

热工测试技术

杨泽宽 王魁汉 编著

东北工学院出版社

72.56
681

热 工 测 试 技 术

杨泽宽 王魁汉 编著

34524/22

东北工学院出版社

本书系统地阐述了温度、压力、流量、成分、传热量等传感器及测量仪表的原理、特性及应用,专门探讨了热工测试技术的基本原理与测量方法。在内容上紧密联系生产实际,并注意反映国内外有关测量仪表及测试技术方面的新发展,同时还编入了作者多年来进行科学研究的成果。

本书适于冶金、机械、化工、石油等相应专业的本科大学生、电大、函大学生使用,还可供工矿企业、计量部门及科研单位从事热工测试的科技人员参考。

本书第1~6章由王魁汉编写,第7~12章及附录由杨泽宽编写。

热 工 测 试 技 术

杨泽宽 王魁汉 编著

东北工学院出版社出版 辽宁省新华书店发行
(沈阳 南湖) 沈阳铝镁设计院印刷厂印刷

1092×787毫米 1/16 印张: 24 字数: 550千字
1987年4月第1版 1987年4月第一次印刷 印数: 5000册

责任编辑: 许默夫 封面设计: 赵殿泽

统一书号: 15476.7 定价 3.98 元

ISBN 7-31006-007-4

TH·2

目 录

第 1 章 温度测量概述.....	(1)
1.1 温标.....	(1)
1.1.1 温度.....	(1)
1.1.2 温度测量的基本原理.....	(1)
1.1.3 温标.....	(2)
1.1.4 1968年国际实用温标 IPTS-68 (1975)	(2)
1.2 温度测量.....	(5)
1.2.1 温度测量方法.....	(5)
1.2.2 温度计的分类.....	(5)
1.2.3 温度计的选择.....	(6)
1.2.4 温度量值的传递.....	(6)
第 2 章 膨胀式温度计	(8)
2.1 玻璃温度计.....	(8)
2.1.1 概述.....	(8)
2.1.2 玻璃温度计的测温原理.....	(8)
2.1.3 玻璃温度计所用材料及其特性.....	(10)
2.1.4 玻璃温度计的结构.....	(11)
2.1.5 玻璃温度计的基本参数.....	(11)
2.1.6 玻璃温度计的检定.....	(12)
2.1.7 玻璃温度计的使用.....	(13)
2.2 双金属温度计.....	(14)
2.2.1 概述.....	(14)
2.2.2 双金属温度计的测温原理.....	(14)
2.2.3 双金属温度计的分类.....	(15)
2.2.4 双金属温度计的基本参数.....	(15)
2.2.5 双金属温度计的使用.....	(16)
2.3 压力式温度计.....	(17)
2.3.1 概述.....	(17)
2.3.2 压力式温度计的原理、结构与分类.....	(17)

2.3.3 压力式温度计的基本参数	(18)
2.3.4 压力式温度计的使用	(18)

第3章 电阻温度计 (20)

3.1 热电阻的测温原理	(20)
3.1.1 热电阻材料的电阻与温度的关系	(20)
3.1.2 热电阻的测温原理	(21)
3.2 热电阻的分类与特性	(22)
3.2.1 热电阻的分类	(22)
3.2.2 标准铂电阻温度计	(22)
3.2.3 工业热电阻	(24)
3.3 热电阻的结构	(26)
3.3.1 热电阻感温元件	(26)
3.3.2 热电阻的内引线	(29)
3.3.3 热电阻的保护管与绝缘管	(30)
3.3.4 铠装热电阻	(32)
3.4 热敏电阻	(32)
3.4.1 概述	(32)
3.4.2 热敏电阻材料及特性	(33)
3.4.3 热敏电阻感温元件的结构	(35)
3.5 热电阻的基本参数	(36)
3.5.1 热电阻的基本参数	(36)
3.5.2 热敏电阻的允许误差	(37)
3.6 热电阻的测量线路	(38)
3.6.1 电桥法	(38)
3.6.2 电位差计法	(40)
3.7 热电阻的使用及其测量误差	(41)
3.7.1 热电阻自热效应误差	(41)
3.7.2 由 R_0 引入的误差	(41)
3.7.3 稳定性误差	(42)
3.7.4 引线误差	(42)
3.7.5 动态响应误差	(43)

