

[德] Matthias Nau 著
张立谦 李 晨 译

温度的电测

Wendu
De Diance



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

温度的电测

[德] Matthias Nau 著

张立谦 李 晨 译

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

温度的电测/ (德) 瑙 (Nau, M.); 张立谦, 李晨译. —北京:
中国计量出版社, 2006. 11
ISBN 7-5026-2531-3

I. 温… II. ① 瑙… ② 张… ③ 李… III. 温度测量—
电测法 IV. TB942

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 124647 号

内 容 提 要

本书主要介绍了温度测量的基本知识, 热电偶和热电阻的原理、结构、特性, 温度计的校准和检定, 温度测量不确定度, 最新的技术发展等, 还提供了大量的实用数据和参考资料。

本书可供从事温度计量及热量表的研发、设计、计量、检定、生产以及管理和使用的专业技术人员阅读和参考。

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](http://www.zgjl.com.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

*

850 mm×1168 mm 32 开本 印张 4.75 字数 113 千字
2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 18.00 元

序 言

温度测量是一个重要的科技领域。所有的基本物理量中，或许温度是最难于准确测定的一个。

国际单位制（SI）的七个基本物理量中，四个与人类生存有着直接密切的关系，温度是其中之一。其他三个量——质量、长度和时间都能被人类直接觉察和理解。温度却是例外——譬如相同温度的铜块和木块，当你用手去触摸时，冷热的感觉却不同。温度的特殊性还在于：其他六个基本物理量都是广延量，可以叠加和细分；只有温度是一个内涵量，或强度量——譬如两个 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的物体合在一起不可能是 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这使人们感到困惑。直到 19 世纪，人们定义了：温度是一个物理量，它在相互热接触并处于热平衡的两个系统中具有相同的值。这一定义为测温学打下了基础，但是仍不能形成确切的概念，因为温度不能简单地、依据主观判断。然而，人类生活与温度的关系又是密切相关的，测量温度在广泛的领域内常是关键的问题，这促使温度测量技术不断地随着生产和科学技术的发展而发展。时至今日，科学理论的发展使人们逐步完整认识了温度的内涵，在热力学和统计物理学的基础上，建立起温度的概念；认清了温度的真谛。面对各种各样、浩如烟海的“温度测量”问题，各个科技生产领域的研究、设计、技术人员需要指导和帮助；然而，没有清晰的物理学概念和丰富的技术实践经验，很难将各种现有的测温原理、方法、技术、可选用的器件、可以实测的范围、准确度和局限性等，一一给出透彻的阐述。这也许正是本书出版的宏观背景。

本书作者 Matthias Nau 先生是一位具有 20 多年专门从事温度测量技术研究工作的资深专家，是国际著名的德国 Jumo 公司传感器测量技术研究设计部门的领导人。该公司拥有德国国家第九实验室，是欧洲温度传感器检测的权威部门。在欧洲标准工作委员会和区域供热协会都有很高的影响力。这本内容丰富而文体精练的测温技术专著，充分体现了作者扎实的理论基础和丰富的实践经验底蕴；相信会使许多专业技术人员读后感到有趣、有益，并将此书作为测温技术指南性的工具书。

本书给出了大量的实用数据资料和参考依据，供读者在需要时查询。另一方面，对所有当前温度测量的基本概念，常用类型，重要标准，最新技术发展都有论及；还提供了最常用的参考资料。追求高效实用的读者将会感到特别满意。

本书特别注重实用还表现在，不是“教科书”式地罗列概念，不是面面俱到却又浅尝辄止；而是针对实际测温技术问题，叙述如何实施解决。它让读者首先熟悉温度的电气测量，然后了解相关的温度计的特性和误差来源，并且举例说明评定温度测量系统测量不确定度的方法及其影响因素。此外，诸如关于各种电子温度计结构介绍（包括特殊应用的结构、使用条件等），以及防爆温度计（包括装置、类型、电路连接等）相关的内容，也详加阐述，细致入微。这在同类著作中很难见到。这也使本书可能成为许多专业人员的技术手册而在案边常备。

