

温度计量测试丛书

特殊条件下的 温度测量

TESHU TIAOJIANXIA DE
WENDU CELIANG

全国温度计量技术委员会 组编
杨永军 蔡 静 编著
廖 理 主审



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

特殊条件下的温度测量/全国温度计量技术委员会组编; 杨永军, 蔡静编著. —北京: 中国计量出版社, 2008. 12

(温度计量测试丛书)

ISBN 978-7-5026-2917-5

I. 特… II. ①全…②杨… ③蔡… III. 温度测量 IV. TB942

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 168039 号

内 容 提 要

本书系《温度计量测试丛书》的一个分册, 主要介绍了特殊条件下的温度测量技术和方法。包括高温强腐蚀性介质的温度、火焰和等离子体温度、气流温度、强电磁和核辐照下的温度、运动物体的温度、大空间分布式多点温度、生物体温度和微尺度物体温度的测量。本书主要针对这些特殊条件和场合温度测量的特殊要求, 结合各种温度测量技术的最新进展, 介绍了适合于这些特殊测量要求的各种温度测量技术的原理、方法、实现、特点, 使读者可以根据实际情况选择合适的测量方法和仪器来准确可靠地进行温度测量。

本书基本涵盖了传统的和现代的各种温度测量技术, 可以为从事冶金、电力、石化、医疗以及航空航天、核工业等行业的科研和工程技术人员提供参考, 也可以作为从事温度测量技术或相关行业教学用参考书。

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 10.75 字数 267 千字

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 000 定价: 32.00 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

湛立新 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，大批年青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青技术人员编写的，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

在人类日常生活和科研生产中，温度是一个重要的参数，温度测量也是一个古老的问题。传统的温度测量方法研究已经有了一个很长的历史，这些技术的理论和应用都得到了比较完善的发展。然而，在很多实际的测量场合，却往往会有很多的问题，用常规的测量手段难以满足要求，这就需要进一步对原有的方法进行完善，或者探索新的温度测量方法，以满足实际的需求。

所谓特殊条件，是指在非常规条件下，用常规的方法不能完成，或测量准确度、测量效率和成本不能满足要求的温度测量场合。比如对高温腐蚀性介质，在用接触法进行测量时，由于介质对传感器产生的物理或化学的腐蚀作用，使传感器很快损坏，不能正常工作。又如普通电量温度传感器在电磁环境条件下，由于电磁干扰严重，使测量值偏差很大，甚至严重偏离而不能使用。而在大中型粮库的温度监控中，如果采用常规的模拟量输出的传感器，会使布线非常复杂，使用维护成本很高，而且信号在远距离传输中由于衰减或干扰，也会引入测量偏差，因此希望能引入新的测量技术。对运动或旋转物体的温度测量，如何将测量信号不失真地引出到测量仪表中，需要深入研究和分析。再如发动机尾焰或等离子温度的测量，接触式测量方法是难以完成的，而普通的辐射测量方法也难以胜任，需要探索一些非常规的手段和技术来完成。另外，随着社会进步和经济发展，也出现了很多新的测温需求，比如医学治疗中的人体温度特别是体内温度的测量，电子行业中集成芯片等微小目标温度的测量等，都是需要解决的问题。可以看到，所有上述的需求，都存在于各行各业方方面面，解决这些特殊条件下的温度测量问题，是非常有意义而又迫

切需要的。

值得庆幸的是，随着科学技术的进步和广大科研工作者的努力，越来越多的新型温度测量技术和测量方法不断出现。我们广泛搜集近二十年来关于温度测量方面的资料，经过筛选和整理，完成了本书的编写。

本书是《温度计量测试丛书》的一个分册，但还是保证了本分册的相对独立性。本书体系相对完整，基本涵盖了传统和现代的各种温度测量技术。内容侧重于介绍测温技术及方法，以测量对象的特殊要求分章，在每一章首先分析其测量的特点和要求，然后介绍适合这一场合的测量技术和方法的原理、实现和特点，使读者明白各种方法的优点和缺点，从而根据自己的需要去选择。当然，如果掌握这些测温方法以后，并不局限于在本书提到的场合下使用。因此，本书的侧重点并不是解决具体对象的温度测量，而是在于介绍各种测量技术和方法及其特点和适用的场合。

