

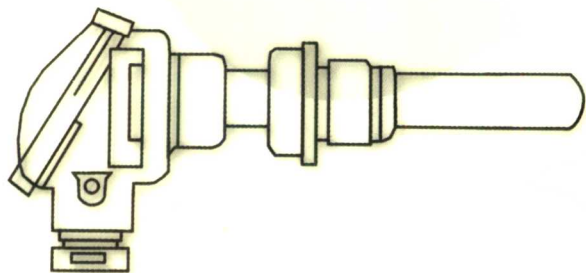
高等学校适用教材

WENDU JILIANG

温度计量

高庆中 主编

中国计量出版社



高等学校适用教材

温 度 计 量

高庆中 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

温度计量/高庆中主编. —北京: 中国计量出版社, 2004.1

(高等学校适用教材)

ISBN 7-5026-1780-9

I. 温… II. 高… III. 温度—计量—高等学校—教材 IV. TB942

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 109260 号

内 容 提 要

本书系统、全面地介绍了温度计量的基本原理和技术, 并在此基础上进一步介绍了一些常用的温度测试技术。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、误差分析以及一些特殊工况下的温度测试方法。

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的教材, 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

电话 (010) 64275360

E-mail jlfbx@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm × 960 mm 16 开本 印张 25.25 字数 432 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 000 定价: 38.00 元

质量技术监督高校教材

编审委员会

主 任 张玉宽

副主任 马纯良 孙秀媛

委 员 瞿兆宁 裴晓颖 黄 夏 何伟仁 李小亭
张 艺 宋明顺 杨建华 吴宁光 史菊英
赵玉禄 孙克强 周志明 张莉莉 王庆仁
许吉彬 刘宝荣 韦录强 张万岭 孙振江
陈小林 朱和平 李素琴 刘宝兰 刘文继
张桂琴

本书编委会

主 编 高庆中

副主编 王素珍

编 委 (以姓氏笔画为序)
方立德 王素珍 李晓梅 高庆中

出版前言

随着我国加入世界贸易组织，社会主义市场经济和质量技术监督事业的迅速发展，迫切需要大量的质量技术监督专业人才。质量技术监督高等专业教育在质量技术监督教育事业中占有重要地位，对提高在职人员的素质、改善队伍结构、培养新生力量具有重要意义。大力发展质量技术监督高等专业教育，将对质量技术监督事业产生深远的影响。

近年来，全国各地质量技术监督院校办学条件不断改善，招生规模不断扩大，教学质量和水平不断提高。与此同时，在质量技术监督教育中，高等教育所占比重不断增大。为了适应这种形势，加快质量技术监督院校教材建设的步伐，根据质量技术监督院校对专业教材的实际需求，我们组织全国质量技术监督及相关院校和单位编写了有关标准化、计量、质量等方面的系列专业基础课和专业课教材。

这套教材主要是根据质量技术监督高等专业教育的需要编写的。在目前情况下，存在多种形式的质量技术监督高等和中等专业教育，因此，在编写过程中从内容选取、结构设计、深浅程度等方面考虑了适用的多样性。质量技术监督普通中等专业教育、职业教育和人员技术培训等，可参考本套教材的基本内容，适当调整使用。

原国家质量技术监督局政策法规宣传教育司进行了本套教材的前期组编工作。参加教材审定工作的院校和单位有：中国计量

学院、河北大学质量技术监督学院、四川省技术监督学校、山东省质量工程学校、广西计量学校、河南省质量工程学校、天津市渤海职业中等专业学校、吉林省技术监督职工中专学校、北京市质量技术监督培训中心等。在教材的编写、审定等工作中，中国计量出版社、河北大学质量技术监督学院等单位做了很多具体、细致的工作。

这套教材的编写工作是在时间紧、难度大的情况下进行的，虽然经过多方面的努力，但仍可能存在很多不足之处，甚至于错误，我们拟在使用过程中听取各方面意见，于适当时机组织修订。

国家质量监督检验检疫总局人事司

2003 年 4 月

编 者 的 话

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”课程的内容,结合我们的教学经验编写而成。可供各大专院校的测控技术与仪器专业作为专业课教材,亦可供从事温度计量工作的技术人员参考。