本书一些章节相当详细地论述了关于热量表的温度传感器及测量技术。热量表可以说是 20~21 世纪社会发展产生的、与人类日常生活密切相关的、最重要的新型“家用”计量仪表。热量表适应了现代社会节能、环保的迫切需求，从 20 世纪 70 年代的欧洲开始，用来实施人类生活取暖的供热计量收费。温度测量是热量表计量的基础；测温传感器是热量表最重要的部件。本书作者和他所在的 Jumo 公司在热量表测温技术和产品方面一直处于

国际的领先地位。本书总结、介绍了他们的丰富而十分重要的技术经验。中国正在推行实施供热计量收费改革的工作。所有从事热量表的研发、设计、计量、检定、生产以及管理和使用的专业技术人员，阅读本书都会大有裨益。就此而言，本书的出版更有重要的现实意义。

笔者有幸与 Matthias. Nau 先生相识，并多次聆听讲授，交流探讨相关技术问题；今次又先睹了本书的中文译稿。谨在此表达对作者、译者和中国计量出版社有关工作人员的诚挚的谢意！

王树铎

2006 年 7 月于北京

中国科学院物理研究所

编者的话

近几十年来，温度成为制造业领域中最重要过程参数之一。使用电阻温度计和热电偶对温度进行电测实际上已经有 100 多年的历史了，但是传感器和温度计的发展并没有停止。对工艺过程不断的优化导致对温度计的要求不断的提高，需要温度计测温更快，精度更高，在更长的周期内有更好的稳定性。

非常遗憾的是没有一种温度计能够以足够的精度胜任所有可能的测量，无法凭一支精确的温度计就能保证对温度进行正确的测量。温度计所指示出的温度只是传感器测得的温度，使用者必须设法保证传感器测得的温度与被测介质的温度相同。

对于有兴趣的读者来说，本书在许多年中已经成为他们喜爱的指南。考虑到标准的变更与这个领域新的进展，对该书进行了修订与更新。特别地，本书新增加了一章“测量不确定度”，介绍了国际公认的 ISO 文件“测量不确定度指南”（简称 GUM），并且举例说明了评定温度测量系统测量不确定度的方法及其影响因素。考虑到 2003 年 7 月 1 日生效的欧洲指令 94/9/EC，防爆温度计这一章也做了扩展。

考虑到产品责任的扩大，本书中引用到的数据资料 and 材料特性仅供参考。如果需要，在每一次应用时，应核对这些数据并进行检查和修正。这种做法特别出现在考虑安全因素的情况下。

Matthias Nau

2002 年 8 月于富尔达

目 录

1 电子温度测量	(1)
1.1 接触式测温	(1)
1.2 非接触式测温	(3)
1.2.1 全辐射计	(4)
1.2.2 光谱高温计	(4)
1.2.3 波段辐射高温计	(4)
1.2.4 辐射密度高温计	(4)
1.2.5 分布高温计	(4)
1.2.6 比率高温计	(4)
2 温度的概念	(6)
2.1 温标的历史	(6)
2.2 固定温度点	(11)
2.3 ITS-90 的温标	(12)
3 热电偶	(15)
3.1 热电效应	(15)
3.2 热电偶	(20)
3.3 热电势的极性	(21)
3.4 断路和短路	(22)
3.5 标准热电偶	(23)
3.5.1 电压表	(26)
3.5.2 误差限	(27)
3.5.3 线性	(29)
3.5.4 长期表现	(29)

3.6	选择标准	(32)
3.6.1	T 型 (铜-铜镍热电偶)	(33)
3.6.2	J 型 (铁-铜镍热电偶)	(33)
3.6.3	E 型 (镍铬-铜镍热电偶)	(33)
3.6.4	K 型 (镍铬-镍热电偶)	(34)
3.6.5	N 型 (镍铬硅-镍硅热电偶)	(34)
3.6.6	R 型, S 型和 B 型热电偶	(34)
3.7	标准补偿电缆	(35)
3.7.1	补偿电缆的色码	(37)
3.7.2	例外	(38)
3.8	热电偶的连接	(38)
3.9	热电偶的构造	(43)
3.10	铠装热电偶	(43)
3.11	故障描述与排除	(46)
4	电阻温度计	(49)
4.1	电阻随温度的变化	(49)
4.2	铂电阻	(50)
4.2.1	利用电阻计算温度	(53)
4.2.2	误差限	(54)
4.2.3	扩展的允许误差等级	(55)
4.3	镍电阻	(57)
4.4	热电阻温度计的接线	(58)
4.4.1	两线制连接	(58)
4.4.2	三线制连接	(60)
4.4.3	四线制连接	(60)
4.4.4	两线变送器	(61)
4.5	构造	(62)
4.5.1	陶瓷骨架线绕电阻传感器	(62)
4.5.2	玻璃骨架线绕电阻传感器	(63)

