

工业过程检测技术

王魁汉 杨泽宽 于大安 许大才

编 著

中国仪器仪表学会过程检测控制仪表学会

2000

415
2
1

工业过程检测技术

王魁汉 杨泽宽 于大安 许大才
编 著

中国仪器仪表学会过程检测控制仪表学会

一九九二年六月

内 容 简 介

本书系统地阐述了温度、压力、流量、物位、机械量、成分量及传热量等参数的检测原理、传感器及仪表的选择与使用，并专门探讨了工业过程检测技术的基本原理与测量方法。本书内容丰富，注重实用，紧密联系生产实际，注意反映国内外有关测量仪表及检测技术方面的新发展、新动向，同时还汇入了作者多年来取得的科研成果以及教学、现场测试的实践经验。

本书概念清晰、论述严谨，兼有教材及工具书的特点。适用于冶金、机械、石油、化工等相关专业的本科生、电大、函大学生使用。还可供从事热工计量及测试的工程技术人员阅读，也可作为高校及中专教师的参考书。

本书第1~7章由王魁汉编著；第8、9、10、13、14章由杨泽宽编著；第11章由于大安编著；第12章由许大才编著。

工业过程检测技术

王魁汉 杨泽宽 于大安 许大才 编著

中国仪器仪表学会过程检测控制仪表学会

一九九二年六月

目 次

1	温度测量概述	
1.1	温度与温标	(1)
1.1.1	温度与温标	(1)
1.1.2	1990年国际温标(ITS-90)	
	简介	(4)
1.2	温度测量基础	(9)
1.2.1	温度测量基本原理	(9)
1.2.2	温度计选择与量值传递	(9)
2	膨胀式温度计	
2.1	玻璃液体温度计	(13)
2.1.1	原理与结构	(13)
2.1.2	使用注意事项及测量误差	(16)
2.2	压力式温度计	(17)
2.2.1	原理与结构	(17)
2.2.2	使用注意事项及测量误差	(19)
2.3	双金属温度计	(19)
2.3.1	原理与结构	(19)
2.3.2	使用注意事项及测量误差	(21)
3	电阻温度计(热电阻)	
3.1	热电阻特性及其原理	(22)
3.1.1	特性	(22)
3.1.2	原理	(22)
3.2	热电阻结构及基本参数	(24)
3.2.1	热电阻的结构	(24)
3.2.2	热电阻的基本参数	(27)
3.3	热电阻分类及其性能	(29)
3.3.1	标准铂电阻温度计	(29)
3.3.2	工业热电阻	(31)
3.3.3	铠装热电阻	(33)
3.3.4	薄膜热电阻	(34)
3.3.5	厚膜热电阻	(34)
3.3.6	热电阻选用要点	(36)
3.4	热敏电阻	(37)
3.4.1	热敏电阻材料及特性	(37)
3.4.2	热敏电阻结构与使用	(41)
2.5	测量线路	(45)
3.5.1	电阻法(电桥法)	(46)
3.5.2	电位法(电位差计法)	(48)
3.6	热电阻的使用及测量误差	(49)
3.6.1	灵敏度与自热效应	(49)
3.6.2	电阻与绝缘电阻	(50)
3.6.3	动态特性与安装方法	(51)
3.6.4	热电阻劣化与使用寿命	(53)
4	热电温度计(热电偶)	
4.1	热电偶特性与原理	(55)
4.1.1	热电偶的特性	(55)
4.1.2	原理	(55)
4.1.3	基本定则	(58)
4.2	热电偶分类及其特性	(62)
4.2.1	贵金属与贱金属热电偶	(63)
4.2.2	标准化与非标准化热电偶	(63)
4.3	热电偶结构与分类	(80)
4.3.1	绝缘物与保护管	(80)
4.3.2	普通工业用热电偶	(92)
4.3.3	特种热电偶	(97)
4.4	测量线路	(99)
4.4.1	补偿导线	(99)
4.4.2	参比端	(104)
4.4.3	测量线路	(107)
4.5	热电偶使用及测量误差	(113)
4.5.1	热电偶焊接、清洗与退火	(113)
4.5.2	热电偶劣化及其对策	(115)
4.5.3	使用注意事项及测量误差	(119)
5	辐射温度计	
5.1	辐射测温原理	(125)
5.1.1	热辐射与发射率	(125)
5.1.2	黑体辐射定律	(127)
5.2	光谱辐射温度计	(130)