该书系统地介绍了温度计量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、修理、检定和误差分析,尤其第6章在前5章的基础上由浅入深地介绍了一些常用温度测试技术。该书建议教学学时为72学时,其中实验24学时(实验指导书另编)。

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

本书第1章、第2章和第6章由高庆中(河北大学质量技术监督学院)编写,第3章由方立德(河北大学质量技术监督学院)编写,第4章由李晓梅(四川工业学院技术监督分院)编写,第5章由王素珍(杭州计量学院)编写。全书由高庆中统稿。

在本书的编写过程中,中国计量出版社的领导、总编及责任编辑给予了大力的支持和热情指导;中国计量科学研究院段宇宁同志提供了很多宝贵意见。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,恳请批评指正。

编 者

2004年1月

目 录

第 1 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	(2)
第二节 温标的建立	(3)
第三节 温标的发展	(4)
一、经验温标	(4)
二、热力学温标	(5)
三、国际温标	(7)
第四节 1990 年国际温标 (ITS—90) 综述	(8)
一、定义固定点	(8)
二、内插仪器和内插方程	(12)
习题一	(17)
第 2 章 电阻温度计	(18)
第一节 测温原理	(18)
一、导体电阻率	(18)
二、半导体电阻率	(20)
第二节 铂电阻温度计	(21)
一、结构与分类	(21)
二、技术性能	(27)
三、内插方法	(31)
第三节 其他金属电阻温度计	(34)
一、铜电阻温度计 (CuRT)	(34)
二、钢电阻温度计 (InRT)	(36)

三、铑-铁电阻温度计 (RIRT)	(37)
四、铂-钴电阻温度计 (PCRT)	(37)
第四节 半导体电阻温度计	(37)
一、锗电阻温度计 (GeRT)	(37)
二、碳电阻温度计 (CRT)	(39)
三、碳玻璃电阻温度计 (CaRT)	(40)
四、热敏电阻温度计	(41)
第五节 使用电阻温度计的注意事项	(45)
一、震动与应力	(45)
二、淬火与氧化效应	(45)
三、磁阻效应	(46)
四、自热效应	(47)
五、压力的影响	(48)
六、引线电阻的影响	(48)
七、热电势的影响	(49)
八、漏热误差	(49)
九、迟滞	(50)
十、绝缘不良的影响	(50)
十一、环境温度的影响	(50)
十二、计算 $W(T)$ 时的正确取值	(51)
第六节 测量电路	(51)
一、单电桥法	(51)
二、双电桥法	(52)
三、电位差计法	(53)
四、不平衡电桥法	(55)
第七节 检定与分度	(55)
一、定点法	(56)
二、比较法	(58)
习题二	(62)
第 3 章 膨胀式温度计	(63)
第一节 概述	(63)
第二节 玻璃液体温度计	(63)
一、测温原理及灵敏度	(64)
二、结构与分类	(69)

三、误差来源	(77)
第三节 压力式温度计	(81)
一、压力式温度计的构造与分类	(81)
二、使用压力式温度计的注意事项	(84)
第四节 双金属温度计	(86)
一、双金属温度计的测温原理	(86)
二、双金属温度计的结构	(87)
三、双金属温度计的材料组成和分类	(88)
第五节 膨胀式温度计的检定	(89)
一、玻璃液体温度计的检定	(89)
二、压力式温度计和双金属温度计的检定	(96)
习题三	(97)
第 4 章 热电偶	(98)
第一节 热电偶测温原理	(98)
一、塞贝克效应和塞贝克电势	(99)
二、珀尔帖效应和珀尔帖电势	(101)
三、汤姆逊效应与汤姆逊电势	(103)
四、热电偶回路电势及三种电势的关系	(105)
第二节 热电偶回路定律及其应用	(107)
一、均质导体定律及其应用	(107)
二、中间导体定律及其应用	(108)
三、中间温度定律及其应用	(111)
四、参考电极定律	(113)
第三节 热电偶测温回路的分析	(114)
一、几种典型的热电偶测量线路	(115)
二、热电偶测量回路的分析	(116)
三、配热电偶电测仪表	(118)
第四节 热电偶材料及分类	(121)
一、热电偶材料	(121)
二、标准化热电偶和钨铼热电偶	(129)
三、热电偶的分类	(135)
第五节 热电偶测量端的焊接	(143)
一、焊接的工艺过程	(143)
二、焊接方法	(146)

