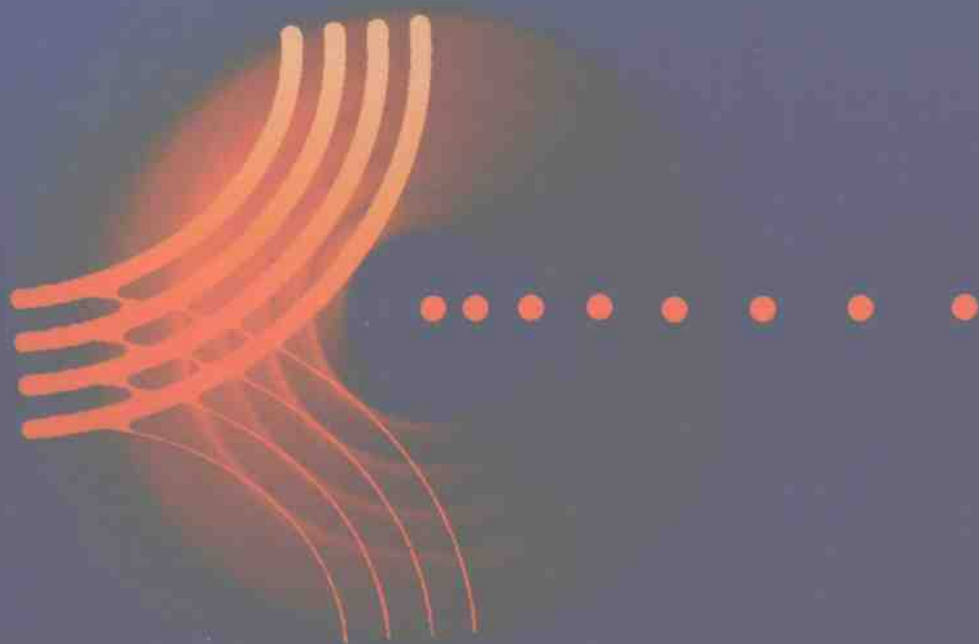


4
计量检测人员培训教材

温度计量

国家质量监督检验检疫总局计量司 组编

上海市计量测试技术研究院 编写



7

上海市计量测试技术研究院
上海计量测试技术研究院

计量检测人员培训教材

第 4 分册

温度计量

国家质量监督检验检疫总局计量司 组编

上海市计量测试技术研究院 编写

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

温度计量. 第4分册/国家质量监督检验检疫总局计量司组编; 上海市计量测试技术研究院编写. —北京: 中国计量出版社, 2007. 6

计量检测人员培训教材

ISBN 978-7-5026-2655-6

I. 温… II. ①国…②上… III. 温度测量—技术培训—教材 IV. TB942

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 071800 号

内 容 提 要

本书系《计量检测人员培训教材》第4分册, 内容通俗易懂, 对温度计量基础知识以及辐射测温仪、热电偶、膨胀式温度计、电阻温度计、温度二次仪表等的基本原理、分类、使用方法、检定、数据处理、合格评判和典型计量器具的不确定度分析等进行了系统、完整的介绍, 归纳了 50 多种温度计量器具的检定内容。

本书可作为温度计量检测人员培训教材, 亦可供有关人员在日常工作中使用及作为自学用书。

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

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市密东印刷有限公司

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787mm×1092mm 16 开本 印张 27.5 字数 630 千字

2007 年 6 月第 1 版 2007 年 6 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价 (平装): 60.00 元

总 序

计量是关于测量的科学,是实现单位统一、量值准确可靠的活动。通过计量获得的测量结果是人们认识自然、利用自然和改造自然的重要信息工具。实际上,计量已渗透到各行各业,成为支持经济社会有序运行和可持续发展的必要条件,也是推动科技创新、提高综合国力、实现国民经济又好又快发展的重要手段。