5.2.1	光学高温计	(130)
5.2.2	光电高温计	(136)
5.3	辐射温度计	(138)
5.3.1	原理与结构	(133)
5.3.2	使用及测量误差	(141)
5.4	比色温度计	(144)
5.4.1	原理与结构	(145)
5.4.2	使用及测量误差	(147)
5.4.3	辐射温度计选择	(148)
5.5	部分辐射温度计	(151)
5.5.1	部分辐射温度计原理与 分类	(151)
5.5.2	红外温度计	(151)
5.5.3	使用及测量误差	(155)
5.5.4	红外热象仪	(158)

6 新型温度计(传感器)

6.1	光纤温度计(传感器)	(161)
6.1.1	光纤温度计原理与特性	(161)
6.1.2	光纤测温技术应用	(172)
6.2	半导体集成电路温度传感器	(174)
6.2.1	AD590 原理与特性	(174)
6.2.2	应用线路	(177)
6.3	石英温度计	(178)
6.3.1	原理与特性	(178)
6.3.2	性能与应用	(179)

7 测温技术应用

7.1	固体内部温度测量	(182)
7.1.1	接触法测量	(182)
7.1.2	非接触法测量	(183)
7.2	固体表面温度测量	(184)
7.2.1	静止表面的温度测量	(184)
7.2.2	运动物体表面温度测量	(187)
7.2.3	表面温度计检定装置	(190)
7.3	气流温度测量	(192)
7.3.1	高速气流温度测量	(192)
7.3.2	高温气体温度测量	(194)
7.4	液体温度测量	(197)

7.4.1	液体温度测量	(197)
7.4.2	高温盐浴炉温度测量	(198)
7.4.3	铝水及铝电解液连续测温	(201)
7.4.4	铜液连续测温	(202)
7.4.5	钢水温度测量	(204)
7.4.6	铁水及高炉风口回旋区温度 测量	(216)

8 压力测量

8.1	引言	(219)
8.1.1	压力的基本概念及单位	(219)
8.1.2	大气压、绝对压力、表压及真 空度	(221)
8.2	液柱式压力计	(222)
8.2.1	U形管压力计	(222)
8.2.2	单管压力计	(223)
8.2.3	斜管压力计	(224)
8.2.4	补偿式微压计	(224)
8.3	弹性式压力计	(225)
8.3.1	弹簧管式压力计	(226)
8.3.2	波纹管式压力计	(229)
8.3.3	膜盒式微压计	(229)
8.4	压力传感器	(230)
8.4.1	电位器式压力传感器	(231)
8.4.2	应变式压力传感器	(231)
8.4.3	霍尔式压力传感器	(233)
8.4.4	电感式压力传感器	(234)
8.4.5	电容式压力传感器	(235)
8.5	负荷式压力计	(236)
8.5.1	活塞式压力计	(236)
8.5.2	浮球式压力计	(238)
8.5.3	钟罩式微压计	(239)
8.6	压力计的选择和使用	(239)
8.6.1	压力计的选择	(239)
8.6.2	压力计的使用	(240)

9 流量测量

9.1	引言	(243)
9.2	差压式流量计	(243)

9.2.1 动压测定管	(243)
9.2.2 节流变压降流量计	(255)
9.2.3 恒压变截面流量计	(258)
9.3 速度式流量计	(261)
9.3.1 涡轮流量计	(261)
9.3.2 电磁流量计	(264)
9.3.3 超声波流量计	(266)
9.3.4 激光流速计	(267)
9.3.5 热线风速仪	(269)
9.4 容积式流量计	(270)
9.4.1 椭圆齿轮流量计	(271)
9.4.2 旋转活塞式流量计	(272)
9.5 质量式流量计	(274)
9.5.1 直读式质量流量计	(274)
9.5.2 推导式质量流量计	(275)
9.5.3 温度、压力补偿式质量流量计	(276)
9.6 流量测量仪表的选用	(277)

10 节流装置

10.1 引言	(282)
10.2 标准节流装置	(283)
10.2.1 测量和计算方法的原理	(283)
10.2.2 孔板	(284)
10.2.3 喷嘴	(288)
10.2.4 文丘里管	(291)
10.2.5 流量测量的不确定度	(296)
10.3 非标准节流装置	(296)
10.3.1 四分之一圆喷嘴	(297)
10.3.2 锥形入口孔板	(298)
10.3.3 偏心孔板和圆缺孔板	(299)
10.3.4 道尔管	(300)
10.4 节流装置流量计用的差压计	(301)
10.4.1 概况	(301)
10.4.2 双波纹管差压计	(303)
10.4.3 力平衡式差压(或流量)变送器	(304)
10.5 节流装置的正确选择和使用	(305)
10.5.1 节流装置的选择	(305)