第六节 热电偶测量误差及消除方法	(149)
一、分度误差	(149)
二、热电特性不稳定的影响及消除方法	(149)
三、参考端温度的影响及补偿方法	(155)
四、热交换引入的误差	(163)
五、动态响应误差	(164)
六、绝缘不良引入的误差	(165)
七、干扰引入的误差	(166)
八、热电偶的安装及维修	(169)
第七节 热电偶的分度与检定	(172)
一、检定设备与标准器的选择	(172)
二、纯金属定点法	(174)
三、黑体空腔法	(176)
四、比较法	(177)
第八节 配热电偶、热电阻用动圈仪表的检定	(184)
一、标准仪器及设备	(184)
二、检定条件	(185)
三、检定项目与方法	(185)
第九节 配热电偶、配热电阻用数字式仪表的检定	(191)
一、标准仪器及设备	(191)
二、检定条件	(192)
三、检定项目与方法	(192)
习题四	(202)
第 5 章 辐射测温法	(203)
第一节 热辐射的基本概念	(203)
一、热辐射	(203)
二、热辐射度量	(205)
三、辐射能量的分配与绝对黑体	(210)
四、光谱发射率	(212)
第二节 黑体辐射定律	(214)
一、普朗克定律	(215)
二、维恩位移定律	(220)
三、斯忒藩—玻耳兹曼定律	(222)
第三节 视在温度	(224)

一、概念的引入	(224)
二、亮度温度 T_s	(226)
三、辐射温度 T_p	(229)
四、颜色温度 T_c	(231)
第四节 全辐射温度计	(235)
一、测温原理	(236)
二、辐射感温器的分类	(238)
三、辐射感温器结构	(238)
第五节 亮度温度计	(242)
一、光学高温计	(242)
二、光电高温计	(257)
三、标准光电高温计	(262)
四、光电比较仪简介	(264)
第六节 比色高温计	(265)
一、简述	(265)
二、工作原理和分类	(266)
三、基本结构	(266)
四、典型的比色温度计	(267)
第七节 红外测温仪	(272)
一、红外温度计的光学材料和探测器	(272)
二、红外温度计原理与结构	(278)
第八节 热像仪	(280)
一、基本结构与作用原理	(280)
二、红外热像仪的有关术语和基本参数	(287)
第九节 光纤测温	(291)
一、概述	(291)
二、光纤结构与材料	(291)
三、传光原理和特性	(292)
四、光纤温度计	(295)
第十节 辐射温度计的分度和检定	(303)
一、辐射温度计检定系统	(303)
二、辐射源	(306)
三、分度或检定	(314)
习题五	(322)

第 6 章 常用温度测试技术

第一节	概述	(323)
第二节	温度变化量的测定	(323)
第三节	特定温度点的精密测量	(324)
第四节	温场均匀性的测试	(324)
第五节	远距离测温	(325)
第六节	热通量的测试	(327)
第七节	固体表面温度的测量	(329)
一、	传热机理	(329)
二、	特点	(329)
三、	测温误差分析	(329)
四、	典型的表面测温	(335)
五、	提高测量准确度的方法	(339)
六、	表面温度计的检定	(344)
第八节	液体温度的测量	(347)
一、	测温方法	(347)
二、	不同溶液的温度测量	(349)
第九节	气流温度测量	(360)
一、	概述	(360)
二、	低速气流的温度测量	(361)
三、	高速气流的温度测量	(371)
四、	动态温度的测量	(378)
五、	动态测温元件与装置	(383)
习题六		(385)
参考文献		(387)

第 1 章

温度与温标



第一节 温度的基本概念

温度是国际单位制中 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温度密切相关。

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。它是系统是否与其他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。