4.5.3	箔片封装传感器	(65)
4.5.4	薄膜传感器	(66)
4.6	电阻温度计的长期表现	(67)
4.7	电阻温度计的误差	(69)
4.7.1	电缆的影响	(69)
4.7.2	绝缘电阻不足	(70)
4.7.3	自热效应	(70)
4.7.4	寄生热电势	(72)
5	热传导函数	(73)
6	传热误差	(77)
6.1	减小传热误差的方法	(79)
7	校准和检定	(81)
7.1	校准	(81)
7.2	校准服务	(83)
7.3	检定	(86)
8	各种组件和密封试管	(87)
8.1	电子温度计的结构	(87)
8.1.1	DIN 43729 规定的接线盒	(89)
8.1.2	使用范围	(89)
8.2	DIN 标准的温度计和保护管	(90)
8.3	特殊应用的温度计	(94)
8.3.1	为强振动设计的电阻温度计	(94)
8.3.2	食品工业用电阻温度计	(95)
8.3.3	热量表用电阻温度计	(96)
8.4	保护管的要求	(98)
8.4.1	金属保护管	(99)
8.4.2	用于熔化物的保护管	(101)
8.4.3	有机涂层	(102)
8.4.4	陶瓷保护管	(103)

8.4.5	陶瓷绝缘材料	(104)
8.4.6	特殊材料	(105)
8.5	保护管使用条件	(106)
8.5.1	在熔化物中使用的保护管材料	(107)
8.5.2	对气体的抗耐性	(108)
9	防爆装置	(111)
9.1	防爆类型	(113)
9.1.1	EN 50020 中的本安保护 “i” 类	(114)
9.1.2	温度传感器和防爆	(114)
9.2	本安电路	(114)
9.3	电气设备的相互连接	(115)
10	测量不确定度	(120)
10.1	测量过程	(121)
10.2	最简单的方法：不确定度区间	(122)
10.3	GUM 方法：标准测量不确定度	(122)
10.3.1	矩形分布	(125)
10.3.2	三角分布	(125)
10.3.3	正态分布	(126)
10.4	按 GUM 提出的方法确定测量不确定度	(126)
10.5	工业方法：扩展的测量不确定度	(127)
10.6	温度测量系统中各组成部分的不确定度	(128)
	参考文献	(138)

1 电子温度测量

温度测量在众多的测量过程中变得日益重要，大约 45% 的测量都与温度相关。它主要应用于熔炼（冶炼）、化学反应、食品加工、能源计量、空调系统。这里指的温度测量也不尽相同，要求的不同，工作原理的不同以及结构的不同。

在工业应用中，测量点经常与显示位置相距甚远，这是受工艺条件的限制，比如在熔炼和退火炉中。通常，这些数据还需要在控制器或记录器中做进一步的处理。我们日常所熟悉的直读式的温度计并不适用于这些应用；因此真正需要的是能将温度转化为电信号的温度计。这些电学的变送器仍然被称作温度计，严格地讲，这种意义上的变送器包括传感器的元件与它们周围的保护装置。

在工业电子温度测量中，高温计、电阻温度计和热电偶被广泛地使用。还有其他的测量系统，例如石英谐振力传感器和光纤系统，但还没有在工程上广泛地应用。

1.1 接触式测温

在各种方法中，热电偶和电阻温度计最适合可以接触的被测物体。它们被大量使用在如气体、液体、熔融金属的测量和固体表面及内部的温度测量中。传感器和防护装置的选用取决于准确度、响应、温度范围和化学性质。

电阻温度计利用了导体的电阻值随温度的变化而改变的特性。正温度系数传感器和负温度系数传感器之间存在着明显的不同。

同。正温度系数 (PTC) 传感器的电阻值随温度的升高而变大, 而负温度系数 (NTC) 传感器的电阻值随温度的升高而变小。

金属导体属于正温度系数 (PTC) 传感器。主要使用的金属有: 铂、镍、铱、铜和非掺杂硅 (扩散电阻), 其中铂电阻温度计的应用最为广泛。它的优点在于金属的化学稳定性, 减少了由于氧化和其他化学反应造成的污染的危险。