21世纪头20年是我国经济社会发展的重要战略机遇期。对计量工作而言,既有难得的发展机遇,也面临着巨大的挑战和考验。科学技术的迅猛发展,对作为技术创新基础的检测技术和计量保证能力产生了巨大的需求;经济结构的战略性调整和技术创新能力的明显增强,对现有的计量基标准和量值传递、量值溯源体系提出了一系列新的要求。目前,计量检测工作的内容和运作方式发生了较大的变化,计量仪器、测量手段、检测技术有了很大进步,出现了很多新型的、多参数的、多功能的测量设备和仪器;国家计量检定规程和国家计量技术规范有许多进行了修订;计量检测人员新老交替,国家对从事计量检定、校准、检验、测试等计量技术工作的专业技术人员已实行注册计量师制度。

为了加强计量专业技术人员的培训,提高计量专业技术人员素质,推动注册计量师制度的实施,我们组织有关专家编写了《计量检测人员培训教材》。这套教材涵盖了长度、热工、力学、电磁、电子学、时间频率、光学、电离辐射、声学、化学等十大计量,并介绍了计量管理和计量技术基础知识,内容丰富,知识新颖。我相信,《计量检测人员培训教材》的编撰和出版,对提高计量专业技术人员的素质,推动注册计量师制度的实施,必将起到积极的作用。

国家质量监督检验检疫总局副局长

2007年4月

计量检测人员培训教材

- | | |
|---------|----------|
| 第 1 分册 | 《计量管理基础》 |
| 第 2 分册 | 《计量技术基础》 |
| 第 3 分册 | 《长度计量》 |
| 第 4 分册 | 《温度计量》 |
| 第 5 分册 | 《力学计量》 |
| 第 6 分册 | 《电磁计量》 |
| 第 7 分册 | 《无线电计量》 |
| 第 8 分册 | 《光学计量》 |
| 第 9 分册 | 《电离辐射计量》 |
| 第 10 分册 | 《声学计量》 |
| 第 11 分册 | 《时间频率计量》 |
| 第 12 分册 | 《化学计量》 |

《计量检测人员培训教材》编审委员会

主 任：宣 湘

副 主 任：童光球 刘新民 宋 伟 马纯良

委 员：（按姓氏笔画排序）

马凤鸣	马肃林	于 靖	王建平	王顺安
邓媛芳	刘国普	艾明泽	邵 力	陈 红
陆志方	陆祖良	张益群	周伦彬	钟新明
郭洪涛	黄 涛	程新选	蔡新泉	薛润秋

第4分册《温度计量》编委会

主 任：季晓烨

副 主 任：范 锐 吴建英

委 员：（按姓氏笔画排序）

朱家良 宋年兰 陈福成 侯小毛

前 言

温度计量在工农业生产、科学研究、环境保护、节约能源以及人们的日常生活中均起着举足轻重的作用。随着计量科学技术的发展,其内容也在发生着很大的变化,测量手段在不断改进,计量器具的技术性能在不断提高,相应的检定规程、标准也在与时俱进地修订完善。因此,对于广大计量检定人员的要求也在不断提高。

本书对温度计量基础知识以及辐射测温仪、热电偶、膨胀式温度计、电阻温度计、温度二次仪表等的基本原理、分类、使用方法、检定、数据处理、合格评判和典型计量器具的不确定度分析等进行了系统、完整的介绍,归纳了50多种温度计量器具的检定内容。适合从事温度计量检定人员在日常工作和培训时使用,同时也可以作为温度计量人员的自学用书。

第一章温度计量基础知识,主要介绍了温度计量基础知识如温标、温度传递系统的有关内容;第二章辐射测温,主要介绍了辐射测温的原理、定律、相关概念,对典型计量器具——温度灯、光学高温计、辐射温度计等的结构原理、使用和检定的内容进行了详细阐述;第三章热电偶,从介绍热电偶的测温原理、基本定律、主要分类、结构型式及常用分度方法出发,对常用的标准热电偶、工作用热电偶以及特殊场合下使用的热电偶的检定方式进行了介绍和归纳;第四章膨胀式温度计,对各种膨胀式温度计的结构原理、检定方式进行了详细介绍;第五章电阻温度计,从基本原理入手,对各种电阻温度计的结构、材料、测量装备、检定方法等进行了全面描述;第六章温度二次仪表,总体介绍了温度二次仪表的特点、分类、构成、模式、电路等基本情况,并对动圈式仪表、工业过程测量记录仪、数字式以及模拟式指示调节仪、温度变送器的原理、检定作了系统介绍。每节中都加入了典型计量器具测量不确定度分析的内容。