3.7.6 安装方法引起的误差	(43)
3.7.7 热电阻的劣化与使用寿命	(44)
3.8 热电阻的选择标准	(45)
3.8.1 使用温度范围	(46)
3.8.2 测量精度	(46)
3.8.3 保护管的选择	(46)
 第 4 章 热电温度计	 (47)
4.1 热电偶测温原理	(47)
4.1.1 热电偶测温原理	(47)
4.1.2 热电偶测温的基本定律	(48)
4.2 热电偶的种类及其特性	(49)
4.2.1 热电极材料	(49)
4.2.2 贵金属热电偶与贱金属热电偶	(51)
4.2.3 标准型热电偶	(51)
4.2.4 标准型热电偶的基本参数	(56)
4.2.5 非标准型热电偶	(59)
4.2.6 非金属热电偶材料	(62)
4.3 热电偶的选择	(63)
4.3.1 热电偶的选择	(63)
4.3.2 高温下热电偶的适应性	(65)
4.4 热电偶的绝缘管与保护管	(65)
4.4.1 绝缘管	(65)
4.4.2 热电偶保护管	(67)
4.4.3 金属保护管	(68)
4.4.4 非金属保护管	(71)
4.4.5 金属陶瓷保护管	(75)
4.4.6 复合型保护管	(77)
4.5 热电偶的结构	(79)
4.5.1 普通型热电偶的结构	(79)
4.5.2 铠装热电偶	(79)
4.5.3 高性能实体热电偶	(82)

4.6 补偿导线	(85)
4.6.1 补偿导线的工作原理.....	(85)
4.6.2 补偿导线的型号及规格.....	(85)
4.6.3 补偿导线的基本参数.....	(89)
4.6.4 补偿导线的使用.....	(89)
4.7 测温线路	(92)
4.7.1 基准接点.....	(92)
4.7.2 测温线路的连接方式.....	(94)
4.7.3 测温线路.....	(94)
4.7.4 测量仪表.....	(97)
4.8 热电偶的使用	(98)
4.8.1 热电偶的焊接、清洗与退火.....	(98)
4.8.2 热电偶的劣化.....	(100)
4.8.3 铠装热电偶与补偿导线的劣化.....	(104)
4.8.4 热电偶的安装与测量误差.....	(104)
4.8.5 在感应条件下测温的干扰与抗干扰.....	(106)
 第 5 章 辐射温度计	 (107)
5.1 辐射测温原理	(108)
5.1.1 热辐射.....	(108)
5.1.2 黑体辐射与发射率.....	(110)
5.1.3 黑体辐射定律.....	(112)
5.2 单色辐射温度计	(114)
5.2.1 光学高温计.....	(114)
5.2.2 光电高温计.....	(122)
5.3 辐射温度计	(124)
5.3.1 辐射温度计测温原理与分类.....	(124)
5.3.2 辐射温度计的结构.....	(125)
5.3.3 辐射温度计的使用.....	(128)
5.3.4 前置反射器辐射温度计.....	(131)
5.4 比色温度计	(132)
5.4.1 比色温度计测温原理与分类.....	(132)

5.4.2 比色温度计的结构	(133)
5.4.3 比色温度计的使用	(135)
5.5 部分辐射温度计	(138)
5.5.1 部分辐射温度计的原理与分类	(138)
5.5.2 红外温度计	(138)
5.5.3 红外热象仪及其应用	(140)
 第6章 测温技术	 (144)
6.1 概述	(144)
6.2 固体内部温度测量	(144)
6.2.1 接触法测量	(144)
6.2.2 非接触法测量	(146)
6.3 固体表面温度测量	(146)
6.3.1 固体表面温度测量的特点	(146)
6.3.2 静止表面的温度测量	(146)
6.3.3 运动物体表面温度测量	(150)
6.3.4 带电物体表面温度测量	(153)
6.3.5 移动细丝的表面温度测量	(154)
6.3.6 表面温度计检定装置	(155)
6.4 气体温度测量	(158)
6.4.1 管道内高速气流温度测量	(158)
6.4.2 高温气体温度测量	(160)
6.5 液体温度测量	(164)
6.5.1 接触法测量液体温度	(164)
6.5.2 石油化工企业中液体温度测量	(164)
6.5.3 高温盐浴炉的温度测量	(165)
6.5.4 自行车盐浴钎焊炉温度测量	(168)
6.5.5 铝水及铝电解液连续测温	(169)
6.5.6 铜水连续测温	(170)
6.5.7 钢水温度测量(间断法)	(172)
6.5.8 钢水连续测温	(176)

