我们已经知道，处于热平衡的各系统的温度可以用数值来表示。所谓建立温标只是采取一套方法和规则给出温度的数值概念。当温标确定之后，表示两个系统间热平衡的条件就是它们具有相同的温度值。反之，如果两个系统的温度值不同，我们可以确信，两个系统不处于热平衡。由此可见，温度相等是热平衡的必要而充分的条件。

自然界中，有许多物体，它们的某些物理属性随温度的改变而发生相应的变化，如液体的体积、金属的长度、导线的电阻、气体在体积不变时的压强和在压强不变时的体积以及灯丝的颜色…等，其中任何一种性质都可以用来制成温度计。也就是说，可以用来建立一种经验温标。

现在我们讨论如何建立温标。用 x 表示物体的某种测温性质，如热电偶的热电势 E 、导线电阻 R 、定容气体的压强 p …等。如果我们假定温度计和物体系统达到热平衡时的温度与测温性质 x 的关系是线性的。那末，可以认为，两个温度之比和两个对应的测温性质 x 之比相等。这就意味着，玻璃管水银温度计中的水银柱改变一个单位长度，就表示温度也改变一个确定的数值，不管它的最初温度怎样，都是如此。由此我们可以把两个系统的温度之比写成下面的关系式：

$$\frac{T(x_1)}{T(x_2)} = \frac{x_1}{x_2} \quad (1-1)$$

在建立温标时，按照现代计温学的选择，用水的三相点作为定义固定点，即令 $T(x_2) = 273.16 \text{ K}$ 所以，对任何温度计，则有：

$$T(x_1) = 273.16 \text{ K} \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (1-2)$$

我们可以将此式应用于不同的温度计。对于玻璃液体温度计，以 x 代表液柱长度 L ，由上式可得：

$$T(L_1) = 273.16 \text{ K} \left(\frac{L_1}{L_2} \right) \quad (1-3)$$

对于电阻温度计， x 被导体的电阻 R 所代替，因而有：

$$T(R_1) = 273.16 \text{ K} \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (1-4)$$

对于定容气体温度计， x 被气体的压强 p 所代替，故有：

$$T(p_1) = 273.16 \text{ K} \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad (1-5)$$

依此类推，还可写出许多其它物体的测温性质的关系式来。

例 1 有一个气体温度计，在水三相点时，其压强为 $15.0 \times 10^4 \text{ bar}$ ，而在水沸点时其压强为 $20.5 \times 10^4 \text{ bar}$ ，求水的正常沸点的温度是多少？

根据式 (1-5) 可得：

$$T(p_1) = 273.16 \text{ K} \frac{20.5 \times 10^4}{15.0 \times 10^4} = 373.3 \text{ K}$$

例 2 将一支铂电阻温度计的测温泡放入三相点瓶中，这时该温度计的电阻 R 为 90.35Ω ，如果将测温泡放在使温度计的电阻为 96.28Ω 的环境中，求这时的温度是多少？

根据式 (1-4) 则有：

$$T(R_1) = 273.16 \text{ K} \frac{96.28}{90.35} = 291.1 \text{ K}$$

第二章 各种温标简介

第一节 经验温标

温标的演变与发展，是与科学研究和实验技术的不断进步和完善密切相关的。十六世纪末，十七世纪初，伽利略（Galileo）根据空气受热膨胀的原理制成了第一个能够指示温度的仪器。从伽利略到现在的四百年中，出现了各种各样的温标。这些温标都是当时科学研究的结晶和理论与实践相结合的产物。它们对于当时的科学技术发展起了重要的作用。

1632年，法国有位医生，制成了第一支液体温度计，它是用水作为测温物质，因为不是密封的，介质的蒸发导致很大的测量误差。1650年出现了密封式液体温度计，所用介质是带色酒精。1667年，迈格洛特（Li, Magalotti）采用量规在玻璃管上划分10等份，每一等份用白珐琅作一标记，应该说这是最早出现的有温度标尺的温度计。1693年，雷奈迪尼（Renaidini）提出用冰点和水沸点作为温标分度的两个固定点。

直到1714年，华伦海脱（Farenheit）制定了华氏温标以后，温度测量才有了一个共同的标准，才能对不同地点、不同时间及各人所测量的温度值进行比较。

华伦海脱曾发现气压表的水银柱高度随温度而变化，这就促使他开始对水银温度计进行研究。1714年，他终于制成了第一支玻璃水银温度计。这种温度计的刻度是按历史上最