

温度计量测试丛书

电阻温度计

DIANZU WENDUJI

全国温度计量技术委员会 组编
史去非 余颖 王颖 彭铁军 编著
张加力 主审



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

温度计量测

电 阻 温 度 计

全国温度计量技术委员会	组编
史去非 余 颖 王 颖 彭铁军	编著
张加力	主审

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电阻温度计/全国温度计量技术委员会组编;史去非,余颖,王颖,彭铁军编著. —北京:中国计量出版社,2009. 11

(温度计量测试丛书)

ISBN 978 - 7 - 5026 - 3202 - 1

I. ①电… II. ①全…②史…③余…④王…⑤彭… III. ①电阻温度计 IV. ①TH811

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 195518 号

内 容 提 要

本书系《温度计量测试丛书》的一个分册。全书共分五章,简要地介绍了温度与温标的基础知识,以及固定点及固定点复现;系统、详细地介绍了各种热电阻温度计的工作原理、结构特点、用途、计量检定校准和不确定度评定等内容。

本书可供从事温度计量测试的人员使用,也可供相关技术人员参考。

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

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

北京市媛明印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

850 mm×1168 mm 32 开本 印张 9 字数 223 千字

2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 25.00 元

《温度计量测试丛书》编委会

主 任：段宇宁

副主任：沈正宇 陈伟昕

委 员：（按姓氏笔画排序）

朱家良 张继培 林 鹏 原遵东

谌立新 廖 理 魏寿芳

序

20 世纪 80 年代，中国计量出版社曾出版了一套《温度计量测试丛书》，其内容紧贴温度计量工作实际且实用性强，受到了广大读者的好评。随着新技术的发展，一些新的内容应该充实进去。本着这一想法，在原丛书的基础上，由全国温度计量技术委员会组织当代温度计量领域的专家，重新编写并出版了本套《温度计量测试丛书》。

进入 21 世纪后，随着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。在计量测试科学领域中，温度的计量与测试是一个很重要的方面。温度是一个基本物理量，也是一个描述物质热学性能的状态参量，它与人们的生产、生活密切相关；温度的计量测试技术涉及国民经济的各个领域，如工农业生产、国防、科研、医疗、卫生、环保、气象及航空等。广泛普及温度及温度测量仪表的基本知识，介绍国内外测温新技术，培养技术人才，促进各项工作是组编本丛书的宗旨。

应该看到，在基层计量部门和企业中，受过系统的计量测试训练的技术人员严重不足，很多职工渴望增长相关领域的专业知识和提高操作技能；尤其是近年来，大批年轻的技术人员参加工作，这是发展计量测试技术的一支新生力量，但是他们深感知识不足，迫切需要系统地学习很多相关的计量基础知识，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，提高工作效率。这套丛书主要是针对这些年轻技术人员编写的，当然也可作为温度计量短训班的教材及有关院校师生、工程技术人员和科研工作者的参考书。

本丛书计划分成7个分册，每一分册独立地、深入浅出地对有关专题加以阐述，将陆续出版与读者见面。本丛书在编写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。

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》编委会

2008年9月

前 言

热电阻温度计是 $-273\sim 961.78^{\circ}\text{C}$ 温区最常用的一种温度传感器，具有测温准确度高，稳定性好等特点。热电阻测温是基于导体的电阻值随温度的变化而有规律变化这一特性来进行温度测量的。目前，热电阻温度计主要分为铂、铜、镍、钨等纯金属温度计，铑铁、铂钴等合金温度计以及碳、锗等半导体温度计几大类。

热电阻温度计按用途主要分为标准电阻温度计和工业热电阻温度计。其中，标准铂电阻温度计作为复现现行国际温标 ITS—90 平衡氢三相点 (13.8033K) $\sim$ 银凝固点 (961.78°C) 的内插仪器，在整个温度量传体系中发挥着举足轻重的作用，其复现准确度能够达到 0.2mK ，不光用来测量固定点，在我国温度量传系统中，还以一等和二等标准铂电阻温度计来检定水银温度计和其他类型的工业温度计。与此同时，工业生产中的温度测量也在广泛使用着各种类型的工业热电阻温度计。工业热电阻，具有准确度高、输出信号大、灵敏度高、测温范围广、稳定性好及不需要参考端温度修正等实用特性。但同时，其元件结构复杂，几何尺寸较大，热响应时间长的特点又在一定程度上限制了工业热电阻的应用。

