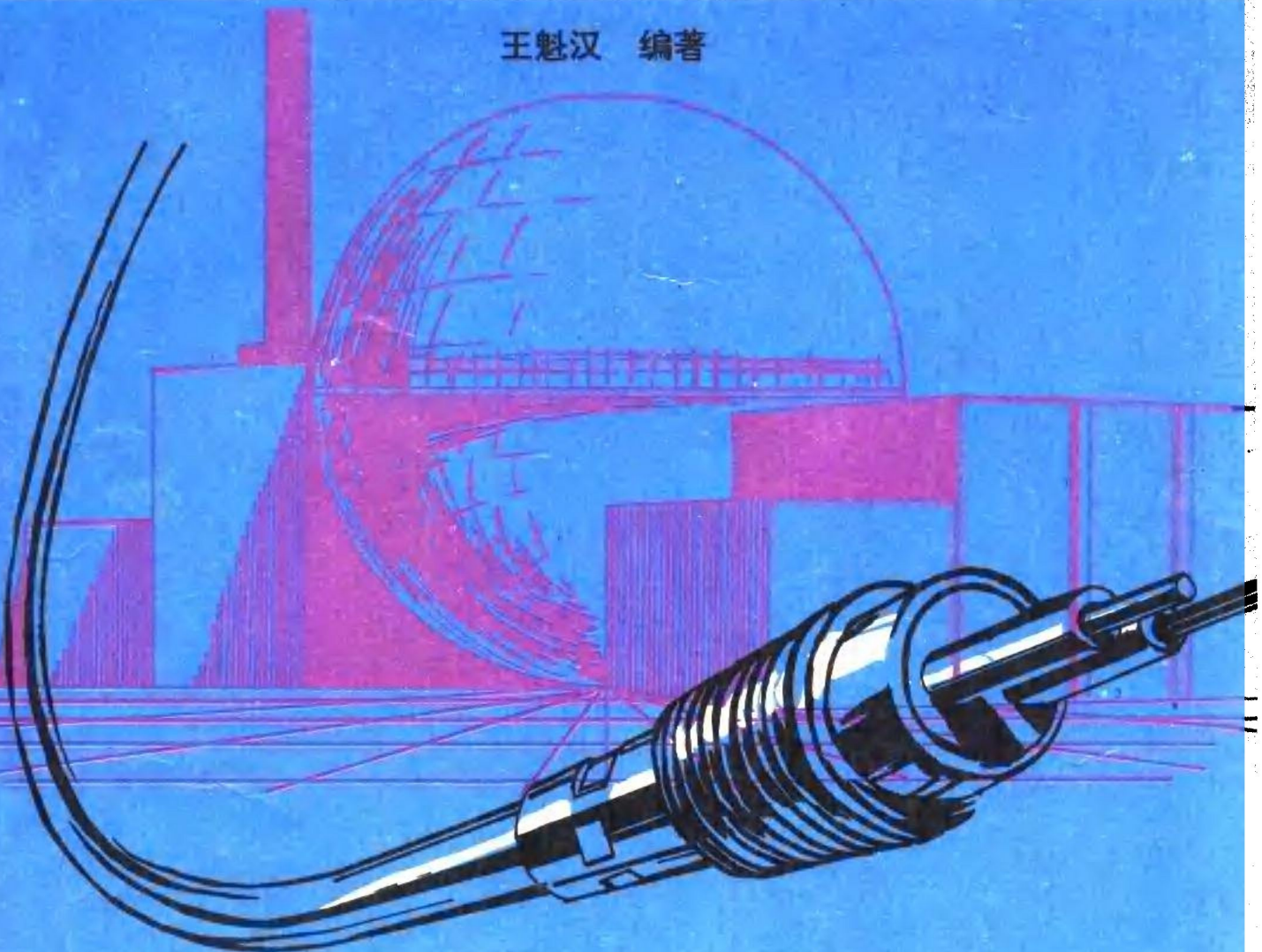


THERMOMETRICAL
TECHNIQUES

温度测量技术

王魁汉 编著



东北工学院出版社

11

内 容 提 要

本书全面系统地论述了温度传感器及有关测温的基本原理与应用技术。全书共分7章,前6章着重介绍了1990年国际温标和玻璃液体温度计、双金属及压力式温度计,热电阻、热电偶、辐射、红外等各种温度计,以及光纤、晶体、核磁共振等新型温度计的工作原理、特性、选择与应用。第7章全面阐述了有关固体表面、固体内部、高温气体、高速流体、高温熔体等温度测量技术的原理、方法,以及使用注意事项等;还介绍了测温、定碳、定硅及钢液定氧的基本原理与应用。在内容上紧密联系生产实际,注意反映国内外有关测温学的新理论、新发展、新动向,并认真收集整理国内外有关标准与资料,同时还汇入了作者多年来已取得的科研成果及教学、现场测温实践的经验。

本书深入浅出,注重实用,兼有教材及工具书的特点,可供冶金、石油、化工等相关专业的学生以及从事热工计量测试的工程技术人员阅读,也可作为高校相关专业的研究生及教师的参考书。