全书共分九章，第四章由秦存民编写，第六、九章由蔡静编写，其余由杨永军编写，全书由杨永军和蔡静统稿，由廖理研究员审订。

本书筛选和借鉴了很多同行的成果，在此向广大同行致谢。另外，在本书的编写中，得到了国防科技工业第一计量测试中心（航空第304研究所）的领导和同事们的支持，在此表示感谢！

在编写过程中，由于时间仓促、水平有限，错误之处在所难免，敬请广大同行和读者批评指正。

编 者
2008 年 10 月

目 录

第一章 温度测量方法概述	(1)
第一节 温度测量方法简介	(1)
第二节 热电偶测温	(9)
第三节 热电阻测温	(18)
第四节 辐射测温	(23)
第二章 高温强侵蚀性介质的温度测量	(40)
第一节 高温强侵蚀性介质温度测量的特点	(40)
第二节 热电偶法测量高温强侵蚀性介质温度	(41)
第三节 辐射法测量高温强侵蚀性介质温度	(61)
第四节 接触式光电方法测量高温强侵蚀性介质 温度	(67)
第五节 超声波方法测量高温腐蚀性介质温度	(73)
第三章 火焰温度及等离子体温度的测量	(83)
第一节 概述	(83)
第二节 基于谱线特性的温度测量技术	(86)
第三节 基于辐射亮度的温度测量技术	(104)
第四节 基于 CCD 相机成像的温度测量技术	(113)
第五节 基于多光谱辐射的温度测量技术	(118)
第六节 基于激光干涉或光谱的温度测量技术	(120)

第四章 气流温度的测量	(130)
第一节 气流条件下温度测量的特点	(130)
第二节 温度传感器的测温偏差	(132)
第三节 低速气流温度的测量	(140)
第四节 高速气流温度的测量	(150)
第五节 高温气流温度的测量	(154)
第六节 气流温度的快响应测量	(159)
第五章 强电磁和核辐照下的温度测量	(161)
第一节 强电磁条件下温度测量的特点和基础知识	(161)
第二节 强电磁条件下的温度测量	(167)
第三节 核辐照条件下温度测量的特点和影响因素	(177)
第四节 核辐照条件下的温度测量	(179)
第六章 运动物体温度测量	(190)
第一节 运动物体温度测量的特点	(190)
第二节 运动物体温度的接触式测量方法	(192)
第三节 运动物体温度的非接触式测量方法	(219)
第四节 其他运动物体测温方法	(231)
第七章 大空间分布式多点温度测量	(237)
第一节 分布式温度测量的特点	(237)
第二节 基于总线、无线传输或其他方式的多点测温技术	(238)

第三节	分布式光纤及光纤光栅测温技术	(261)
第八章	医疗生物组织温度的测量	(272)
第一节	医疗诊断中的接触式温度测量方法	(272)
第二节	医疗诊断中的非接触式温度测量方法	(280)
第三节	医学治疗过程中的体内温度测量方法	(290)
第九章	微尺度温度测量	(296)
第一节	微、纳米尺度下温度测量的特点及意义 ...	(297)
第二节	微、纳米尺度条件下温度的接触式测量 方法	(298)
第三节	微、纳米尺度条件下温度的非接触测量 方法	(309)
主要参考文献		(329)

第一章 温度测量方法概述

温度是表征物体冷热程度的物理量，是国际单位制(SI)中七个基本物理量之一，它与人类生活、工农业生产和科学研究有着密切关系。随着人类社会的不断进步和科学技术水平的不断提高，温度测量技术也得到了不断发展。

温度测量方法有很多，也有多种分类。比如从测量时传感器中有无电信号可以划分为非电测量和电测量两大类；从测量时传感器与被测对象的接触方式不同可以划分为接触式和非接触式测温等。而每种测量方法中又有很多种类，如膨胀式温度计测温、热电偶温度计测温、热电阻温度计测温、光学温度计测温 and 红外温度计测温等。近年来，随着技术水平的进步，出现了更多新的测试方法。

由于温度的测量方法多种多样，很难找到一种完全理想的分类方法，每种分类都只是侧重于某些方面。本书将温度测量方法从测量原理上进行分类，目的是为根据测温需求进行选择提供方便。