本书简要地介绍了温度与温标的基础知识，以及固定点及固定点复现；并对各种热电阻温度计的工作原理、结构特点、用途、计量检定校准以及不确定度评定等方面进行了系统、详细的介绍，希望能够对热电阻温度计的计量检定校准有所帮助，同时为热电阻温度计的正确使用提供有力的技术支持。

本书共分五章，第一章至第三章由余颖编写，第四章由王颖

编写，第五章由彭铁军编写，全书由史去非统编，并由北京市计量检测科学研究院副院长张加力主审。

由于编写时间仓促，加之编者水平有限，书中缺点错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者
2009 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)
第二节 温标	(4)
第三节 温标的历史与发展	(5)
第四节 '90国际温标 (ITS—90)	(13)
第五节 温度量传体系	(22)
第二章 固定点及固定点复现	(30)
第一节 物质的相和固定点	(30)
第二节 三相点	(31)
第三节 蒸气压点和气体温度点	(52)
第四节 凝固点 (熔点)	(54)
第五节 实际物质的熔点和凝固点	(63)
第六节 特殊固定点	(71)
第七节 用于标准铂电阻温度计固定点装置的 校准	(75)
第八节 固定点测量不确定度评定	(87)
——以基准铝凝固点不确定度评定为例	
第三章 标准电阻温度计	(91)
第一节 电阻测温原理	(91)
第二节 标准铂电阻温度计	(93)
第三节 标准铂电阻温度计的检定	(118)

第四节	标准铂电阻温度计的检定设备	(154)
第五节	标准铂电阻温度计不确定度评定实例	(162)
第六节	标准铑铁温度计	(167)
第七节	低温锗电阻温度计	(176)
第四章	工业热电阻	(192)
第一节	工业热电阻及其特性、结构	(192)
第二节	工业热电阻的分类与性能	(199)
第三节	工业热电阻的选择	(210)
第四节	几种常用工业热电阻的检定	(211)
第五节	工业铂、铜热电阻测量结果的不确定度 评估	(220)
第六节	影响工业热电阻测温准确度的因素及使用 的注意事项	(230)
第七节	工业热电阻的测量电路	(236)
第五章	热敏电阻及其他热电阻	(242)
第一节	热敏电阻	(242)
第二节	其他半导体电阻温度元件	(267)
第三节	半导体电阻温度计	(269)
参考文献		(275)

第一章 温度与温标

第一节 温度的基本概念

温度与我们的社会生产、生活密切相关，是一个非常重要、而又相当特殊的物理量。它是七个基本物理量之一，许多物理现象均与之密切相关，因而，在科学研究、工农业生产和人们日常生活中都离不开温度的准确测量。温度是一个内涵量，不是一个广延量。物体的冷热程度称为温度，温度的高低可以凭人的感官感觉，但由于人的感觉受多种因素的影响，这种感觉是非常不准确的。

一、温度的概念

（一）热力学基础

热力学是用热力学温度的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。

1. 热力学第零定律

也叫做热平衡定律，如果两个热力系中的每一个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。根据此定律，制造温度计是可能的。

2. 热力学第一定律

在任何发生能量转换的热力过程中，转换前后能量的总量维持恒定。根据此定律，能量是守恒的。

3. 热力学第二定律

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。

克劳修斯解释（1850年）：不可能把热从低温物体传至高温物体而不引起其他变化。

开尔文解释（1851年）：不可能从单一热源取热使之完全变为有用功而不产生其他影响。

由此定律和卡诺定理导出热力学温度。

4. 热力学第三定律

在零开时，任何物体的熵都成为零。也就是说不能用有限手段使系统的温度达到绝对零度，我们永远不能实现（到达）那个最低温度。

5. 卡诺定理一

不可能制造出在两个温度不同的热源间工作的热机，而使其效率超过在同样热源间工作的可逆热机。

6. 卡诺定理二

所有两个工作于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。简言之，在两个热源间工作的一切可逆热机具有相同的效率。