温 度 测 量 技 术

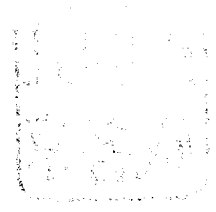
王魁汉 编著

东北工学院出版社出版发行 中国科学院印刷厂印刷
(沈阳·南湖) (辽新出许字89096号)

开本: 787×1092 1/16 印张: 20.625 字数: 515千字
1991年7月第1版 1991年7月第1次印刷
印数: 7000册

责任编辑: 秦振华 高起元 责任校对: 马岭
封面设计: 唐敏智

ISBN 7-81006-309-X/TB·22 定价: 9.85元



前 言

温度是一个基本的物理量，它是工业生产过程中最普遍、最重要的工艺参数。无论是工农业生产，还是科学研究，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、质量和能耗等指标都直接与温度参数有关，因而温度测量是现代测试技术中应用频率最高的技术之一。特别是节能降耗与热能管理技术，如没有温度的准确测量与控制，都难以充分发挥作用，所以，温度的准确测量是实现节能降耗的关键环节。有人觉得温度测量很简单，插入一支温度计就行。这种认识是不科学的。其实要准确测量温度是很困难的，这与其它物理量，如长度、质量的测定不同。只要有了标准量块和天平，长度和质量的测定就可能得出某种准确度的测量结果。然而，温度测量却并非如此轻而易举，无论采用准确度怎样高的温度计，如果温度计选择不当，或者测量方法不适宜，或者测量环境不合适，都不能得到所希望的测量结果。

为了提高计量测试的技术水平，研究测温原理和应用技术是十分必要的。然而，有关测温技术与理论的书籍却比较缺乏。作者长期从事测温理论与应用技术的研究，切身感到实用测温技术的重要性和复杂性。为此，本人曾于1986年撰写一本《热工测试技术》，出版后颇受欢迎，很快销售一空。许多读者纷纷来信，要求再版。作者在辽宁省计量测试学会温度专业委员会的支持下，在同行专家的鼓励下，决心再编写一本材料更加新颖、内容更加实用、理论更加系统、结构更加科学的新著——《温度测量技术》。本书从温度测量实际出发，阐述了温标、温度传感器、新型温度计等的工作原理、测试技术及使用注意事项，还介绍了测温定碳、定硅及钢液定氧的原理与应用。在内容上紧密联系生产实际，力求学以致用，不仅较系统地收集了国内外新型温度传感器和测温技术方面的新成果，反映了近年来的发展动向，还汇入了作者多年来所取得的科研成果及教学、现场测温实践的经验。

本书力求深入浅出，注重实用，兼有教材及工具书的特点，可供冶金、石油、化工等相应专业的学生，以及从事热工测试的工程技术人员阅读，也可作为高校相关专业研究生和教师的参考书。

本书在编写过程中得到许多专家的帮助。宋德华高级工程师编写了新温标，并对部分章节进行审阅；林应文教授提供了光纤温度计等方面的资料；高魁明教授、吴惠来高级工程师、崔传孟副教授、赵藪副教授、黄力仁高级工程师以及王玉仓等学者及工程技术人员也都提出宝贵建议。在撰写本书时，还参阅了国内外某些学术专著、技术标准、手册。在此，一并致以诚挚的谢意。笔者希望得到读者支持，欢迎批评指正。

作 者

1991年5月

目 次

1 温度测量概述

1.1 温度与温标	(1)
1.1.1 温 度	(1)
1.1.2 温 标	(1)
1.2 1990年国际温标(ITS-90)简介	(4)
1.2.1 定义固定点	(4)
1.2.2 标准仪器	(5)
1.2.3 内插公式	(5)
1.3 温度测量基础	(11)
1.3.1 测度测量的基本原理	(11)
1.3.2 温度计的选择	(11)
1.3.3 温度量值的传递	(15)

2 膨胀式温度计

2.1 玻璃液体温度计	(17)
2.1.1 特性与分类	(17)
2.1.2 原理与结构	(18)
2.1.3 使用注意事项及测量误差	(20)
2.2 压力式温度计	(21)
2.2.1 原理与结构	(22)
2.2.2 使用注意事项与测量误差	(24)
2.3 双金属温度计	(24)
2.3.1 原理与结构	(24)
2.3.2 使用注意事项及测量误差	(26)
2.3.3 产品型号的组成	(26)

3 电阻温度计(热电阻)

3.1 电阻温度计及其特性	(27)
3.1.1 特 性	(27)
3.1.2 原 理	(27)
3.1.3 标准铂电阻温度计	(29)
3.2 热电阻的结构	(31)
3.2.1 感温元件	(31)