各章独立编写,叙述以现行规程、标准和科学文献为主要依据,同时融入编写者多年实际工作的经验和对计量检测人员进行培训的经验,内容简明、实用,对从事温度计量工作有较强的指导作用。

本分册由五位多年从事计量工作、有丰富实践经验的技术人员、专家编写，经三位专家认真审核。第一章和第五章由宋年兰编写，朱家良审核；第二章由陈福成编写，季晓烨审核；第三章由吴建英编写，季晓烨、范铠审核；第四章由侯小毛编写，范铠审核；第六章由朱家良编写，范铠审核。在编写过程中得到上海市计量测试技术研究院等有关单位和中国计量出版社的大力支持，在此谨表谢意。

由于作者水平和编写时间所限，本书的不足和差错在所难免，请广大读者、专家提出宝贵意见。

编者

2007年5月

目 录

第一章 基础知识	(1)
第一节 温度	(1)
一、概念	(1)
二、单位	(2)
第二节 温标	(2)
一、经验温标	(2)
二、热力学温标	(3)
三、国际温标	(4)
第三节 热交换方式	(11)
第四节 温度量值传递系统	(11)
一、0.65~273.16K 范围温度计量器具检定系统	(11)
二、0~961.78℃ (273.15~1 234.93K) 范围温度计量器具检定系统	(13)
三、961.78~2 200℃ (1 234.93~2 473K) 范围温度计量器具检定系统	(14)
四、温度计量器具热电偶部分检定系统	(15)
第二章 辐射测温	(16)
第一节 概述	(16)
一、热辐射	(16)
二、辐射度量	(17)
第二节 辐射基本定律及特性	(19)
一、基尔霍夫定律	(19)
二、朗伯特余弦定律	(21)
三、普朗克定律	(22)
四、斯忒藩-玻尔兹曼定律	(24)
五、维恩位移定律	(24)
第三节 辐射测温与表观温度	(25)
一、辐射测温方法	(25)
二、辐射测温的主要特点	(25)
三、辐射测温的主要缺点	(25)
四、表观(视在)温度	(25)
第四节 有效波长	(28)
一、有效波长的意义	(28)

二、有效波长(平均有效波长)	(29)
三、极限有效波长	(29)
四、有效波长的应用	(30)
第五节 热辐射源	(30)
一、黑体辐射源	(30)
二、温度灯	(34)
第六节 辐射温度计分类、构成和技术性能	(40)
一、分类	(40)
二、构成	(41)
三、主要技术参数和性能	(43)
第七节 光学高温计	(44)
一、标准光学高温计	(44)
二、工作用隐丝式光学高温计	(45)
第八节 光电温度计	(46)
一、在线式光电高温计	(46)
二、便携式高温计	(47)
三、精密直流光电高温计	(48)
第九节 辐射感温器	(49)
第十节 比色温度计	(50)
第十一节 标准光学高温计的检定	(51)
一、技术要求	(51)
二、检定核查用设备	(52)
三、检定核查方法	(53)
第十二节 标准温度灯的检定	(56)
一、技术要求	(56)
二、检定核查用设备	(58)
三、检定核查方法	(59)
第十三节 工作用光学高温计的检定	(62)
一、技术要求	(62)
二、检定核查条件和使用设备	(63)
三、检定核查方法	(64)
四、测温上限超过温度灯上限的检定核查方法	(66)
五、数据处理	(66)
第十四节 辐射测温量值传递误差分析和不确定度评定	(68)
一、误差来源	(68)
二、各级传递中不确定度评定	(74)
第十五节 工作用辐射温度计的检定	(81)
一、计量性能要求	(81)