本章首先对当前温度测量的方法进行了概述，然后对常用的热电偶、热电阻和辐射测温法进行较详细的介绍，其他的测温方法将在以后章节逐一介绍。

第一节 温度测量方法简介

图 1-1 是温度测量方法的一种分类，是从测量原理上进行分类的。

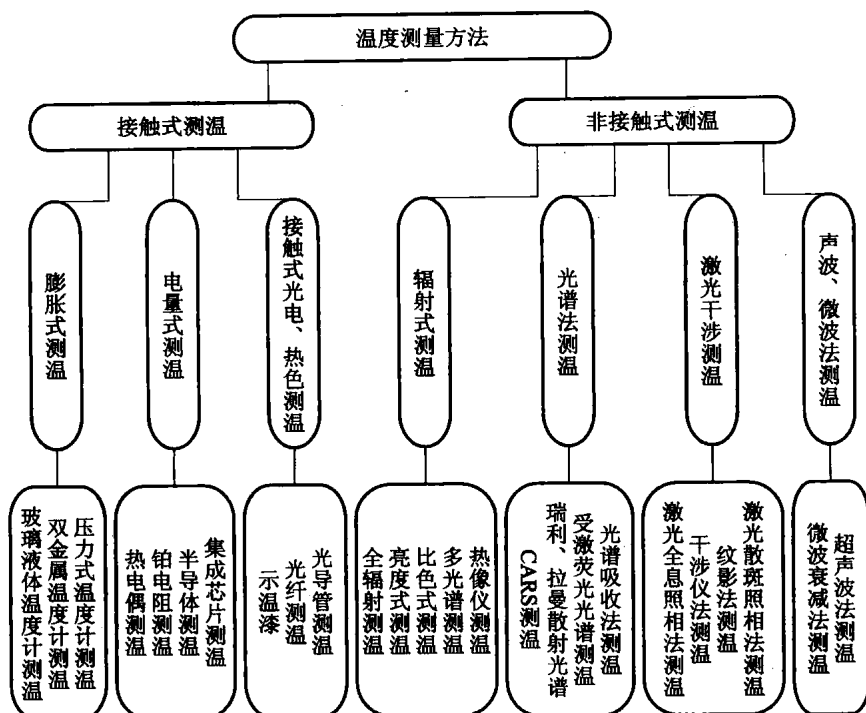


图 1-1 温度测量方法分类

一、接触式测温方法

将接触式测温方法分为膨胀式测温、电量式测温和接触式光电、热色测温三大类。接触测温法在测量时需要与被测物体或介质充分接触，测量的是被测对象和传感器的平衡温度。在测量时除了会对被测温度有一定干扰外，还要保证传感器不与被测介质有化学反应，另外大多数接触式测量方法会存在导热误差、辐射误差等影响。

1. 膨胀式测温方法

膨胀式测温是一种比较传统的温度测量方法，它主要利用物

质的热胀冷缩原理即根据物体体积或几何形变与温度的关系进行温度测量。膨胀式温度计包括玻璃液体温度计、双金属膨胀式温度计和压力式温度计等。

最常见的玻璃液体温度计，利用水银、有机液体（酒精或煤油）或汞基合金等液体的热胀冷缩原理进行温度测量。根据选用感温介质的不同，测量的温度范围一般为 $-80\sim 600^{\circ}\text{C}$ 。

双金属温度计是由两种线膨胀系数不同的金属薄片焊接在一起制成的，将其一端固定，由于两种金属膨胀系数不同，当温度变化时，就会引起弯曲变形从而指示温度。使用黄铜和镍合金制成的温度计最高温度可以达到 200°C ，而使用不同成分的镍合金钢其最高温度可以达到 500°C 。

压力式温度计也是一种膨胀式温度计，利用压力和温度的关系进行温度测量。按所用介质不同，分为液体压力式温度计和气体压力式温度计、蒸气压力式温度计，温度测量范围为 $-200\sim 650^{\circ}\text{C}$ 。

膨胀式温度计结构简单，价格低廉，可直接读数，使用方便，但准确度比较低，不易实现自动化，而且容易损坏。由于是非电量测量方式，因此可以用于防爆场合。

2. 电量式测温方法

电量式测温方法主要利用材料的电势、电阻或其他电性能与温度的单值关系进行温度测量，包括热电偶温度测量、热电阻温度测量、集成芯片温度测量等。

热电偶的原理是两种不同材料的金属焊接在一起，当参考端和测量端有温差时，就会产生热电势，该热电势是温度差的函数，通过测量热电偶产生的热电势，就可以测量温度。但因为测量的是测量端和参考端的温度差，而一般热电势-温度差的分度表基于参考端为 0°C ，因此实际测量中，如果参考端处于室温时，需要进行室温补偿。目前我国标准化的8种热电偶，测量范围为 $-200\sim 1800^{\circ}\text{C}$ ，非标准化的钨铼热电偶在还原气氛下最高