3.2.2	内引线形式	(33)
3.2.3	保护管	(33)
3.3	工业热电阻	(34)
3.3.1	热电阻的分类与性能	(34)
3.3.2	工业热电阻	(36)
3.3.3	铠装热电阻	(39)
3.3.4	薄膜铂热电阻	(40)
3.3.5	厚膜铂热电阻	(41)
3.3.6	热电阻的选择	(42)
3.4	热敏电阻	(43)
3.4.1	热敏电阻材料及特性	(43)
3.4.2	热敏电阻的结构与使用	(49)
3.5	测量线路	(55)
3.5.1	电阻法(电桥法)	(55)
3.5.2	电位法(电位差计法)	(57)
3.5.3	工业测量仪表	(58)
3.6	使用注意事项及测量误差	(59)
3.6.1	灵敏度与自热效应	(59)
3.6.2	实际电阻值对 R_0 偏离的影响	(60)
3.6.3	连接导线与绝缘电阻的影响	(60)
3.6.4	连接导线温度变化的影响	(61)
3.6.5	动态特性	(61)
3.6.6	安装方法	(62)
3.6.7	热电阻的劣化与使用寿命	(63)
3.6.8	稳定性误差	(64)
3.6.9	产品型号的组成	(64)
3.6.10	检定与精度管理	(64)
4	热电温度计(热电偶)	
4.1	热电偶的原理与特点	(66)
4.1.1	特点	(66)
4.1.2	原理	(66)
4.1.3	基本定则	(69)
4.2	热电偶的分类及其特性	(73)
4.2.1	贵金属热电偶与贱金属热电偶	(74)
4.2.2	标准化热电偶	(74)
4.2.3	标准化热电偶的基本参数	(88)
4.2.4	非标准化热电偶	(92)

4.2.5	热电偶的选择	(100)
4.3	绝缘物与保护管	(102)
4.3.1	绝缘物	(102)
4.3.2	保护管材料	(104)
4.3.3	保护管的结构	(116)
4.3.4	保护管的强度	(117)
4.3.5	保护管的抗热震性能	(121)
4.4	热电偶的结构与分类	(122)
4.4.1	普通工业用热电偶	(122)
4.4.2	铠装热电偶	(123)
4.4.3	高性能实体热电偶	(128)
4.4.4	特种热电偶	(131)
4.5	补偿导线	(133)
4.5.1	原理	(133)
4.5.2	补偿导线的型号与规格	(134)
4.5.3	补偿导线的基本参数	(139)
4.5.4	补偿导线的使用	(140)
4.6	测温线路	(142)
4.6.1	参考端	(142)
4.6.2	测温线路	(145)
4.6.3	一体化二线制温度变送器	(150)
4.7	热电偶的使用与测量误差	(153)
4.7.1	热电偶的焊接、清洗与退火	(153)
4.7.2	热电偶的劣化与使用寿命	(154)
4.7.3	铠装热电偶与补偿导线的劣化	(158)
4.7.4	使用注意事项与测量误差	(158)
4.7.5	在感应条件下测温的干扰与抗干扰	(164)
4.7.6	产品型号的组成	(164)
4.7.7	检定与精度管理	(164)
5	辐射温度计	
5.1	辐射测温原理	(167)
5.1.1	热辐射	(167)
5.1.2	黑体辐射与发射率	(169)
5.1.3	黑体辐射定律	(170)
5.2	光谱辐射温度计	(172)
5.2.1	光学高温计	(172)
5.2.2	光学高温计的使用及测量误差	(178)

5.2.3	光电高温计	(179)
5.3	辐射温度计	(181)
5.3.1	辐射温度计原理与分类	(182)
5.3.2	辐射感温器的结构	(183)
5.3.3	辐射温度计的使用及测量误差	(184)
5.3.4	前置反射器辐射温度计	(187)
5.4	比色温度计	(187)
5.4.1	比色温度计原理与分类	(188)
5.4.2	比色温度计的结构	(189)
5.4.3	比色温度计的使用及测量误差	(191)
5.4.4	辐射温度计的选择	(192)
5.5	部分辐射温度计	(194)
5.5.1	部分辐射温度计原理与分类	(194)
5.5.2	红外温度计	(194)
5.5.3	红外温度计原理与结构	(195)
5.5.4	红外探测器	(195)
5.5.5	红外温度计的使用及测量误差	(200)
5.5.6	红外热像仪	(201)
5.5.7	辐射温度计产品型号的组成及检定系统	(204)
6	新型温度计(传感器)	
6.1	光纤温度计(传感器)	(206)
6.1.1	光纤温度计原理与特性	(206)
6.1.2	接触式光纤温度计	(211)
6.1.3	非接触式光纤温度计	(216)
6.1.4	分布参数式光纤传感器	(222)
6.1.5	光纤测温技术的应用	(224)
6.2	半导体集成电路温度传感器	(226)
6.2.1	AD590原理	(226)
6.2.2	AD590的特性	(227)
6.2.3	应用线路	(228)
6.3	石英温度计	(229)
6.3.1	石英温度计原理与特性	(229)
6.3.2	石英温度计的性能与应用	(230)
6.4	超声波温度计	(232)
6.4.1	利用超声波测量气体温度	(232)
6.4.2	固体超声波温度计	(233)
6.5	热噪声温度计	(235)

6.5.1	电阻式热噪声温度计	(235)
6.5.2	比较式热噪声温度计	(236)
6.6	核磁共振温度计 (NQR温度计)	(237)
6.6.1	NQR温度计原理及特性	(237)
6.6.2	NQR温度计的测温系统与使用	(238)
6.7	示温、感温材料与耐热记录器	(240)
6.7.1	示温涂料	(240)
6.7.2	液 晶	(243)
6.7.3	感温铁氧体	(245)
6.7.4	塞格测温熔锥	(246)
6.7.5	耐热数据记录器	(249)

