

温度计量测试丛书

表面温度测量

BIAOMIAN WENDU
CELIANG

全国温度计量技术委员会 组编
贺宗琴 编著
廖理 主审



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

温度计量测试丛书

表面温度测量

全国温度计量技术委员会 组编

贺宗琴 编著

廖理 主审

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

表面温度测量/贺宗琴编著; 全国温度计量技术委员会组编.
—北京: 中国计量出版社, 2009. 5
(温度计量测试丛书)
ISBN 978-7-5026-2998-4

I. 表… II. ①贺…②全… III. 表面温度—温度测量 IV. 0551.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 038674 号

内 容 提 要

本书系《温度计量测试丛书》的一个分册。全书分为十章, 系统地、扼要地论述了表面温度测量的原理、方法, 各种实用的表面温度计、表面温度传感器, 表面温度测量的误差分析和检定与测量的不确定度评定, 以及表面温度测量实例, 最后论述了表面温度测量的发展前景。

本书可作为温度计量测试人员的实用参考书, 也可供广大涉及表面温度计量测试的科研人员使用, 亦可供大专院校相关专业师生参考。

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>
三河市灵山红旗印刷厂
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 4.375 字数 98 千字
2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 16.00 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

自然界的物体都是以固体、液体、气体三相而存在。在现实的世界中以固体和液体状态存在的物体最多。固体和液体都有表面，因而表面温度的测试成为温度测量的大而广泛的群体。但是这一温度测量的主要对象之一却是研究最不彻底，问题最多的一个门类。尽管历来的科研和生产人员进行了大量的工作，仍有诸多的问题没有得到解决。

虽然表面温度测量有一定复杂性和不确定性，但是由于科研、生产的需要，有力地推动了这一工作的进展。国内外的测量技术人员进行了大量的工作，在许多方面已有系统、完整的认识，使得我们有可能对它进行总结。这不但是对过去工作的小结，也能为以后的技术人员提供借鉴。全国温度计量技术委员会和中国计量出版社组织编写《温度计量测试丛书》，委托作者完成《表面温度测量》这一分册。本人深知完成这一任务的不易，故将多年来从事表面温度测量研究的收获资料作了归纳整理，加入自己个人从事这一工作的心得体会完成了本书的撰写，供读者参考，希望能对大家从事表面温度测量工作有所帮助。

本书参考国内外文献，试图从一个新的角度分析测温机理，采用图解的方式，免去了复杂的数学推导，使得阐述更加明晰。介绍了测量固体表面温度的各种温度计和表面温度传感器，将最新的成果介绍给大家。测量结果的处理介绍了两种：一种是大家比较熟悉的从已知条件计算误差，它可以与实际测量结果所得误差相互比较，使对表面测温有更深一步的认识；另一种是检定不确定度分析，这一新的对测量结果的评价还处于发展阶段，希望大家能从这一方法中体会到更多的测量内涵。最后，作者根据从

事这一工作的体会及对文献资料的了解试图指出表面温度测量进一步发展的前景，这些也仅仅供参考，希望通过大家的共同努力促进表面温度测量的发展。

在这里，作者对在本书编写过程中以及表面温度测量专题讨论中给予帮助的同好好友及一起工作的同事们表示感谢。尽管作者对本书付出了努力，但是由于本人毕竟接触这一课题范围有限，本书的不当之处希望读者批评指正。

编 者
2008 年 10 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 表面温度测量的理论基础	(4)
第一节 导热定律和等温线	(4)
第二节 表面温度的测量误差机理	(7)
第三节 测量表面温度时的干扰温度场	(8)
第四节 进入温度计的热流	(12)
第三章 表面温度计和表面温度的测量方法	(17)
第一节 表面温度计的分类	(17)
第二节 便携式表面温度计	(17)
第三节 固定安装的表面温度计	(23)
第四节 热电阻式表面温度传感器	(25)
第五节 用于表面温度测量的薄膜热电偶 和薄膜热电阻	(26)
第六节 热补偿式表面热电偶	(27)
第七节 不同的表面温度计测量结果的比较	(30)
第八节 准接触法测量表面温度	(33)
第九节 外推法	(34)
第十节 固体内部的温度测量	(35)
第十一节 表面温度计的技术评定	(39)