（二）温度的宏观概念

物质能够存在于稳定的、不随时间变化的宏观状态之中，此状态称为平衡态。

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 p ——一定条件下气体的压强；

V ——一定条件下气体的体积；

T ——一定条件下气体的热力学温度；

R ——常数。

式 (1-1) 说明一定量气体的热力学温度 T 表征了自身内能的大小。可以概括地说：温度是决定一系统是否与其他系统处于热力学平衡的宏观性质，它的特征在于一切互为热平衡的热力学温度都具有相同的温度。温度是系统间是否处于平衡的标志。

(三) 温度的微观概念

麦克斯韦和玻耳兹曼分别于 1859 年和 1869 年，从理论上确定了热平衡系统中的分子速度和能量分布的统计规律，并最后导出分子的平均动能为

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

式中 ϵ ——分子的平均动能；

k ——玻耳兹曼常数。

上式表明，气体分子的平均动能与热力学温度成正比，它从微观上阐明了温度的实质。温度标志着物体内部分子无规则运动的剧烈程度，温度越高就表示平均说来物体内部分子热运动越激烈。它表明温度是大量分子热运动的集体体现，是具有统计概念的。对于单个分子，一般不谈其温度。温度是用来表征系统热平衡状态的物理量。

二、温度单位

热力学温度（符号为 T ）单位为开尔文（符号为 K ），定义为水三相点的热力学温度的 $1/273.16$ 。

由于在以前的温标定义中，使用了与 $273.15K$ （冰点）的差值来表示温度，因此，现在仍保留这种方法。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

$$t/^{\circ}C = T/K - 273.15 \quad (1-3)$$

摄氏温度的单位为摄氏度（符号为 $^{\circ}C$ ），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}) 和国际摄氏温度 t_{90} 。 T_{90} 和 t_{90} 之间的关系与 T 和 t 一样, 即

$$t_{90}/^{\circ}\text{C} = T_{90}/\text{K} - 273.15 \quad (1-4)$$

三、热力学温度

由热力学第二定律和卡诺定理推论: 可以定义一个与测温物质性质无关的温度标尺, 即为热力学温度, 热力学温度是国际上公认的最基本的温度, 一切温度测量 (包括国际实用温标) 最终都以它为准。

唯有能够统一而又明确地描述热力学性质和现象的温度是“热力学温度”。1848 年开尔文 (Kelvin) 首先提出将温度数值与可逆理想热机的效率相联系, 根据热力学第二定律来定义温度的数值, 这样, 就与任何特定物质的性质无关。现在人们通常把用这种方法定义的温度称为“热力学温度”。

第二节 温 标

温度的数值表示法称作温标。

一、建立温标的三要素

建立温标应包括三项主要内容:

- (1) 确定一系列定义固定点 (相平衡态), 并赋予最佳的热力学温度值;
- (2) 指定内插仪器;
- (3) 确定不同范围内不同的内插公式。

二、温标的定义准则

复现性和准确性。

第三节 温标的历史与发展

一、经验温标

经验温标是指选择一种测温物质，通过选择好的固定点，规定温度数值同测温参量间的函数关系，并由此构成温标。历史上出现过很多这样的温标，如华氏温标、列氏温标、兰氏温标和摄氏温标。其中，在当时应用较广的有华氏温标和摄氏温标。

华氏温标：1714 年，Daniel Fahrenheit 制造了性能可靠的水银温度计，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 ，中间采用线性内插公式。