第7章 压力测量	(182)
7.1 概述	(182)
7.1.1 压力的基本概念及单位	(182)
7.1.2 大气压、绝对压力、表压及真空度	(184)
7.2 液柱式压力计	(185)
7.2.1 U形管压力计	(185)
7.2.2 单管压力计	(186)
7.2.3 斜管压力计	(187)
7.2.4 补偿式微压计	(188)
7.3 弹性式压力计	(188)
7.3.1 弹簧管式压力计	(189)
7.3.2 波纹管式压力计	(192)
7.3.3 膜盒式微压计	(192)
7.4 压力传感器	(193)
7.4.1 电位器式压力传感器	(194)
7.4.2 应变式压力传感器	(194)
7.4.3 霍尔式压力传感器	(196)
7.4.4 电感式压力传感器	(197)
7.4.5 电容式压力传感器	(198)
7.5 活塞式压力计	(199)
7.5.1 单活塞式压力计	(199)
7.5.2 主要技术指标	(200)
7.5.3 修正计算	(200)
7.5.4 注意事项	(200)
7.6 压力计的选择和使用	(201)
7.6.1 压力计的选择	(201)
7.6.2 压力计的使用	(201)
第8章 流量测量	(204)
8.1 概述	(204)
8.2 差压式流量计	(204)

8.2.1 动压测定管	(204)
8.2.2 节流变压降流量计	(216)
8.2.3 恒压变压截面流量计	(218)
8.3 速度式流量计	(222)
8.3.1 涡轮流量计	(222)
8.3.2 电磁流量计	(225)
8.3.3 超声波流量计	(227)
8.3.4 激光流速计	(228)
8.3.5 热线风速仪	(230)
8.4 容积式流量计	(231)
8.4.1 椭圆齿轮流量计	(231)
8.4.2 旋转活塞式流量计	(233)
8.5 质量式流量计	(234)
8.5.1 直读式质量流量计	(235)
8.5.2 推导式质量流量计	(235)
8.5.3 温度、压力补偿式质量流量计	(236)
8.6 流量测量仪表的选用	(238)
 第9章 节流装置	 (242)
9.1 概述	(242)
9.2 标准节流装置的结构	(243)
9.2.1 节流装置的取压方式	(243)
9.2.2 标准孔板及其取压装置结构	(244)
9.2.3 标准喷嘴及其取压装置结构	(245)
9.2.4 文丘利管	(246)
9.3 标准节流装置的流量公式	(247)
9.3.1 流量公式	(247)
9.3.2 流量公式中有关参数及其确定方法	(250)
9.3.3 标准节流装置的压力损失	(253)
9.4 非标准节流装置	(253)
9.4.1 四分之一圆喷嘴	(253)
9.4.2 锥形入口孔板	(254)

9.4.3 偏心孔板和圆缺孔板·····	(255)
9.4.4 道尔管·····	(256)
9.5 节流装置流量计用的差压计·····	(258)
9.5.1 概况·····	(258)
9.5.2 双波纹管差压计·····	(259)
9.5.3 力平衡式差压 (或流量) 变送器·····	(260)
9.6 节流装置的计算·····	(262)
9.7 节流装置的正确选择和使用·····	(263)
9.7.1 节流装置的选择·····	(263)
9.7.2 节流装置的使用·····	(265)
 第10章 成分分析·····	 (269)
10.1 概述·····	(269)
10.2 取样和试样预处理·····	(270)
10.2.1 取样地点·····	(270)
10.2.2 样品成分的保持·····	(271)
10.2.3 取样管及储气器·····	(271)
10.2.4 自动取样和试样预处理系统·····	(271)
10.3 人工分析器·····	(273)
10.3.1 工作原理、结构、操作·····	(273)
10.3.2 注意事项·····	(274)
10.3.3 人工分析器中溶液的配制·····	(275)
10.4 氧含量分析器·····	(275)
10.4.1 磁式氧分析器·····	(275)
10.4.2 氧化锆式氧量分析器·····	(278)
10.5 红外线气体分析器·····	(281)
10.5.1 工作原理·····	(281)
10.5.2 结构原理·····	(281)
10.6 气相色谱仪·····	(283)
10.6.1 工作原理·····	(283)
10.6.2 仪器的基本组成及有关问题·····	(284)
10.6.3 定性和定量分析·····	(288)