10.5.2 节流装置的使用	(306)
----------------	-------

11 物位测量

11.1 浮力式液位计	(311)
11.1.1 浮子式液位计	(311)
11.1.2 浮筒式液位计	(313)
11.2 差压式液位计	(314)
11.2.1 压力式液位计	(314)
11.2.2 差压式液位计	(315)
11.3 电学式物位计	(316)
11.3.1 电阻式物位计	(316)
11.3.2 电容式物位计	(316)
11.3.3 电感式液位计	(320)
11.4 微波式物位计	(320)
11.4.1 定点式微波物位计	(321)
11.4.2 反射式微波物位计	(321)
11.4.3 调频连续波式微波物位计	(322)
11.5 核辐射式物位计	(324)
11.5.1 工作原理	(324)
11.5.2 核辐射式物位计的测试方案	(327)
11.5.3 辐射源及其防护	(328)
11.6 超声波物位计	(330)
11.6.1 测量原理和测量方案	(330)
11.6.2 频率和换能器的选择	(332)
11.6.3 提高物位计性能的若干措施	(333)
11.6.4 超声物位测量技术	(337)
11.7 称重式物位计	(339)
11.7.1 称重式物位计的组成	(339)
11.7.2 称重传感器	(339)
11.7.3 称重式物位计的机械结构	(341)
11.7.4 显示仪表	(343)

12 机械量测量

12.1 概述	(345)
12.1.1 机械量检测仪表的构成	(345)
12.1.2 机械量检测仪表的分类	(345)
12.2 力和重量检测仪表	(347)
12.2.1 电阻应变式称重仪表	(347)

12.2.2	磁弹性式力检测仪表	(354)
12.2.3	物料的连续计量与电子皮带秤	(359)
12.3	扭矩和转矩检测仪表	(362)
12.3.1	电阻应变式转矩检测仪表	(362)
12.3.2	磁弹性式转矩检测仪表	(365)
12.3.3	振强式转矩检测仪表	(368)
12.3.4	相位差式转矩检测仪表	(371)
12.4	位移检测仪表	(374)
12.4.1	电阻式位移检测仪表	(374)
12.4.2	电感式位移检测仪表	(376)
12.4.3	涡流式位移检测仪表	(382)
12.4.4	光电式位移检测仪表	(385)
12.5	速度检测仪表	(386)
12.5.1	离心式转速表	(387)
12.5.2	磁性转速表	(388)
12.5.3	转速传感器	(388)
12.5.4	相关速度计	(391)

13 成分分析

13.1	引言	(395)
13.2	取样和试样预处理	(396)
13.2.1	取样地点	(396)
13.2.2	样品成分的保持	(397)
13.2.3	取样管及储气器	(397)
13.2.4	自动取样和试样预处理系统	(397)
13.3	人工分析器	(399)
13.3.1	工作原理、结构、操作	(399)
13.3.2	注意事项	(400)
13.3.3	人工分析器中溶液的配制	(401)
13.4	氧含量分析器	(401)
13.4.1	磁式氧分析器	(401)
13.4.2	氧化锆式氧量分析器	(404)
13.5	红外线气体分析器	(407)
13.5.1	工作原理	(407)
13.5.2	结构原理	(407)
13.6	气根色谱仪	(409)
13.6.1	工作原理	(409)

13.6.2	仪器的基本组成及有关问题	(410)
13.6.3	定性和定量分析	(414)
13.6.4	特点和选型	(415)
13.6.5	近年来国外色谱仪发展的动向	(415)
13.7	湿度的测量	(416)
13.7.1	概况	(416)
13.7.2	光电露点湿度计	(417)
13.7.3	氯化锂露点仪	(418)
13.8	数据处理装置	(419)
13.8.1	概况	(419)
13.8.2	基本功能	(421)
13.8.3	色谱用数据处理装置	(421)
13.8.4	数据处理装置的发展	(423)

14 传热量测量

14.1	引言	(424)
14.2	热流的测量	(424)
14.2.1	导热式热流计	(424)
14.2.2	空心槽球式辐射热流计	(427)
14.2.3	量热式热流计	(429)
14.2.4	潜热式热流计	(429)
14.2.5	(法国)国家宇航研究局的热流计	(430)
14.2.6	热容式热流计	(433)
14.2.7	热流计的校验、选择与影响精度的因素	(434)
14.2.8	热流计的应用	(435)
14.3	导热系数的测量	(438)
14.3.1	双平板法	(438)
14.3.2	稳定平板法	(439)
14.3.3	由测得的导温系数计算导热系数	(440)
14.4	物体表面发射率的测量	(441)
14.4.1	在线测量法	(441)
14.4.2	稳态卡计法	(443)
14.5	火焰辐射的测量	(444)
14.5.1	整个厚度火焰全辐射黑度的	