第四章	表面温度测量的误差	(43)
第一节	第一部分误差 (温度计导热引起) 的计算	(43)
第二节	第二部分误差 (非理想接触引起) 的计算	(46)
第三节	第三部分误差 (温度计结构引起) 的计算	(47)
第四节	表面温度测量误差计算的实例	(48)
第五章	表面温度计的检定和校准	(53)
第一节	表面温度计检定的特点	(53)
第二节	表面温度计的感温元件	(54)
第三节	参考温度计的选用	(59)
第四节	表面温度计检定设备	(60)
第五节	对不同工作环境下的表面温度计 的校准	(67)
第六章	表面温度测量仪器的检定与测量的 不确定度评定	(74)
第七章	辐射法测量表面温度	(80)
第一节	概述	(80)
第二节	辐射法测量表面温度时的表面发射率	(82)
第三节	单色法测量表面温度	(83)
第四节	光纤式表面温度计	(86)
第五节	热像仪测量表面温度	(87)

第六节	红外照相法测试表面温度的分布	(89)
第七节	辐射法表面温度计的检定	(90)
第八章	表面温度测量中可能遇到的实际问题	(94)
第一节	测温对象是带电物体的表面温度测量	(94)
第二节	低温固体的表面温度测量	(98)
第三节	运动物体的表面温度测量	(99)
第四节	处在变化中的表面温度测量	(103)
第九章	表面温度测量实例	(107)
第一节	处于加热炉内工件的表面温度测量	(107)
第二节	飞机壁面的温度测量	(110)
第三节	在金属切削时工件与刀具接触处 的表面温度测量	(111)
第四节	采用微波加热治疗癌症时人体 皮肤温度的测量	(112)
第五节	薄壁对象的表面温度测量	(114)
第六节	遥感、遥测技术与表面温度测量	(115)
第十章	表面温度测量的发展	(120)
第一节	表面温度传感器和表面温度计的发展	(120)
第二节	表面温度检定技术的发展	(121)
第三节	表面温度测量的发展	(123)
参考文献	(125)

第一章 绪 论

在工农业生产、科研领域，甚至日常生活中，都存在着大量的温度测量问题。按照测量对象的状态分，有温度随时间变化的动态形式和不随时间变化的稳定态形式。对动态形式的研究非常不彻底，也可以说仅仅是开始；对稳定态形式的研究，长期以来尤其是 17、18 世纪以来，经过历代科学家的不懈努力已经取得很大的成绩。按照测温对象的材料分，有流体（包括液体和气体）温度测量、固体腔内温度测量以及表面温度测量。其中，表面温度测量是测温领域的一个庞大的对象，因为任何物体都有表面，但是对这样一个庞大的测温领域，人们至今研究得最不彻底，存在问题也最多。在本书中也仅仅是就已经有普遍认识和正在进行的工作加以叙述，希望由此能引起更多的测温工作者对表面温度测量的重视，在现代高新技术的基础上解决更多的表面温度测量难题，起到抛砖引玉的作用。

一、表面温度测量的重要性

表面温度测量是非常重要的。例如，在航空技术领域，飞机在飞行中由于周围的大气在机身表面存在滞止效应，引起气动力加热，使得蒙皮温度升高，蒙皮温度的高低直接关系到机身材料的选择使用和乘员的生活状况，因此，在试飞时都要应用表面温度传感器对蒙皮温度进行测量。在高空或寒冷的冬天在机翼上可能积起厚厚的冰层，冰层的存在改变了机翼的形状，是引起空难的一项重要原因，因此，对机翼表面温度的测量和除冰对飞行来说是非常重要的事情。歼击机在开加力燃烧时尾喷火焰温度可达 1300°C ，只有正确测量尾喷管的表面温度才能决定材料的选用。