7 测温技术应用

7.1	引 言	(250)
7.2	固体内部温度测量	(250)
7.2.1	接触法测量	(250)
7.2.2	非接触法测量	(251)
7.3	固体表面温度的测量	(252)
7.3.1	固体表面温度测量的特点	(252)
7.3.2	静止表面的温度测量	(252)
7.3.3	运动物体表面的温度测量	(255)
7.3.4	带电物体表面的温度测量	(258)
7.3.5	移动细丝的表面温度测量	(259)
7.3.6	摩擦表面温度的氮化测温技术	(260)
7.3.7	表面温度计检定装置	(260)
7.4	气流温度测量	(262)
7.4.1	高速气流的温度测量	(262)
7.4.2	高温气体的温度测量	(264)
7.5	液体温度测量	(267)
7.5.1	接触法测量液体温度	(267)
7.5.2	石油化工企业中液体温度测量	(268)
7.5.3	高温盐浴炉的温度测量	(269)
7.5.4	自行车盐浴钎焊炉温度测量	(271)
7.5.5	铝水及铝电解液连续测温	(272)
7.5.6	铜液连续测温	(273)
7.5.7	钢水温度测量(间断法)	(275)
7.5.8	钢水连续测温	(283)
7.5.9	铁水连续测温	(291)

7.5.10 高炉风口回旋区温度测量	(292)
7.6 铁液、钢水成分传感器	(294)
7.6.1 氧传感器的原理及其应用	(294)
7.6.2 钢水测温定氧	(299)
7.6.3 铜液连续测温定氧	(300)
7.6.4 钢水结晶定碳	(302)
7.6.5 铁液定硅	(304)
参考文献	(306)

附 录

附录1 标准化热电偶分度表	(307)
附录2 钨铼热电偶分度表	(314)
附录3 标准化热电阻分度表	(318)
附录4 辐射感温器分度表	(320)

1. 温度测量概述

温度是一个重要的物理量。它是国际单位制 (SI) 中 7 个基本物理量之一, 也是工业生产中主要的工艺参数。但是, 要准确地测量温度是很困难的, 无论采用准确度多么高的温度计, 如果温度计选择不当, 或者测试方法不适宜, 均不能得到满意结果。由此可以看出测温技术的重要性与复杂性。

1.1 温度与温标

1.1.1 温度

物体的冷热程度常用“温度”这个物理量来表示。从能量角度来看, 温度是描述系统不同自由度间能量分布状况的物理量, 从热平衡的观点来看, 温度是描述热平衡系统冷热程度的物理量, 它标志着系统内部分子无规则运动的剧烈程度, 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。

温度的高低, 也可由人的器官感觉出来, 但这很不可靠, 也不准确。例如, 我们在环境温度为 5°C 的室内坐久了会觉得很冷, 但是, 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, 用人的感觉来判断或测量温度是不科学的。但是温度计量又不能象长度计量那样, 简单地采用叠加的办法, 例如两壶 100°C 的开水倒在一起, 温度仍是 100°C , 绝不会是 200°C 。如此看来, 温度是一个特殊的物理量, 称之为“内涵量”。国际单位制中其他 6 个物理量称为“广延量”, 它们可以叠加。

为了判断温度的高低, 只能借助于某种物质的某种特性 (例如体积、长度和电阻等) 随温度变化的一定规律来测量, 自然就会有形形色色的温度计。但是, 迄今为止, 还没有适应整个温度范围用的温度计(或物质)。比较理想的物质及相应的物理性能有: 液体、气体的体积或压力, 金属(或合金)的电阻, 热电偶的热电动势和物体的热辐射等, 这些性能随温度变化都可作为温度测量的依据。

1.1.2 温标

为了保证温度量值的统一和准确, 应该建立一个用来衡量温度的标准尺度, 简称为温标。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。即温度计必须先进行分度, 或称标定。好比一把测量长度的尺子, 预先要在尺子上刻线后, 才能用来衡量长度。由于温度这个量比较特殊, 只能借助于某个物理量来间接表示, 因此温度的尺子不能象长度的尺子那样明显, 它是利用一些物质的“相平衡温度”作为固定点刻在“标尺”上, 而固定点中间的温度值则是利用一种函数关系来描述, 称为内插函数(或称内插方程)。通常把温度计、固定点和内插方程叫作温标的三要素, 或称为三个基本条件。

(1) 经验温标

借助于某一种物质的物理量与温度变化的关系，用实验方法或经验公式所确定的温标，称为经验温标。

例如，1714年德国人法伦海脱 (Fahrenheit) 以水银为测温介质，以水银的体积随温度的变化为依据，制成玻璃水银温度计。他规定水的沸腾温度为 212 度，氯化氨和冰的混合物为 0 度，这两个固定点中间等分为 212 份，每一份为 1 度记作 °F。这种标定温度的方法称为华氏温标。

1740年瑞典人摄氏 (Celsius) 把冰点定为 0 度，把水的沸点定为 100 度，用这两个固定点来分度玻璃水银温度计，将两个固定点之间的距离等分为 100 份，每一份为 1 度，记作 °C。这种标定温度的方法称为摄氏温标。