测量(445)
 14.5.2 局部辐射的测量(446)

15 现场热工测试

15.1 引言(449)
 15.2 炉窑热平衡测算方法(450)
 15.2.1 燃料燃烧化学热(或电能)
(450)
 15.2.2 收入项中各项物理热(451)
 15.2.3 化学反应放热(452)
 15.2.4 物料带出热(453)
 15.2.5 烟气带走物理热(453)
 15.2.6 燃料不完全燃烧热损失(454)
 15.2.7 炉体蓄散热损失(454)
 15.2.8 水冷却和汽化冷却热损失(455)
 15.2.9 炉门或孔洞辐射热损失(456)
 15.2.10 逸气热损失(457)
 15.2.11 化学反应吸热(458)
 15.2.12 氧化物带走物理热(458)
 15.2.13 其它热支出(459)
 15.3 炉窑热效率和燃料消耗量测算
 方法(459)
 15.3.1 炉窑热效率(459)
 15.3.2 燃料消耗率(459)
 15.4 空气消耗系数的测算方法(461)

15.4.1 利用测定燃料量和空气量确定
 空气消耗系数(463)
 15.4.2 利用测定烟气成分计算空气
 消耗系数(463)
 15.4.3 利用经验公式计算空气消耗
 系数(464)
 15.5 温热制度测算方法(465)
 15.5.1 温度制度测算方法(465)
 15.5.2 供热制度测算方法(468)
 15.6 压力制度测定方法(469)
 15.7 现场测试与结果分析实例(469)
 15.7.1 连续加热炉热平衡测算结果和
 分析(469)
 15.7.2 冲天炉热平衡测算结果和分析
(471)
 15.7.3 连续加热炉温度制度测算结果
 和分析(472)
 15.7.4 连续加热炉压力制度测算结果
 和分析(474)
 15.8 数据整理(476)
 15.8.1 一元线性回归(476)
 15.8.2 一元非线性回归(481)

参考文献(485)

附 录

附录 1 标准化热电偶分度表

附表 1 铂铑30-铂铑6 热电偶分度
 表(B型)(488)
 附表 2 铂铑10-铂热电偶分度表
 (S型)(489)
 附录 3 铂铑13-铂热电偶分度表
 (R型)(490)
 附录 4 镍铬-镍硅热电偶分度表
 (K型)(491)
 附录 5 镍铬-康铜热电偶分度表

(E型)(492)

附录 6 铁-康铜热电偶分度表
 (J型)(492)

附录 7 铜-康铜热电偶分度表
 (T型)(493)

附录 8 镍铬硅-镍硅热电偶分
 度表(N型)(494)

附录 2 钨铼热电偶分度表

附表 9 钨铼5-钨铼20 热电偶分度
 表(495)

附表10 铊铱3-铊铱25热电偶分度表(496)

附表11 铊铱5-铊铱26热电偶分度表(497)

附表12 铊-铊铱26热电偶分度表(498)

附录3 标准化热电阻分度表

附表13 Pt10铂热电阻分度表(499)

附表14 Pt100铂热电阻分度表(499)

附表15 Cu100铜热电阻分度表(500)

附表16 Cu50铜热电阻分度表(500)

附录4 辐射感温器分度表

附表17 辐射感温器分度表(F1)(501)

附表18 辐射感温器分度表(F2)(501)

附录5 流出系数和可膨胀性(膨胀)系数

附表19 具有角接取压口的孔板; 流出系数C(502)

附表20 具有D和D/2取压口的孔板; 流出系数C(503)

附表21 具有法兰取压口的孔板; 流出系数C(D=50)(504)

附表22 具有法兰取压口的孔板; 流出系数C(D=75)(505)

附表23 具有法兰取压口的孔板; 流出系数C(D=100)(506)

附表24 具有法兰取压口的孔板; 流出系数C(D=150)(507)

附表25 具有法兰取压口的孔板; 流出系数C(D=200)(508)

附表26 具有法兰取压口的孔板; 流出系数C(D=250)(509)

附表27 具有法兰取压口的孔板; 流出系数C(D=375)(510)

附表28 具有法兰取压口的孔板; 流出系数C(D=760)(511)

附表29 具有法兰取压口的孔板; 流出系数C(D=1000)(512)

附表30 ISA 1932喷嘴; 流出系数C(513)

附表31 长颈喷嘴; 流出系数C(514)

附表32 孔板; 可膨胀性(膨胀)系数(515)