10.6.4	特点和选型	(289)
10.6.5	近年来国外色谱仪发展的动向	(289)
10.7	湿度的测量	(290)
10.7.1	概况	(290)
10.7.2	光电露点湿度计	(291)
10.7.3	氯化锂露点仪	(292)
10.8	数据处理装置	(293)
10.8.1	概况	(293)
10.8.2	基本功能	(294)
10.8.3	色谱仪用数据处理装置	(295)
10.8.4	数据处理装置的发展	(296)
第11章	传热测量	(297)
11.1	概述	(297)
11.2	热流的测量	(297)
11.2.1	导热式热流计	(297)
11.2.2	空心椭球式全辐射热流计	(300)
11.2.3	量热式热流计	(302)
11.2.4	潜热式热流计	(303)
11.2.5	(法国)国家宇航研究局(Onera)热流计	(304)
11.2.6	热容式热流计	(306)
11.2.7	热流计的校验、选择与影响精度的因素	(307)
11.2.8	热流计的应用	(308)
11.3	导热系数的测量	(311)
11.3.1	双平板法	(311)
11.3.2	稳定平板法	(312)
11.3.3	由测得的导温系数计算导热系数	(313)
11.4	物体表面发射率的测量	(314)
11.4.1	在线测量法	(314)
11.4.2	稳态卡计法	(316)
11.5	火焰辐射的测量	(317)
11.5.1	整个厚度火焰全辐射黑度的测量	(318)
11.5.2	局部辐射的测量	(319)

第12章 现场热工测试	(322)
12.1 概述	(322)
12.2 炉窑热平衡测算方法	(323)
12.2.1 燃料燃烧化学热 (或电能)	(323)
12.2.2 收入项中各项物理热	(324)
12.2.3 化学反应放热	(325)
12.2.4 物料带出热	(326)
12.2.5 烟气带走物理热	(326)
12.2.6 燃料不完全燃烧热损失	(327)
12.2.7 炉体蓄散热损失	(327)
12.2.8 水冷却和汽化冷却热损失	(328)
12.2.9 炉门或孔洞辐射热损失	(329)
12.2.10 逸气热损失	(330)
12.2.11 化学反应吸热	(331)
12.2.12 氧化物带走物理热	(331)
12.2.13 其他热支出	(332)
12.3 炉窑热效率和燃料消耗率测算方法	(332)
12.3.1 炉窑热效率	(332)
12.3.2 燃料消耗率	(334)
12.4 空气消耗系数的测算方法	(335)
12.4.1 利用测定燃料量和空气量确定空气消耗系数	(336)
12.4.2 利用测定烟气成分计算空气消耗系数	(336)
12.4.3 利用经验公式计算空气消耗系数	(337)
12.5 温热制度测算方法	(338)
12.5.1 温度制度测算方法	(338)
12.5.2 供热制度测算方法	(341)
12.6 压力制度测定方法	(342)
12.7 现场测试与结果分析实例	(342)
12.7.1 连续加热炉热平衡测算结果和分析	(342)
12.7.2 冲天炉热平衡测算结果和分析	(345)
12.7.3 连续加热炉温度制度测算结果和分析	(346)
12.7.4 连续加热炉压力制度测定结果和分析	(347)

附录： 测试设计与数据整理	(350)
(一) 正交试验设计	(350)
(二) 正交试验设计法的直观分析	(352)
(三) 交互作用	(354)
(四) 水平数相等的多因素试验设计方法	(357)
(五) 一元线性回归	(358)
(六) 一元非线性回归	(363)
参考文献	(368)