根据热力学原理，一定量理想气体的热状态方程为

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

式中： R ——气体普适常数；
 p ——气体的压强；
 V ——气体的体积；
 T ——气体的热力学温度。

该式说明这一定量气体的热力学温度（ T ）表征了自身内能（ pV ）的大小。

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

前面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

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

式中： n ——单位体积分子数；
 m ——气体分子质量；
 $\bar{v}$ ——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他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。这种规律表现为：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

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

式中： k ——玻耳兹曼常数；
 T ——热力学温度。

将上式代入式（1-1），得

$$p = nkT \quad (1-4)$$

考虑到气体分子的平均平动能为

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 \quad (1-5)$$

将上式代入(1-1)式,得

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon} \quad (1-6)$$

由(1-3)式和(1-5)式,可得

$$\bar{\varepsilon} = \frac{3}{2} kT \quad (1-7)$$

由(1-4)式,可知

$$T = \frac{m}{3k} \bar{v}^2 \quad (1-8)$$

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 $\bar{\varepsilon}$ 和 $\bar{v}^2$ 的大小表示。上述等式把温度和统计平均值联系起来,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 通过基本物理常数 k ,与微量量分子的平均平动能 $\bar{\varepsilon}$ 或分子平均速率 $\bar{v}$ 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,从宏观的角度看,热状态表达了系统所含内能的多少;从微观的角度看,热状态也描述了物体内部分子无序运动的剧烈程度。一般说来温度是用来表征物体热状态的物理量。但是,任何物体的热状态都不是孤立的,无论是热状态的保持,还是热状态的改变,都需要与周围的物体进行热交换,达到热平衡来实现的。所以确切地讲,温度是用来表征系统热平衡状态的物理量。这里面的平衡包括动平衡、准平衡和瞬时平衡。

第二节 温标的建立

清楚温度的概念之后,还应当把它定量地表示出来,这就需要建立温标。温标就是温度的量值表示方法。

所谓建立温标,就是采用一套方法和规则来定义温度的数值。当温标确定之后,表示两个系统之间达到热平衡的标志就是它们具有相同的温度数值。

温标的建立应具备三个条件,即固定点、测温仪器和内插公式。通常把定义固定点、测温仪器、内插公式这三个条件称为温标的三要素。

(一) 固定点

在通常条件下,物质有三种状态,即气态、液态和固态。这三种状态

也被称为三相。相是系统中物理和化学性质完全均匀的部分,这是物质分子集结的特定形式。在特定的温度和压力下,一种相可以转变为另一种相,称为相变。物质在相变过程中,会呈现二态或三态共存,而温度恒定不变。物质不同相之间的可复现的平衡温度称为固定温度点,简称固定点。要建立一个温标,首先要选定定义固定点,并规定其温度数值,其他温度才能与之比较确定数值。

(二) 测温仪器

定义固定点被确定后,要选一种测温仪器,作为实现温标的仪器。

(三) 内插公式

定义固定点的温度值和测温仪器确定后,用来确定任意点温度值的数学关系式,称为内插公式。它是用来描述固定点间温度值的函数关系式。例如:假定某一测温仪器的变量 y 与温度 t 的变化呈简单线性关系

$$y = kt + c \quad (1-9)$$

首先,确定固定点的温度数值 t_1, t_2 , 则 k, c 的值就可以确定了,即

$$y_1 = kt_1 + c$$

$$y_2 = kt_2 + c$$

整理得

$$k = (y_2 - y_1) / (t_2 - t_1)$$

$$c = y_1 - [(y_2 - y_1) / (t_2 - t_1)] t_1$$

k, c 确定之后,这个线性内插方程也就确定了,即

$$t = t_1 + (t_2 - t_1) (y - y_1) / (y_2 - y_1) \quad (1-10)$$

式中: y ——测温变量。

根据式 (1-9) 就可以通过测量变量 y 来求得任一温度 t 。

实际上测温变量与温度的关系很少呈简单的线性关系,多数都呈较为复杂的函数关系。

第三节 温标的发展

一、经验温标

所谓经验温标,就是借助于某物质的物理参量与温度的变化关系,用实验方法和经验公式构成的温标。

从 17 世纪初伽利略制造出第一个测温器,到 19 世纪中叶开尔文提出热力学温标以前,欧洲的许多科学家致力于测温技术的研究,制出了温度