还有一些类似的经验温标，如兰氏、列氏等，都有各自相应的内容。为便于读者参考、使用，这里将各种温标的温度值间换算关系，列在表 1-1 中。

由上述可知，经验温标的缺点在于它的局限性和随意性。例如，若选用水银温度计作为温标规定的温度计，那么别的物质（例如酒精）就不能用了，而且使用温度范围也不能超过上下限（如 0 °C，100 °C），超过了就不能标定温度了。

表 1-1 温度换算系数表

温标单位	开尔文, K	摄氏度, °C	华氏度, °F	兰氏度, °R
K	1	$t - 273.15$	$\frac{9}{5}(t - 273.15) + 32$	$\frac{9}{5}t$
°C	$t + 273.15$	1	$\frac{9}{5}t + 32$	$\frac{9}{5}(t + 273.15)$
°F	$\frac{5}{9}(t - 32) + 273.15$	$\frac{5}{9}(t - 32)$	1	$t + 459.67$
°R	$\frac{5}{9}t$	$\frac{5}{9}t - 273.15$	$t - 459.67$	1

(2) 热力学温标

由于经验温标具有局限性和随意性两个缺点，不能适用于任意地区或任何场合，因而是科学的。只有“放之四海而皆准”、用普遍规律所确定的温标，才是最科学的。物理学家开尔文 (Kelvin) 提出，在可逆条件下，工作于两个热源之间的卡诺热机与两个热源之间交换热量之比等于两个热源热力学温度数值之比：

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}, \text{ 或 } T_1 = \frac{Q_1}{Q_2} \cdot T_2 \quad (1-1)$$

式中， Q_1 —— 卡诺热机从高温热源吸收的热量；

Q_2 —— 卡诺热机向低温热源放出的热量；

T_1 —— 高温热源的温度；

T_2 —— 低温热源的温度。

由式 (1-1) 看出温度 T 是热量 Q 的函数，而与工质无关。1848 年开尔文建议，利用卡诺定理及其推论，可以建立一个与工质无关的温标，即热力学温标，热力学温标所确定的温度数值称为热力学温度 (单位为 K)。

假设待测热源的热力学温度为 T ，一个标准热源的热力学温度已知为 273.16K (水三相点)，利用卡诺热机测温，令 $T_s = 273.16K$ ，则由式 (1-1) 有：

$$\frac{T}{T_s} = \frac{Q}{Q_s}, \text{ 或 } T = \frac{Q}{Q_s} \cdot T_s \quad (1-2)$$

式中， Q_s —— 卡诺热机向标准热源放出的热量。

如果能用卡诺热机测出比值 Q/Q_s ，则可由式 (1-2) 求得待测热源的热力学温度。式 (1-2) 可称为热力学温标的内插方程。

实际上，卡诺热机是不存在的，只好从与卡诺定理等效的理想气体状态方程入手，即根据玻意耳-马略特定律复现热力学温标：

$$PV = RT \quad (1-3)$$

式中， P ——一定质量气体的压强；

V ——气体的体积；

R ——普适常数；

T ——热力学温度。

由式 (1-3) 可知，当气体的体积恒定（定容）时，一定质量的气体（例如 n 摩尔气体），其温度与压强成正比，于是当选定水三相点的压强 P_s 为参考点时，

$$\frac{T}{T_s} = \frac{P}{P_s} = \text{恒量，或 } T = \frac{P}{P_s} \cdot T_s, \quad (1-4)$$

可以看出，式 (1-4) 与 (1-2) 是类似的，当用定容气体温度计测出压力比 P/P_s 时，即可求得相应的热力学温度 T 。式 (1-4) 称为理想气体的温标方程。由式 (1-4) 还可以看出，只要确定一个基准点（水三相点）温度，则整个温标就确定了。

由于实际气体与理想气体有些差异，所以当用气体温度计测量温度时，总要进行一些修正（如真实气体非理想性修正，容积膨胀效应修正）、毛细管等有害容积的修正和气体分子被器壁吸附的修正，等等。由此可见，气体温标的建立是相当繁杂的，而且使用很不方便。进而，气体温标一旦建立起来，再用气体温度计测量热力学温度，同样繁杂。

(3) 国际温标

为了实用方便，国际上经协商，决定建立一种既使用方便，又具有一定科学技术水平的温标，这就是国际温标的由来。

国际温标通常具备以下条件：

- ① 尽可能接近热力学温度；
- ② 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；
- ③ 用于复现温标的标准温度计，使用方便，性能稳定。

第一个国际温标是1927年第七届国际计量大会决定采用的温标，称为“1927年国际温标”，记为 ITS-27。此后大约每隔20年进行一次重大修改，相继有1948年国际温标 (ITS-48)、1968年国际实用温标 (IPTS-68) 和1990年国际温标 (ITS-90)。

国际温标做重大修改的原因，主要是由于温标的基本内容（即所谓温标“三要素”）发生变化，即温度计（或称内插仪器）、固定点和内插公式（方程）的改变。可以说，温标发展的历史，就是“三要素”发展的历史。目前各国使用的温标是1968年国际实用温标（即 IPTS-68）和为补充下限不足而临时采用的1976年0.5~30K范围的（国际）暂时温标（简称EPT-76）。但从1990年1月1日开始，各国将陆续采出1990年国际温标（简称ITS-90）。