第1章 温度测量概述

温度是国际单位制 (SI) 中七个基本物理量之一, 也是工业生产中重要的工艺参数。无论冶金、石化, 还是轻工、国防, 以至食品卫生、环保等生产与科研部门都离不开温度测量。人们常常把温度比喻成工业生产的脉搏。多种工业产品的产量、质量、能耗等都直接或间接与温度参数有关。因此, 温度测量是热工测量中应用频率最高的技术。尤其是在当前节能与热管理技术中, 没有温度的准确测量与控制, 任何技术都难以充分发挥作用。所以, 准确地测量温度是实现节能的关键环节。而且, 温度测量在科学技术的各个领域都是强有力的监测手段。

人们往往以为温度测量很简单, 其实要准确地测量温度是很困难的。这与长度和质量的测定不同, 只要有了标准量块和天平, 长度和质量的测定都能得到某种准确度的测量结果。然而, 温度测量并非如此轻而易举, 无论采用准确度多么高的温度计, 如果温度计的选择不当, 或者测量方法不合适, 均不能得到准确的测量结果。由此可以看出实用测温技术的重要性和复杂性。

1.1 温 标

1.1.1 温度

物体的冷热程度常用温度来表示。温度的高低, 通常可由人的感觉器官感觉出来, 但这很不可靠, 更谈不上准确了。例如, 我们在环境温度为 5°C 的室内坐久了会觉得冷, 可是, 对一个长时间呆在冰天雪地的人, 突然进入此屋内, 则会感到很暖和。因此, 用人的感觉来判断温度的高低是不科学的。必须寻求一种客观的科学的测温方法。但是, 温度测量又不能象长度计量那样直接地用长度单位来表示。温度量只能借助于某种物质随温度按一定规律改变的物理性质来测量。然而, 到目前为止, 尚未能找出完全满足上述要求的物质。基本上符合要求的物质及其相应的物理性质有: 液体、气体的体积或压力; 热电偶的热电势; 金属的电阻及物体的热辐射等都随温度的不同而变化。这些都可以作为温度测量的基础。但是要分析和解决实际中提出的各种热学问题, 还必须对温度的概念建立起严格的科学的定义。

1.1.2 温度测量的基本原理

假定有两个热力学系统, 原来各处在一一定的平衡态, 这两个系统互相接触时, 它们之间将发生热交换 (这种接触叫做热接触), 实验证明, 热接触后的两个系统一般都发生变化, 但经过一段时间后, 两个系统的状态便不再变化了, 说明两个系统又达到新的平衡态。这种平衡态是两个系统在有热交换的条件下达到的, 称为热平衡。

现在取三个热力学系统A、B、C进一步做实验。将B和C相互隔绝开, 但使它们同时与A接触, 经过一段时间后, A与B以及A与C都达到了热平衡。这时如果再将B与C接触, 则发现B和C的状态都不再发生变化, 说明B与C也达到了热平衡。由此可以得出结论: 如果两个热力学系统都分别与第三个热力学系统处于热平衡, 则它们彼此间也必定处于热平衡。该

结论通常称为热力学第零定律。

由热力学第零定律得知，处于同一热平衡状态的所有物体都具有某一共同的宏观性质，表征这个宏观性质的物理量就是温度。温度这个物理量仅取决于热平衡时物体内部的热运动状态。换句话说，温度反映了物体内部的热运动状态，即温度高的物体，分子平均动能大；温度低的物体，分子平均动能小。因此，温度可表征构成物体的大量分子的无规则运动的程度。

一切互为热平衡的物体都具有相同温度，这是用温度计测量温度的基本原理。选择适当的温度计，在测量时使温度计与待测物体接触，经过一段时间达到热平衡后，温度计就可以显示出被测物体的温度。

1.1.3 温标

(1) 温标

为了保证温度量值准确一致，首先要建立统一的标准，应有一个用来衡量温度的标准尺度，简称温标。温度的高低必须用数字来说明，温标就是温度的数值表示方法。各种温度计的数值都是由温标决定的。为使温度量值在世界范围内统一，必须建立统一的温标，国际统一的温标，就是国际实用温标。