使用温度短期可以到 3000°C 。热电偶具有结构简单，响应快，适宜远距离测量和自动控制的特点，应用比较广泛。

热电阻是根据材料的电阻和温度的关系来进行测量的。按照感温元件的材质，可以分为金属与半导体两类。金属导体有铂、铜、镍、铑铁及铂钴合金等，常见的为铂电阻和铜电阻温度传感器。半导体有锗、碳和热敏电阻等。铂电阻的使用温度范围为 $-200\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，铜热电阻的使用温度范围一般为 $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。热敏电阻一般可以在 $-40\sim 350^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用。热电阻测量准确度比较高，输出信号大，稳定性好，但元件结构一般比较大，动态响应差，不适宜测量体积狭小和温度瞬变区域。

随着电子技术的发展，可以将感温元件和有关的电子线路集成在一个小芯片上，构成一个小型化、一体化及多功能化的专用集成电路芯片。AD590 集成电路温度传感器是一种典型的集成温度传感器，可以输出一个与温度成线性关系的电压，测量范围可以达到 $-55\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。近年来发展的 DS1820 智能温度传感器，采用数字化技术，采用单线接口方式，支持多点组网功能，在使用中不需要任何外围元件，测温范围为 $-55\sim 125^{\circ}\text{C}$ 。

3. 接触式光电、热色测温方法

接触式光电测温方法主要是指通过接触被测对象，将温度变化引起的热辐射或其他光信号引出，通过光电转换器件检测其变化从而测量温度的方法。接触式光电测温方法本身使用辐射或光电原理进行温度测量，但在测量中传感器要和被测对象接触。因此这种测温方法兼具有两种测量方法的优点和缺点。首先是不像电量式测量方法一样容易受到电磁的干扰，可以应用在电磁环境下进行温度测量；另外可以避免像非接触式辐射温度计那样容易受到被测对象表面发射率和中介介质的影响。缺点是也会干扰被测对象的温度，带来接触式测温方法引起的一些误差。

光导管式光电高温计适用于高温液体或气体介质的温度测量。将一支底端封闭的耐高温光导管插入到被测介质中，温度平

衡后由光导管传输出的高温辐射,通过高温计后端的光电转换器件转换为电信号,该电信号与感受的温度单调对应,从而测量出介质的温度。近年来发展的空腔黑体式光电高温计原理也是如此,但光导管要经过特殊设计做成黑体腔,使其有效发射率接近1,避免了被测介质的发射率对测温结果的影响。这种高温计测量范围一般为 $800\sim 2000^{\circ}\text{C}$,其上限温度主要受光导管材料的限制。

对接触式光纤温度传感器,从光纤起的作用可分为两类:一类是利用光纤本身具有的某种敏感功能而测量温度的,属于功能型传感器;另一类是光纤仅仅起传输光信号的作用,必须在光纤端面配合其他敏感元件才能实现测量的,属于传输型传感器。从信号检测的原理上分,可分为相干型和强度型两种:相干型光纤传感器检测受温度影响后光纤中光相位和偏振的变化,因此光路比较复杂,对光器件、光纤的要求比较高;而强度型则检测光强随温度的变化,结构相对简单,性能可靠,成本较低。基于不同的原理,有很多种光纤温度传感器,可以用在不同的测温场合,后面相关章节中会详细介绍。

热色测温方法主要通过示温敏感材料的颜色在不同温度下发生变化来指示温度。示温涂料是一些化合物或混合物,能够伴随外界温度的改变而迅速引起其固有颜色的变化,反过来可以根据其显示的当前颜色来测量温度。根据示温涂料变色后出现颜色的稳定性,可以分成可逆型示温涂料和不可逆型示温涂料;又可根据涂层随温度变化所出现的颜色的多少分为单变色示温涂料和多变色示温涂料。示温涂料根据材料的不同,可以覆盖室温到 1600°C 温度范围,测温误差大约在 $\pm(10\sim 20)^{\circ}\text{C}$ 。示温涂料可以测量运动物体或其他复杂情况表面的温度分布,使用简单方便,缺点是影响判别温度结果的因素比较多,如涂层厚度、判读方法、样板和示温颗粒大小等,目前主要还是靠人工判读。