在航天技术中，运载火箭的发射场面是非常壮观的。在发射的初级火箭推力作用下，火箭表面温度急剧升高，烧蚀的绝热板脱落，火箭进入平稳飞行状态。绝热板表面温度测量决定了绝热板材的性能。海洋在人类的生活中占有很重要的地位，而油船泄漏污染及其他原因引起的污染影响了海洋生物的生存及人类的活动，海洋表面温度的测量对发现海水污染等多种海洋状况很有意义。人类身体浅表部分的癌症可引起皮肤局部温度的升高，例如，用医用红外热象仪可通过对人体皮肤表面温度的扫描，普查是否有乳腺癌及其他浅表皮肤癌症。在一些石油化工工业中，生产人造纤维时，为了保证从喷丝头喷出高质量的纤维丝，就必须使喷丝头保持恒定的温度。技术人员常用贴敷在喷丝头上的表面温度传感器来保证喷丝头具有合适恒定的温度，以保证产品的质量。按国家劳动部门的要求，对供暖锅炉进行节能监测时要测量锅炉外壁的表面温度、进水管和出水管的管壁表面温度以及其他一些热工参数，以确定该锅炉的热效率。在铁路运输中，要经常测量机车轴瓦的表面温度，以保证机车安全运行。电力工业中的高压电路，当高压电缆的表面温度超出一定数值就要断路，以保证线路安全。以上这些仅是表面温度测量的一部分，还有大量的表面温度测量课题存在国民经济各个行业各个环节上，针对不同的测温情况要采用不同的测温方法和设备。表面温度测量是温度测量领域中最丰富多彩的一个组成部分。

二、表面温度测量的特点

表面温度测量的特点导致这一测温的复杂性及结果的不确定性。在表面测温中有三项影响因素，一是测温物体表面本身的温度。例如，飞机蒙皮表面或锅炉表面本身的温度，这一温度是很难精确地测出的，原因就在于还有另外两项因素影响它。二是环境条件以及表面对流换热因素对表面温度的影响。周围环境温度的高低，气流速度的大小和被测表面物体的工况，如材料的导

热率、面积大小、表面状况都直接间接影响表面温度的测量。更重要的是这些因素互相影响，而且数值处于不稳定状态，这些更增加了测温的不确定性。三是测温温度计对表面温度的干扰。任何测温都离不开温度测量仪器设备，即温度计，尤其在接触式测量中，温度计直接与被测对象接触，这样虽然提高了测温的准确性，但温度计所使用的材料本身也具有导热性，因而破坏了温场。当被测对象有很大的热容量，又有较高的导热率，那么影响还不是很大，但当温度计本身的导热足以破坏了被测对象的温场分布，那么就严重地歪曲了原有温场，使得表面温度脱离了原有温场，温度测量产生了极大的误差，甚至完全不符合原来的温度状况。

表面温度测量除了接触法测量外还有另外一种方法，即非接触法测温。非接触法即使用辐射法，不直接与物体表面接触，因而避免了对原温场的破坏，但是这种测温法又受被测对象的表面发射率的影响，而同时表面发射率又与众多因素有关。例如，被测物体材料，表面状况，而表面状况含有表面粗糙度，氧化情况，有无油污、水汽等，还与物体和温度计之间介质状况有关，而这些因素相互影响、变化无常也使测温准确度下降。

第二章 表面温度测量的理论基础

第一节 导热定律和等温线

如果物体内部存在有温度梯度，就会出现热量的流动，简称热流 q ，这种物理现象被称为热传导。在这种情况下，下式成立：

$$q = -\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2-1)$$

式中 λ ——导热系数。

物体中的温度变化服从于热传导方程式，对于一维状态下温度梯度为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2-2)$$

对于三维温度场热传导方程式为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \nabla^2 T \quad (2-3)$$