二、通用技术要求	(81)
三、计量器具控制	(81)
四、分度结果的不确定度评定	(86)
第三章 热电偶	(90)
第一节 工作原理	(90)
一、热电效应	(90)
二、基本定律及应用	(94)
第二节 热电偶的材料、类型、特性和使用	(97)
一、材料	(97)
二、分类	(98)
三、最常见的两种热电偶形式	(98)
四、常用热电偶的特性	(101)
五、使用	(103)
第三节 热电偶的检定	(107)
一、清洗、退火	(108)
二、测量端的焊接	(110)
三、分度	(110)
四、检定系统	(115)
五、典型热电偶的测量不确定度评定	(117)
第四节 300~1 500℃温区标准热电偶的检定方法	(129)
一、检定项目和要求	(129)
二、检定仪器、设备和条件	(130)
三、检定	(131)
第五节 工作用热电偶的检定	(133)
一、常用工作用贵金属热电偶	(133)
二、工作用廉金属热电偶	(135)
三、金-铂热电偶	(137)
四、表面温度计	(141)
第六节 高温热电偶	(143)
一、检定项目和要求	(143)
二、检定仪器、设备和条件	(144)
三、检定方法	(145)
四、检定结果的处理和周期	(146)
第七节 低温热电偶的检定	(148)
一、铜-铜镍热电偶	(148)
二、镍铬-金铁热电偶	(152)

第四章 膨胀式温度计	(158)
第一节 标准及高精密玻璃水银温度计	(158)
一、常用术语	(158)
二、工作原理	(159)
三、分类	(161)
四、结构	(162)
五、检定	(163)
六、检定一、二等标准水银温度计和高精密玻璃水银温度计的误差来源	(175)
七、二等标准水银温度计分度修正值不确定度评定	(177)
八、检定设备	(184)
第二节 工作用膨胀式温度计	(189)
一、工作用液体膨胀式温度计	(189)
二、固体膨胀式温度计	(206)
三、压力式温度计	(212)
四、工作用膨胀式温度计的溯源	(218)
第三节 贝克曼温度计	(218)
一、常用术语	(218)
二、测温原理	(218)
三、分类	(218)
四、结构	(218)
五、检定	(219)
六、测量不确定度评定	(225)
七、检定注意事项	(228)
第五章 电阻温度计	(229)
第一节 概述	(229)
一、电阻测温的物理基础	(229)
二、测温原理	(231)
三、种类及适用的温度范围	(231)
第二节 热电阻的材料及类型	(238)
一、制造热电阻的材料要求	(238)
二、常用的热电阻丝材料	(239)
三、常用的热电阻骨架材料	(240)
第三节 标准铂电阻温度计	(241)
一、电阻-温度关系	(241)
二、使用中应注意的问题	(244)

第四节 标准电阻温度计的检定设备	(247)
一、定义固定点装置	(247)
二、用比较法进行检定的设备	(253)
三、电测量仪器	(255)
第五节 标准电阻温度计的检定	(259)
一、标准铂电阻温度计	(259)
二、标准铑铁电阻温度计	(274)
第六节 标准电阻温度计检定的不确定度分析	(276)
一、概述	(276)
二、数学模型	(277)
三、输入量的标准不确定度的评定	(277)
四、合成标准不确定度的评定	(281)
五、扩展不确定度评定	(283)
六、在 $0\sim 419.527^{\circ}\text{C}$ 范围内的扩展不确定度	(283)
第七节 工作用电阻温度计的检定	(284)
一、工业铂、铜热电阻	(284)
二、负温度系数低温电阻温度计校准	(289)
三、数字式量热温度计	(294)
四、数字式石英晶体测温仪	(299)
五、温度巡回检测仪	(303)
六、表面铂热电阻	(307)
七、半导体点温计	(311)
八、热敏电阻粮温计	(314)
九、温度指示控制仪	(319)
第八节 工业铂热电阻检定的不确定度分析	(323)
一、概述	(323)
二、数学模型	(324)
三、输入量的标准不确定度的评定	(324)
四、合成标准不确定度的评定	(331)
五、扩展不确定度的评定	(334)
六、测量不确定度的报告与表示	(335)
 第六章 温度二次仪表	 (337)
第一节 概述	(337)
一、作用和特点	(337)
二、分类	(337)
三、构成	(338)