ITS-90是1989年7月第77届国际计量委员会（CIPM）批准的国际温度咨询委员会（CCT）制定的新温标。我国将采取“有计划逐步过渡的方针”，积极稳妥地推行新温标。从1991年7月1日起，首先从各种标准温度计着手改值，并在国际电工委员会（IEC）修订的新分度表公布后，再进行工业测温仪表的改值，整个过程到1993年12月底全部完成。从1994

年1月1日起全面实行新温标。

1.2 1990年国际温标(ITS-90)简介

ITS-90的热力学温度仍记作 T ，为了区别于以前的温标，用“ T_{90} ”代表新温标的热力学温度，其单位仍是K。

与此并用的摄氏温度记为 t_{90} ，单位是“ $^{\circ}\text{C}$ ”。 T_{90} 与 t_{90} 的关系仍是

$$t_{90} = T_{90} - 273.15 \quad (1-5)$$

1990年国际温标，是以定义固定点温度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，各固定点间的温度是依据内插公式使标准仪器的示值与国际温标的温度值相联系。

1.2.1 定义固定点

ITS-90 的定义固定点共有17个，如表1-2所示。

从表1-2可看出以下特点：

- ① 固定点总数比 IPTS-68 增加了 4 个；
- ② 取消了氖(Ne)沸点、水沸点和氧(O_2)沸点；
- ③ 增加了 5 个新的固定点，它们是氖 (Ne)三相点、汞 (Hg)三相点、镓 (Ga)熔点、铝 (Al)凝固点和铜(Cu)凝固点；
- ④ 固定点的数值几乎全改了，而且变得更准确(到mK级)；
- ⑤ 低温方面的沸点全被取消了，代之以三相点或熔点，例如镓熔点；
- ⑥ 低温下限延伸了，按 ^3He 蒸汽压方程，下限定到 0.65K。

表 1-2 ITS-90 定义固定点

序号	温 T_{90}, K	度 $t_{90}, ^{\circ}\text{C}$	物质(a)	状态(b)	$W_r(T_{90})$
1	3 ~ 5	-270.15 ~-268.15	He	V	
2	13.803 3	-259.346 7	$e\text{-H}_2$	T	0.001 190 07
3	= 17	= -256.15	$e\text{-H}_2$ (或He)	V(或G)	
4	= 20.3	= -252.85	$e\text{-H}_2$ (或He)	V(或G)	
5	24.556 1	-248.593 9	Ne	T	0.008 449 74
6	54.358 4	-218.791 6	O_2	T	0.091 718 04
7	83.805 8	-189.344 2	Ar	T	0.215 859 75
8	234.315 6	-38.834 4	Hg	T	0.844 142 11
9	273.16	0.01	H_2O	T	1.000 000 00
10	302.914 6	29.764 6	Ga	M	1.118 138 89
11	429.748 5	156.598 5	In	F	1.609 801 85
12	505.078	231.928	Sn	F	1.892 797 68
13	992.677	419.527	Zn	F	2.568 917 30
14	933.473	660.323	Al	F	3.376 008 60
15	1 234.93	961.78	Ag	F	4.286 420 53
16	1 337.33	1 064.18	Au	F	
17	1 357.77	1 084.62	Cu	F	

(a) 除 ^3He 外，所有物质都是天然同位素成份。 $e\text{-H}_2$ 是正、仲分子平衡态氢。

(b) 符号代表的意义是：V—蒸汽压力点；T—三相点；G—气体温度计测定点；M, F—熔点、凝固点。

1.2.2 标准仪器

ITS-90的内插用标准仪器变化较大，特别是低温方面，数量多且复杂，由不同温度范围（或区间）而定。整个温标分4个温区，其相应标准仪器分别如下：

- ① 0.65~5.0K, ^3He 和 ^4He 蒸汽压温度计；
- ② 3.0~24.556 1K, ^3He 、 ^4He 定容气体温度计；
- ③ 13.803 3K~961.78°C, 铂电阻温度计；
- ④ 961.78°C以上, 光学或光电高温计。

可以看出，在低温部分将气体温度计正式定为标准仪器，虽然比较复杂，但目前还找不出一种比较“实用”的标准仪器。以前曾热门一时的铯铁电阻温度计没被采用。

另一方面，高温范围的铂铑10-铂热电偶作为温标的标准仪器已被取消，代之以铂电阻温度计（961.78°C以下）和光学高温计（961.78°C以上）。

1.2.3 内插公式

ITS-90各温度范围的内插公式分得比较细，而且可以跨范围或交迭使用。

(1) 0.65~5.0K范围

本范围的氦蒸汽压方程是

$$T_{90} = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \{(\ln P - B)/C\}^i \quad (1-6)$$

在上式中 A_0 、 A_i 、 B 和 C 都是常数，对于不同的区间，它们的数值略有差异，见表1-3。该范围又分成3个区间：

- ① 0.65~3.2K, 用 ^3He ；
- ② 1.25~2.176 8K, 用 ^4He ；
- ③ 2.176 8~5.0K, 用 ^4He 。

(2) 3.0~24.556 1K范围

在此范围内， T_{90} 是由一台 ^3He 或 ^4He 定容气体温度计定义的，经3个固定点分度：氖(Ne)三相点、平衡氢($e\text{-H}_2$)三相点和3.0~5.0K之间某一温度点（由 ^3He 或 ^4He 蒸汽压温度计确定）。这里又分两种情况：