式中 $\chi = \frac{\lambda}{\rho c_p}$

c_p ——定压比热容；

ρ ——物体的密度；

∇^2 ——在直角坐标 (x, y, z) 下的拉普拉斯算符：

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2-4)$$

有些情况下,采用柱坐标 (r, φ, z) 时计算更加方便和明晰。在柱面坐标(图 2-1)时,直角坐标与柱面坐标的变换式为

$$\begin{aligned} x &= r \cos \varphi \\ y &= r \sin \varphi \\ z &= z \end{aligned} \quad (2-5)$$

稳定状态下,即温度不随时间而变化,这时 $\partial T / \partial t = 0$,公式(2-3)为

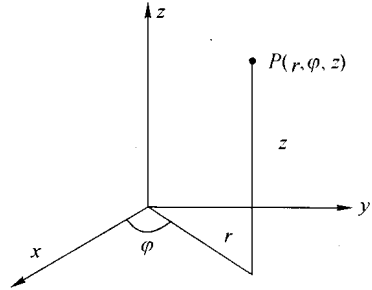


图 2-1 柱坐标

$$\nabla^2 T = 0$$

即

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2-6)$$

在数学上,这称为拉普拉斯方程。为了在所给出的情况下应用方便,进行坐标变换,变为在柱坐标下的拉普拉斯方程,即

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2-7)$$

式(2-7)是在柱坐标下的拉普拉斯方程,亦即在稳定状况下的热传导方程,是求解表面温度的基本方程式。

为了叙述的方便并使得温度的分布更加直观,引入了等温面和等温线。

假设在一个温度场中把温度相同的点用一曲面连起来,这个面称为等温面。同一个等温面上的各点温度是相同的,不同的等温面存在不同的温度。各个不同温度的等温面平行且不能相交,各个面之间存在温度差。用一横截面与等温面垂直相交,横截面与等温面相交形成的曲线为等温线。一条等温线实际代表了一个等温面,各等温线之间也存在温度差,因而有热量的流动,成为

热流，在空间存在热流面，在同一横截面上也得到热流线，热流线为热流方向的线，总是与等温线垂直相交。

测量一个固体表面的表面温度时，为了建立数学模型方便，要给它一些假定。首先假定同周围气体介质接触的固体维持在一个热稳定状态。

用接触式表面温度计测量固体的表面温度。图 2-2 中 (a) 和 (b) 分别为安装温度计前、后的等温线 θ 及热流线 q 图。图 2-2 中 (c) 和 (d) 为相应于图 (a) 和图 (b) 情况下垂直于表面方向温度的分布。图中， θ_1 为原始的、真正的表面温度值； θ' 为安装接触式温度计后的表面温度； θ'' 为接近表面、紧靠温度计的大气温度； θ_T 为温度计敏感元件感温点的温度； θ_a 为未经扰动的大气温度。

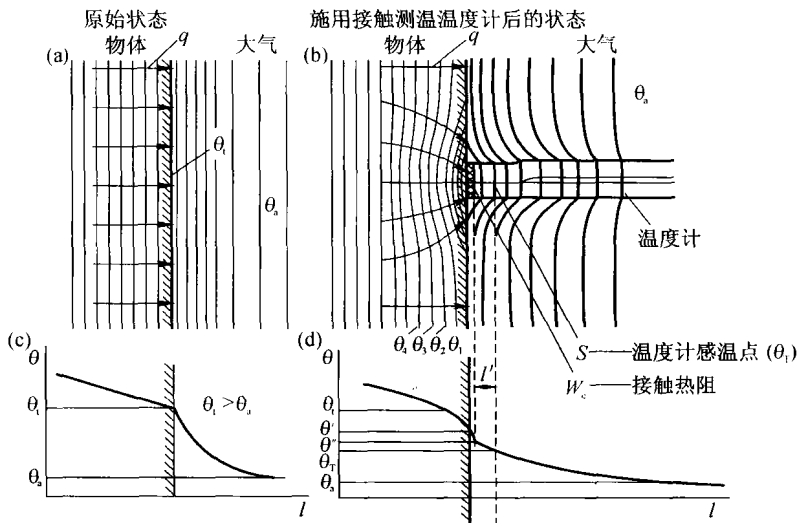


图 2-2 接触法测表面温度的等温线图