铂电阻温度计是工业应用中最精确的传感器, 同时还具有最好的长期稳定性。它的精确度可以达到被测温度的 $\pm 0.5\%$ 。由于老化, 一年后大约有 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的漂移。它们在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内都可以被使用, 应用的领域涵盖了从空凋制冷到化学工业。

一些特定的金属氧化物被用来制造负温度系数 (NTC) 传感器, 这些金属氧化物的电阻随温度的升高而变小。它们有时也被称为“热导体”, 因为它们只在较高温条件下表现出良好的电导率。

因为温度/电阻曲线具有下降特性, 它们也被称作 NTC (负温度系数) 电阻器。由材料的特性所决定, 活动电子的数量随温度的升高成指数增长, 表现在曲线图上急剧上升特性。

这种强烈的非线性特征成为 NTC 电阻器的主要缺点, 限制了它的测温范围大约只能到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。虽然可以将它串联一个十倍阻值的纯电阻来使其线性化, 但其精确度和线性度在较宽的测量范围内仍不能满足多数应用的需要。此外, 在交变温度下的温漂也要高于其他的方式。因为它的自身特性, 在测温中一旦电流过大, 就易产生自热效应。它的应用领域是在不超过 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下进行简单的监视和显示, 精确度要求在几度的范围内。

在很多简单的应用中, 因为其低廉的价格和比较简单的电子设备, 比起那些更昂贵的热电偶和 (金属) 电阻温度计, NTC 成为了首选。另外, 它们还具有造型小巧、响应速度快以及散热小等优点。在本书中将不对它作详细的讨论。

热电偶的工作原理是: 当金属丝上存在温度梯度时, 在这段

金属丝上就会出现基于材料的电导率而产生的电荷转移。如果两个具有不同电导率的导体连接到同一点，我们可以测量到一个由电子不同的移动而产生的温差电动势，它是由温度梯度的大小决定的。

热电偶的温度上限可达到几千摄氏度，这一点与电阻温度计相比具有明显的优势。但相对地，它的长期稳定性不是很好，准确度有些低。它们经常用于烤箱和熔炉中测量熔融金属和塑料机械（注塑）的温度，以及其他温度高于 250 °C 的场合。

1.2 非接触式测温

非接触测温适用于测移动的对象和难于接近的对象。包括旋转烤箱、纸或箔的制造机械、旋转的磨碎机、流动的熔融金属等。非接触测温还适用于低热容量和低电导率的对象，以及测量在熔炉中或距离很远的物体。这些情况无法使用接触式测温，所以把被测对象发出的热辐射作为测量值。

非接触测温仪表的基本形式称为高温计，与热电偶对应，高温计通过光学系统测量一个热物体发出的光辐射。如果可以确定被测物体充满了高温计的整个视野，那么这种简单的测量原理就可以用于温度的测量。

其他类型非接触式测温仪器的工作原理有一些不同，从被接收到的光辐射中过滤出一个特殊的波长，测定在全部辐射中这种特殊波长的辐射所占的比例。温度越高的物体，较短的波长所占的比例越高，物体所辐射出的光越显现为蓝色。众所周知，一个炽热物体的颜色由最初的红色变成白炽就是由于蓝光的成分越来越大。高温计对于红外辐射很灵敏，如果目标温度过低以致于到了可见光波长，那么高温计就无法工作了。

辐射通过滤谱器到达温差电堆，温差电堆就是一块由大量串联的热电偶组成的半导体芯片。这里产生的温差电动势不断放大

直到产生可以接收到的输出信号。对于温度测量范围，一个典型的信号范围为 $0 \sim 20$ mA。信号是线性的，因此测量仪器可以直接对其进行分析。手持仪器有积分显示。可用的各种类型如下所示：

1.2.1 全辐射计

高温计在热辐射光谱范围内的光谱灵敏度几乎与波长无关。如果被测物是一个黑体，那么辐射接收机的信号近似遵循 Stefan-Boltzmann（斯忒藩-玻耳兹曼）辐射定律。