四、控制模式	(338)
五、电路知识	(340)
六、配用的传感器	(348)
七、量值溯源	(348)
八、相关术语	(349)
九、检定总则	(350)
第二节 动圈式温度指示调节仪	(351)
一、测量机构	(352)
二、测量线路	(354)
三、电子调节电路	(357)
四、检定	(360)
五、测量不确定度评定	(367)
第三节 工业过程测量记录仪(自动平衡式显示仪表)	(368)
一、记录仪的用途	(369)
二、记录仪的分类	(369)
三、记录仪的工作原理	(370)
四、自动平衡式记录仪的分类和型号	(371)
五、自动电位差计	(372)
六、自动平衡电桥	(376)
七、工业过程测量记录仪(自动平衡式显示仪表)的检定	(378)
八、工业过程测量记录仪的测量不确定度评定	(383)
第四节 数字式温度指示调节仪	(385)
一、工作原理	(385)
二、检定	(388)
三、测量不确定度评定	(402)
第五节 模拟式温度指示调节仪	(405)
一、工作原理	(405)
二、检定	(405)
三、测量不确定度评定	(410)
第六节 温度变送器	(412)
一、工作原理	(413)
二、检定	(415)
三、测量不确定度评定	(421)
参考文献	(425)

第一章

基础知识

第一节 温 度

一、概念

提到温度，就会给人以冷热的感觉，例如，觉得冰很冷，而开水很热。因此，自然会得到这样的结论：温度是物体冷热程度的表示。这种通过人的感觉来确定温度高低的做法只能起到“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。仅凭感觉是靠不住的，有时甚至会得出错误的结论。例如，冬天乘车时用手接触铝扶手会觉得很冷，如果用手接触木扶手就觉得不很冷。

两个冷热程度不同的物体，如果将它们互相接触，那么两者之间就会有热交换，较热的物体逐渐变冷，而较冷的物体就会变热，直到两物体处于同一冷热状态，称作热平衡状态。如果两个物体分别与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必然处于同样的热平衡状态，这就是热力学第零定理，即热平衡定律。由热平衡定律可知，处于同一热平衡状态的物体一定具有某个共同的物理性质，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一定具有相同的温度。根据这个定律可以制作温度计，用来测量物体的温度。

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，即温度与物体内分子的平均动能成正比。由此可见，温度是

物体内分子运动程度的反映，是一个描述物质状态——热力学性能的量，是一个宏观的物理量。

二、单位

温度是一个重要的物理量，是七个国际基本单位之一。这个物理量与其他六个物理量的不同之处在于它是一个不能相加的量，即它是一个强度量，不是一个广延量。例如，物体甲温度为 30°C ，物体乙温度为 20°C ，而两物体混合在一起的温度不等于 50°C 。两个温度之间只有相等或不等的关系。其他的一般测量可有单位，测量的结果是该单位的倍数或分数。但长期以来对温度而言，我们所做的却不是测量，而只是做标志，即确定温标上的位置。这种状况在 1967 年使用温度单位——开尔文以后才有了变化，从此，温度单位定义的现代化完成了。

1967 年第十三届国际计量大会(CGPM)确定，把热力学温度单位确定为开尔文(符号为 K)，并定义为水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。这样，就完全适合 1960 年制定的国际单位制(SI)的表达式。从此，热力学温度的大小同国际单位制中的其他物理量一样，可以用(数值) $\times$ (单位)的形式表示。用单位“开”来定义温标，不需要用“热力学温标”这一术语。测定热力学温度，已不再是确定温标上的位置，而是单位“开”的多少倍。