- ① 从4.2~24.556 1K之间，用 ^4He 作测温气体， T_{90} 定义的关系式是

$$T_{90} = a + bP + cP^2 \quad (1-7)$$

在上式中 P 是气体温度计中的压力， a 、 b 和 c 是3个系数，其数值由前述3个温度点确定，但最后一个点是限在4.2~5.0K之间的某一温度。

- ② 在3.0~24.556 1K之间，可用 ^3He ，也可用 ^4He 作测温气体。但在4.2K以下使用时，必须考虑气体的非理想性修正，即要计算第二维里系数 $B_3(T_{90})$ 或 $B_4(T_{90})$ 。此时， T_{90} 的定义如下：

$$T_{90} = \frac{a + bP + cP^2}{1 + B_x(T_{90})N/V} \quad (1-8)$$

表 1-3 氦蒸汽压方程式常数

	^3He	^4He	^4He
	0.65~3.2K	1.25~2.176 8K	2.176 8~5.0K
A_0	1.053 447	1.392 408	3.146 631
A_1	0.980 106	0.527 153	1.357 655
A_2	0.676 380	0.166 756	0.413 923
A_3	0.372 692	0.050 988	0.091 159
A_4	0.151 656	0.026 514	0.016 349
A_5	-0.002 263	0.001 975	0.001 826
A_6	0.006 596	-0.017 976	-0.004 325
A_7	0.088 966	0.005 409	-0.004 973
A_8	-0.004 770	0.013 259	0
A_9	-0.054 943	0	0
B	7.3	5.6	10.3
C	4.3	2.9	1.9

在上式中 P 和 a, b, c 的意义同式(1-7), N 是给定气体的密度; V 是气体温度计温泡的容积; x 是相应的气体同位素; 第二维里系数的值由下面公式给出。

对于 ^3He 气体

$$B_3(T_{90}) = [16.69 - 336.98(T_{90})^{-1} + 91.04(T_{90})^{-2} - 13.82(T_{90})^{-3}] \times 10^{-6} \quad (1-9)$$

式中, $B_3(T_{90})$ 的单位是 $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

对于 ^4He 气体

$$B_4(T_{90}) = [16.708 - 374.05(T_{90})^{-1} - 383.53(T_{90})^{-2} + 1799.2(T_{90})^{-3} - 4033.2(T_{90})^{-4} + 3252.8(T_{90})^{-5}] \times 10^{-6} \quad (1-10)$$

式中, $B_4(T_{90})$ 的单位是 $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

(3) 13.803 3~1 234.99K范围

此范围内插公式全部用铂电阻温度计电阻比(W)表示的参考函数(或偏差函数), 但有以下几点需要说明:

① 电阻比中不再用冰点电阻 $R_{273.15\text{K}}$ (有的写成 R_0), 而是直接用水三相点电阻 $R_{273.16\text{K}}$, 即:

$$W(T_{90}) = R(T_{90})/R_{273.16\text{K}} \quad (1-11)$$

② 由于新温标取消了水沸点, 铂电阻温度计的纯度表达形式不再是 $W(100^\circ\text{C}) = R_{100}/R_0$, 而是下列二者之一:

$$W(-38.834 4^\circ\text{C}) \leq 0.844 235 \quad (1-12)$$

$$W(29.764 6^\circ\text{C}) \geq 1.118 07 \quad (1-13)$$

③ 对于用到 961.78°C 的铂电阻温度计, 还应满足

$$W(961.78^\circ\text{C}) \geq 4.284 4 \quad (1-14)$$

在此范围内, 参考函数比 IPTS-68(75) 发生较大变化, ITS-90 参考函数 $W_r(T_{90})$ 的定义是:

④ 对于13.803 3~273.16K范围

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \{[\ln(T_{90}/273.16) + 1.5]/1.5\}^i \quad (1-15a)$$

此式的反函数(等效精度在0.1mK之内)是

$$T_{90}/273.16 = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{\frac{1}{6}} - 0.65}{0.35} \right]^i \quad (1-15b)$$

两式中的常数 A_0, B_0, A_i 和 B_i 的数值列于表1-4。

⑤ 对于0~961.78 $^\circ\text{C}$ 范围

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^6 C_i \left[\frac{T_{90} - 754.15}{481} \right]^i \quad (1-16a)$$

此式的反函数(等效精度在0.13mK之内)是

$$T_{90} - 273.15 = D_0 + \sum_{i=1}^6 D_i \left[\frac{W_r(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right]^i \quad (1-16b)$$