二、非接触测温方法

与接触测温方法相比，非接触测温方法不需要与被测对象接触，因而不会干扰温度场，动态响应特性也很好，但是会受到被测对象表面状态或测量介质物性参数的影响。

非接触测温方法主要包括辐射式测温、光谱法测温、激光干涉式测温以及声波测温方法等。

1. 辐射式测温方法

辐射式测温方法都是建立在热辐射定律基础上的。当实际物体的辐射强度（包括所有波长或大部分波长）与黑体的辐射强度相等，则黑体的温度称为实际物体的辐射温度；当实际物体（非黑体）在某一波长下的单色辐射亮度同黑体在同一波长下的单色辐射亮度相等时，则该黑体的温度称为实际物体的亮度温度；当黑体与实际物体（非黑体）在某一光谱区域内的两个波长下的单色辐射亮度之比相等，则黑体的温度称为实际物体的颜色温度。基于以上三种表观温度测量方法的高温计分别称为全辐射高温计、亮度式高温计和比色式高温计。不同结构类型的辐射高温计测量范围不同，目前定型的高温计可以覆盖 $-50\sim 3200^{\circ}\text{C}$ 的温度范围。

全辐射高温计结构相对简单，但受被测对象发射率和中间介质影响比较大，测温偏差较大，不适用于测量低发射率目标。亮度温度计结构也比较简单，灵敏度比较高，受被测对象发射率和中间介质影响相对较小，测量的亮度温度与真实温度偏差较小，但也不适用于测量低发射率物体的温度，并且测量时要避开中间介质的吸收带。比色测温法测量结果最接近真实温度，并且适用于低发射率物体的温度测量，但结构比较复杂，价格较贵。

多光谱测温法是在一个仪器中制成多个光谱通道，利用多个光谱的物体辐射能量信息，经过数据处理得到物体的真实温度和材料光谱发射率。该方法测量准确度高，响应快，受中间介质影

响小，非常适合火焰温度和高温表面温度的测量。

红外热成像是根据自然界中的一切高于热力学温度的物体都向外辐射红外能量这一自然现象，利用红外探测器探测目标、背景以及目标各部分之间的红外热辐射温度的差异，并将此差异进行成像的一种被动式探测仪器。一般热像仪工作在 $3\sim 5.6\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 范围内，测量范围一般在 $-50\sim 250^\circ\text{C}$ ，高温热像仪经过加滤光片扩展后可达到 2000°C 。热像仪除具有与红外测温仪相同的特点，比如非接触、快速，可以对运动目标和微小目标测温等外，还具有如下优点：可以直观显示物体表面的温度场；温度分辨率高，能准确区分更小的温度差甚至达 0.01°C 以下；可采用假彩色显示或数字显示等多种方式显示物体各点的温度值；可储存数据和进行计算机处理等，方便用户处理。

2. 光谱式测温方法

非接触的光谱测温方法主要适用于高温火焰和气流温度的测量。它主要通过检测被测介质的激发光谱信号进行温度测量。当单色光线照射透明物体时，会发生光的散射现象。散射光包括弹性散射和非弹性散射，弹性散射中的瑞利散射和非弹性散射的拉曼散射的光强都与介质的温度有关。相比而言，拉曼散射光谱测温技术的实用性更好，其主要应用之一就是测量高温气体的温度。

由于自发拉曼散射的信号微弱和非相干性，对于许多具有光亮背景和荧光干扰的实际体系，它的应用受到一定的限制。与自发拉曼光谱相比，受激拉曼散射能大幅度提高测量的信噪比，常用的方法是相干反斯托克斯拉曼散射（CARS）。它可使收集到的有效散射光信号强度比自发拉曼散射提高好几个数量级，同时还具有方向性强、抗噪声和荧光性能好、脉冲效率高和所需脉冲输入能量小等优点，适用于含有高浓度颗粒的两相流场非清洁火焰的温度诊断。但是，CARS 法的整套测量装置价格十分昂贵，其信号的处理相当复杂，限制了其使用。