按热力学原理所确定的温度称为热力学温度。热力学温度是惟一既能统一，又能描述热力学性质和现象的温度。

由于在以前的温标中，使用与 273.15K (冰点)的差值来表示温度，因此，现在仍保留这一方法。用这种方法来表示的热力学温度称为摄氏温度，符号为 t ，定义为

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15 \quad (1-1)$$

摄氏温度的单位为摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ ，根据定义，它的大小等于开尔文，温差可以用开尔文或摄氏度来表示。

1990 年国际温标(ITS-90)同时定义国际开尔文温度(符号为 T_{90})和国际摄氏度(符号为 t_{90})。 T_{90} 和 t_{90} 之间的关系与 T 和 t 的一样，即

$$t_{90}/^{\circ}\text{C} = T_{90}/\text{K} - 273.15^{\circ}\text{C} \quad (1-2)$$

物理量 T_{90} 的单位为开尔文，符号 K，而 t_{90} 的单位为摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ ，与热力学温度 T 和摄氏温度 t 一样。

第二节 温 标

用数值表示温度的方法简称为温标。

建立一种温标必须具备三个条件：固定点、内插仪器和参考函数。

一、经验温标

经验温标是任意选定一种计量温度的物质，然后规定温度值与温度计量参数的函数关系。历史上曾经出现过许多这样的温标，如华氏温标、列氏温标、兰金温标和摄氏温标

等。其中，应用较广的是华氏温标和摄氏温标。

1. 华氏温标

1714年，Daniel Fahrenheit 第一个制造了性能可靠的水银温度计，并于1724年公布了他的温标。该温标规定在一个标准大气压下，冰的融点为 32°F ，水的沸点为 212°F ，中间划分为180等分，每一等分为1华氏度。

2. 摄氏温标

1742年，摄氏(Anders Celsius)建立了百度温标。他以冰点为100度，沸点为0度。他的同学斯托墨(Strömer)将两个固定点的温度值对换，以符合人们的习惯。这种温标在0度至100度之间划分为100等分，每一等分为1摄氏度。

摄氏度和华氏度之间的关系为

$$n/^{\circ}\text{C} = (1.8n + 32)/^{\circ}\text{F}$$

式中， $n=0^{\circ}\text{C}$ 时，华氏为 32°F ； $n=100^{\circ}\text{C}$ 时，华氏为 212°F 。

以上的这两个温标均为已废除的历史经验温标。

二、热力学温标

热力学温标是建立在热力学第二定律基础上的与任何特定物质的性质无关的基本温标。热力学第二定律的开尔文表述是：“不可能设计出这样一种热机，在循环工作时，从单一热源吸取热量，使之完全变为相等的机械功而不产生其他影响。”

可以证明：一个可逆热机工作于两个温度 θ_1 与 θ_2 之间作卡诺循环，在高温 θ_1 处吸收热量 Q_1 向低温 θ_2 处放出热量 Q_2 ， Q_1 与 Q_2 之比正比于每个温度的同样的函数之比，即

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\Phi(\theta_1)}{\Phi(\theta_2)} \quad (1-3)$$

式中： $\Phi(\theta_1)$ —— θ_1 的函数；

$\Phi(\theta_2)$ —— θ_2 的函数。

开尔文于1848年提出，此关系式可以用来定义任何两个温度之比。因此，式(1-3)可变为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-4)$$

按理想热机卡诺循环热效率，仅有某一温度定点导出热力学温标。即热机效率为

$$\eta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} = 1 - \frac{\theta_2}{\theta_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

则

$$T_2 = \frac{\theta_2}{\theta_1} \cdot T_1 \quad (1-5)$$

让热机在温度为 T_2 的冷源和 T_1 的热源之间工作，如图1-1所示。 T_1 为已知温度定点，则 T_2 便可由 θ_2 和 θ_1 的量度确定，它们与工作物质的特定性质无关。因此，这样建立的温标与工作物质的性质无关。

开尔文的倡议具有划时代意义，为建立温标奠定了科学基础。所以，现在的热力学温度单位取名为开尔文。