摄氏温标：1742 年，Anders Celsius 创建了摄氏温标，以水银为测温物质，冰点定义为 0°C ，水沸点定义为 100°C ，中间采用线性内插公式。

华氏温标和摄氏温标可以互相换算：

$$t_{\text{F}} = \frac{9}{5} t_{\text{C}} + 32 \quad (^{\circ}\text{F}) \quad (1-5)$$

$$t_{\text{C}} = \frac{5}{9} t_{\text{F}} - 32 \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (1-6)$$

华氏温标和摄氏温标在测温学的发展中起过重要作用，但都存在明显缺陷：

(1) 局限性：即温标的范围过窄。因为早期温标的建立都是同某一温度计相联系的，由于制作温度计的材料和工作物质的限制，使这些温标所能应用的范围非常有限。如在高温段，玻璃温度计的玻璃会软化。

(2) 随意性：虽然它们都选冰融点和水沸点作为固定点，但是所定义的温度值却不一样。

(3) 温标赋予的温度值与测温物质以及选用的固定点相关。上述温标中，温度间隔都是等分的。这就只能假设温度与工作物

质的膨胀关系为线性的，而实际情况并非如此。从而造成中间温度的测量误差。

(4) 物质的膨胀规律不同，因此不同温度计所显示的示值，除了定义固定点外，中间各点的示值均有差异。

早期温标的种类很多，除上面两种外还有兰氏、列氏等，都有各自相应的特点，当然也都存在上述缺点。

二、理想气体温标

理想气体具有下列两个特性：

(1) 服从玻意耳-马略特定律，即

$$pV = f(\theta) \quad (\text{唯一的}) \quad (1-7)$$

式中， p 为压强； V 为体积； θ 为在任何温标上所测量的温度。当 θ 不变时， pV 的乘积为定值。

(2) 服从焦耳定律：当气体膨胀进入真空中时，将不作功，其温度在膨胀期间不发生变化。

从微观的观点来看，理想气体分子的大小同分子间的距离相比可以忽略不计，且分子之间没有相互作用。

气体的状态方程为

$$pV = \theta_0(1 + \alpha t) \quad (1-8)$$

若 p 和 V 不变，可得到如下两式：

$$p = p_0(1 + \alpha_p t) \quad (1-9)$$

$$V = V_0(1 + \alpha_v t) \quad (1-10)$$

其中， $\alpha_p = \alpha_v = 1/273.15$ 。

由此可构成两种测温方式，前者为定容气体测温，后者为定压气体测温。无论采取哪种测温气体和测温方式，定容法和定压法所建立的温标都趋于一个极限值，这个极限值称为理想气体温标，也即由遵守气体试验三定律确定的温标称为理想气体温标。

可导出：理想气体温标方程为

$$T = \frac{T_3}{p_3} p = \frac{p}{p_3} 273.16 \quad (1-11)$$

三、热力学温标

由于经验温标存在着严重缺陷，在当时引起了温度计量方面的混乱，影响了各国贸易的往来。随着工业和科技的发展，人们希望能够建立一种与工作物质的性质无关的温标。开尔文于 1848 年提出了热力学温标，也称开氏温标。热力学温标与测温物质无关，热力学温标确定的温度数值称为热力学温度或绝对温度，用符号 K 表示。

遵守卡诺定理的可逆热机热效率为

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1-12)$$

式中 Q_1 ——卡诺热机从高温热源吸收的热量；

Q_2 ——卡诺热机从低温热源发出的热量；

W ——卡诺热机所作的功；

T_1 ——高温热源的温度；

T_2 ——低温热源的温度。

简化后可得

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-13)$$

$$T_1 = \frac{Q_1}{Q_2} T_2 \quad (1-14)$$

上式的意义为工作于两个热源之间的卡诺热机，两热源之间交换热量之比等于两热源温度之比。故有：

$$\frac{T}{T_3} = \frac{Q}{Q_3} \quad T = \frac{Q}{Q_3} T_3 = \frac{Q}{Q_3} 273.16 \quad (1-15)$$

式 (1-15) 即为热力学温标的温标方程。

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