两式中的常数 C_0 , D_0 , C_i 和 D_i 的数值见表1-4。

③ 在234.315 6K(-38.834 4°C)~29.764 6°C范围

温度计的分度是在这两个端点上和水三相上进行,两个参考函数((1-15)式和(1-16)式)都要使用。

上述各温度范围定义的固定点和偏差函数列于表1-4。

表 1-4 各参考函数的常数值

A_0	-2.135 347 22	B_{12}	-0.029 201 193	C_8	-0.000 461 22
A_1	3.183 247 20	B_0	0.183 324 722	C_9	0.000 457 24
A_2	-1.301 435 97	B_1	0.240 975 303	D_0	439.932 854
A_3	0.717 272 04	B_2	0.209 108 771	D_1	472.418 020
A_4	0.503 440 27	B_3	0.190 439 972	D_2	37.684 494
A_5	-0.618 993 95	B_4	0.142 648 498	D_3	7.472 018
A_6	-0.053 323 22	B_5	0.077 993 465	D_4	2.920 828
A_7	0.280 213 62	B_6	0.012 475 611	D_5	0.005 184
A_8	0.107 152 24	B_7	-0.032 267 127	D_6	-0.963 864
A_9	-0.293 023 65	B_8	-0.075 291 522	D_7	-0.188 732
A_{10}	0.044 598 72	B_9	-0.056 470 670	D_8	0.191 203
A_{11}	0.118 686 32	B_{10}	0.076 201 285	D_9	0.049 025
A_{12}	-0.052 481 34	B_{11}	0.123 893 204		

④ 有关低温领域的偏差函数

整个低温范围主要是指平衡氢($e\text{-H}_2$)三相点到水三相点的范围。一支温度计的分度要在下述一系列固定点上进行。

6个三相点:平衡氢、氦、氧、氩、汞和水的三相点。

两个靠近 $e\text{-H}_2$ 的17.0K和20.3K的点。这两个点的确定,可用前述气体温度计在16.9~17.1K和20.2~20.4K之间测得,也可用 $e\text{-H}_2$ 的蒸汽压-温度之间的关系式在17.025~17.045K和20.26~20.28K之间确定。两个关系式分别是

$$T_{90} - 17.035 = (P - 33.3213) / 13.32 \quad (1-17a)$$

$$T_{90} - 20.27 = (P - 101.292) / 30 \quad (1-17b)$$

上面两式中 P 的单位都是kPa。

在低温范围,铂电阻温度计的偏差函数是

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^6 C_i [\ln W(T_{90})]^{i+n} \quad (1-18)$$

式中, $W(T_{90})$ 为被分度的铂电阻温度计在 T_{90} 时的电阻比,系数 a , b 和 c_i 是在一系列固定点上确定的($n=2$)。

将13.803 3~273.16K范围再分成几个小范围(温区),各温区的偏差函数都一样,只是系数与固定点数各异,它们是:

① 24.556 1~273.16K区间

铂电阻温度计是在 $e\text{-H}_2$, Ne, O_2 , Ar, Hg和 H_2O 三相点上分度,偏差函数式(1-18)中的系数 a , b , c_1 , c_2 和 c_3 都从这些点上获得,此时 $c_4 = c_5 = n = 0$;

② 54.358 4~273.16K区间

温度计在 O_2 , Ar, Hg和 H_2O 三相点上分度,从而确定式(1-18)偏差函数中的系数 a , b

和 c_1 , 这里 $c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 0$, $n = 1$;

③ 83.8058~273.16K 区间

在此区间, 偏差函数的形式是

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1] \cdot \ln W(T_{90}) \quad (1-19)$$

温度计是在Ar, Hg和H₂O三相点上分度, 并由此确定系数 a 和 b 。

(4) 0~961.78°C 范围

在这个范围, 偏差函数的形式是

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660.323^\circ\text{C})]^2 \quad (1-20)$$

这时, 温度计的分度要在水三相点、锡凝固点、锌凝固点、铝凝固点和银凝固点上分度, 以确定 a , b , c 和 d 的数值。

该范围又分成5个区间:

- ① 0~660.323°C;
- ② 0~419.527°C;
- ③ 0~231.928°C;
- ④ 0~156.5985°C;
- ⑤ 0~29.7646°C。

在这些区间内偏差函数仍如(1-20)式和(1-16)所示, 只是确定 a , b , c 和 d 的固定点视不同温区有所增减, 见表1-5。

表 1-5 为确定铂电阻温度计偏差函数的分度点

温度范围	偏差函数	分度点(见表1-2)
273.16~13.8033K	$a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^n c_i [\ln W(T_{90})]^{i+n}, n = 2$	2~9
273.16~24.5561K	上式中 $c_4 = c_5 = n = 0$	2, 5~9
273.16~54.3584K	上式中 $c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 0, n = 1$	6~9
273.16~83.8058K	$a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90})$	7~9
0~961.78°C	$a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660.323^\circ\text{C})]^2$	9, 12~15
0~660.323°C	上式中 $d = 0$	9, 12~14
0~419.527°C	上式中 $c = d = 0$	9, 12, 13
0~231.928°C	上式中 $c = d = 0$	9, 11, 12
0~156.5985°C	上式中 $b = c = d = 0$	9, 11
0~29.7646°C	上式中 $b = c = d = 0$	9, 10
-38.8344~29.7646°C	$a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2$	8~10

(5) -38.8344~29.7646°C 范围

在此范围内, 偏差函数仍是式(1-20)和式(1-16), 温度计是在Hg三相点、水三相点和Ga熔点上分度, 以确定 a 和 b 的数值, 这时 $c = d = 0$ 。

注意, 这时参考函数 $W_r(T_{90})$ 的数值, 在273.16K的上、下应分别取自式(1-15)和式(1-16)。

(6) 银凝固点以上的温度范围