国际实用温标是一种国际协议性温标。最科学的温标是建立在热力学第二定律基础上的热力学温标。通常采用气体温度计来实现热力学温标。但气体温度计装置复杂，使用不便。为此，必须找出既与热力学温度十分接近，又要使用方便的温标。因此，出现了国际实用温标，用来统一各国间的温度量值。

(2) 国际实用温标

国际实用温标通常具备以下条件：

- (a) 尽可能接近热力学温度；
- (b) 复现精度高，各国均能以很高的准确度复现同样的温标，确保温度量值的统一；
- (c) 用于复现温标的标准温度计使用方便，性能稳定。

最早建立的国际实用温标是在1927年第七届国际计量大会上通过并采用的温标，定名为1927年国际温标（简称ITS-27），以后又作了若干次修改。目前国际间（包括我国）采用的是1975年第15届国际计量大会上通过的1968年国际实用温标（1975年修订版）。

1.1.4 1968年国际实用温标 IPTS-68 (1975)

(1) 基本温度及其表示方法

1968年国际实用温标规定，以热力学温度作为基本温度。热力学温度的符号为 T ，单位是开尔文，符号为K（Kelvin的第一个字母），开尔文的定义为水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

在1968年国际实用温标中，对摄氏度（degree Celsius）作了新的定义，即热力学摄氏温度（符号为 t ）定义为：

$$t = T - 273.15 \quad (1-1)$$

摄氏温度的单位是摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ ，例如，今天气温 20°C ，应读作20摄氏度，不能读作摄氏20度。从上述定义可以看出，摄氏温度的数值是以273.15K为起点（ $t=0$ ），而热力

学温度则是以0K为起点 ($T=0$)，这两种温度仅是起点不同，无本质差别。在表示温度差及温度间隔时：

$$1^{\circ}\text{C} = 1\text{K} \quad (1-2)$$

通常在0℃以上用摄氏温度表示，在0℃以下或理论研究中，多采用热力学温度。

除摄氏温度外，在某些国家中，还沿用另一种温度单位——华氏 (Fahrenheit) 温度，华氏温度的单位为华氏度，符号为 $^{\circ}\text{F}$ ，在表示温度数值时，华氏温度与摄氏温度及热力学温度的换算关系分别为：

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) \quad (1-3)$$

$$\text{K} = \frac{5}{4} (^{\circ}\text{F} + 459.67) \quad (1-4)$$

在表示温度差或间隔时：

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

例如，美国标准中规定S型热电偶补偿导线的使用温度范围为75~400 $^{\circ}\text{F}$ ，误差限为 $\pm 12^{\circ}\text{F}$ 。换算成摄氏温度则分别为：

$$t_{\text{C1}} = \frac{5}{9} (75 - 32) = 24^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{C2}} = \frac{5}{9} (400 - 32) = 204^{\circ}\text{C}$$

$$\text{误差限则为 } \frac{5}{9} \times 12 = 7^{\circ}\text{C}$$

即，使用温度范围为24~204℃，误差限为 $\pm 7^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 温标的基本规定

1968年国际实用温标，是以定义固定点温度的指定值以及在这些固定点上分度过的标准仪器来实现热力学温标的。各定点间的温度是依据插补公式使标准仪器的示值与国际实用温标的温度值相联系。

(a) 定义固定点

所谓定义固定点是利用纯物质各相间可实现的平衡状态建立起来的温度点。如水三相点温度的指定值为0.01℃。ITS-68 (1975) 温标有13个固定点，这些固定点的名称、平衡状态及其温度的指定值如表1—1所示。除了固定点外，还提供了33个参考点，它们的作用与固定点类似，只是其准确度低一点。这些参考点，称为第二类参考点利用这些固定点或第二类参考点，可对标准仪器或高精度仪器进行分度与校验。例如，当S型热电偶用于140℃以上时，可利用钯点校验S型热电偶。

(b) 标准仪器与插补公式 (或称内插公式)

由于没有一种温度计能适用于整个国际实用温标的温度范围，因此，1968年国际实用温标分四个温区，在各温区内分别采用不同的插补公式与标准仪器。

1) 用于13.81K~630.74℃的标准仪器是铂电阻温度计。在13.81K~273.15K (0℃以下) 的插补公式为：