1.2.2 光谱高温计

只对某个热辐射的窄带光谱敏感的高温计。如果被测物是一个黑体，那么辐射接收机的信号近似遵循 Planck's（普朗克）辐射定律。

1.2.3 波段辐射高温计

对热辐射的宽带光谱敏感的高温计。辐射接收机的信号既不遵循 Stefan-Boltzmann（斯忒藩-玻耳兹曼）辐射定律，也不遵循 Planck's（普朗克）辐射定律。

1.2.4 辐射密度高温计

直接通过辐射密度或与一个已知辐射密度的标准辐射体相比较来确定温度的高温计。

1.2.5 分布高温计

通过比较由被测物体的热辐射在两个不同光谱带产生的混合颜色和已知辐射密度的辐射体在两个光谱带产生的混合颜色来确定温度的高温计。

1.2.6 比率高温计

通过测定被测对象至少两个不同的热辐射光谱带的辐射密度比率来确定温度的高温计。

高温计的这种非接触测量原理使其能够方便快捷地测量移动

物体的温度。但是，被测物体发射热辐射的能力是难以确定的。一个物体辐射热的能力取决于它的表面，或者更确切地说取决于它的颜色。比起有色或白色的物体，黑体被加热，辐射出更多的热或光波。我们必须已知辐射系数并且把它置入高温计中。标准值往往针对于不同材料，如：黑色金属片、纸等。

不幸的是，高温计指示出的温度通常无法被其他测量方法测量到，这就意味着难以得到测量绝对真值。但是，如果所有条件不变，尤其是施加于物体表面的影响的条件保持不变，在仪器规定的准确度范围内的比较测量，是可以实现的。

安装高温计时，它不同于望远镜系统的安装。安装时应注意，必须保证只有被测物体实际出现于仪器的视野内。错误测量往往是由于反射面引入的外部辐射引起的。在镜头上堆积的灰尘将影响测量结果，当传感器安装在难以接近的位置时，加装一个压缩空气喷嘴将是很有帮助的。每间隔一段时间使用压缩空气喷嘴清除堆积在镜头上的悬浮微粒。与可见光相比，红外线可以更容易的穿透雾（水汽），但是就像被二氧化碳吸收一样，也会被雾（水汽）明显的吸收。基于以上原因，选择一个吸收光谱带以外的光谱灵敏带，以避免水汽和二氧化碳对测量结果的影响，就非常重要了。然而，高粉尘浓度环境，例如在水泥工业中，也会对测量产生不利的影响。高温计测量的应用范围为： $0^{\circ}\text{C} \sim 3000^{\circ}\text{C}$ 。

2 温度的概念

从物理意义上说,热是一种物体内部分子或原子无规则运动所产生内能的量度。就像网球的能量随速度的变大而增大一样,物体或气体的内能随温度的升高而变大。温度和质量、比热容等状态参数一起描述了一个物体所具有能量的多少。温度的基本单位是开尔文。在 0 K 时,物体内部的分子处于静止状态,不具有任何的热能。这也意味着,不存在具有更低的能量的负温度状态。物体的内在动能是无法直接测量到的。用一些有确定物理性质的热现象来代替进行测量,这些物理性质包括金属和液体的线性膨胀、电阻、温差电动势、石英晶体的振荡频率等。根据物理性质受热作用而变化的原理,形成了代替的实验方法。为了达到客观精密的温度测量,必须保证这些现象是稳定的并且是可复现的。

2.1 温标的历史

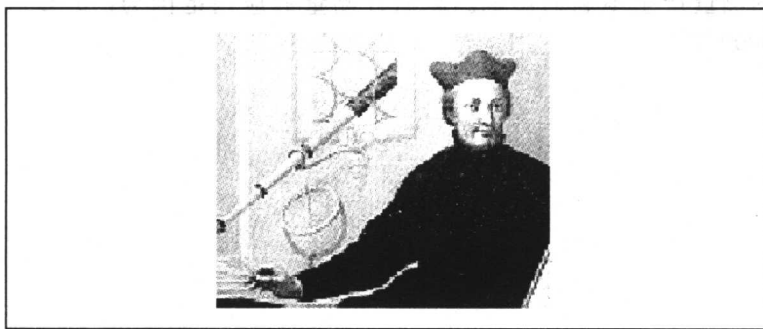


图 1: 伽利略