附表33 喷嘴、文丘里管和文丘里喷嘴; 可膨胀性(膨胀)系数 ϵ (515)

附表34 文丘里喷嘴; 流出系数C(516)

附录6 管壁粗糙度的K值(517)

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,无论采用精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 温度与温标

(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,温度是描述系统内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 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。

(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。

1745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。各种温标的温度值间换算关系如表 1-1 所示。

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，因而是非科学的。只有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 ——高温热源的温标；

T_2 ——低温热源的温标。

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的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为 P_s 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，各国均能以很高的精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，各国将陆续采用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。

1.1.2 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) 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, 而且变得更精确(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 IST-90 定义固定点

序 号	温 度		物质(a)	状态(b)	W.(T_{90})
	$T_{90}(\text{K})$	$t_{90}(^{\circ}\text{C})$			
1	3~5	-270.15 ~-268.15	He	V	
2	13.8033	-259.3467	$e\text{-H}_2$	T	0.00119007
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	24.5561	-248.5939	Ne	T	0.00844974
6	54.3584	-218.7916	O_2	T	0.09171804
7	83.8058	-189.3442	Ar	T	0.21585975
8	234.3156	-38.8344	Hg	T	0.84414211
9	273.16	0.01	H_2O	T	1.00000000
10	302.9146	29.7646	Ga	M	1.11813889
11	429.7485	156.5985	In	F	1.60980185
12	505.078	231.928	Sn	F	1.89279768
13	992.677	419.527	Zn	F	2.56891730
14	933.473	660.323	Al	F	3.37600860
15	1234.93	961.78	Ag	F	4.28642053
16	1337.33	1064.18	Au	F	
17	1357.77	1084.62	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—熔点; F—凝固点。

(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 3.0~24.5561K, ³He、⁴He 定容气体温度计;
- ③ 13.8033K~961.78℃, 铂电阻温度计;
- ④ 961.78℃ 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。

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℃)以下)和光学高温计(961.78℃(以上))。

(8) 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 1.25~2.1768K, 用 ⁴He;
- ③ 2.1768~5.0K, 用 ⁴He。

2) 3.0~24.5561K 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 -H₂)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 4.2~24.5561K 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 、 c 和 b 3 是个数, 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 3.0~24.5561K 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 $B_2(T_{90})$ 或 $B_4(T_{90})$ 。此时, T_{90} 的定义如下:

$$T_{90} = \frac{a + bP + cP^2}{1 + B_2(T_{90})N/V} \quad (1-8)$$

表 1-3 氦蒸汽压方程式常数

	³ He	⁴ He	⁴ He
	0.65~3.2K	1.25~2.1768K	2.1768~5.0K
A_0	1.053447	1.392408	3.146631
A_1	0.980108	0.527153	1.357655
A_2	0.676380	0.166756	0.413923
A_3	0.372692	0.050988	0.091159
A_4	0.151656	0.026514	0.016349
A_5	-0.002263	0.001975	0.001826
A_6	0.006596	-0.017976	-0.004325
A_7	0.088966	0.005409	-0.004973
A_8	-0.004770	0.013259	0
A_9	-0.054943	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) 13.8033~1234.99K 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:

$$W(-38.8344^\circ\text{C}) \leq 0.844235 \quad (1-12)$$

$$W(29.7646^\circ\text{C}) \geq 1.11807 \quad (1-13)$$

③ 对于用到 961.78°C 的铂电阻温度计, 还应满足

$$W(961.78^\circ\text{C}) \geq 4.2844 \quad (1-14)$$

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 13.8033~273.16K 范围

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

此式的反函数(等效精确度在 0.1mK 之内)是

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

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

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{T_{90} - 754.15}{481} \right]^i \quad (1-16a)$$

此式的反函数(等效精确度在 .13mK 之内)是

$$T_{90} - 273.15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[\frac{W_r(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right]^i \quad (1-16b)$$

两式中的常数 C_0, D_0, C_i 和 D_i 的数值见表 1-4。

(c) 在 234.3156K (-38.8344℃) ~ 29.7646℃ 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	-2.13534729			B_{12}	-0.029201193	C_8	-0.00046122
A_1	3.18324720	B_0	0.183324722	B_{13}	-0.091173542	C_9	0.00045724
A_2	-1.80143597	B_1	0.240975303	B_{14}	0.001317696		
A_3	0.71727204	B_2	0.209108771	B_{15}	0.026025526	D_0	439.932854
A_4	0.50344027	B_3	0.190439972			D_1	472.418020
A_5	-0.61899395	B_4	0.142648498	C_0	2.78157254	D_2	37.684494
A_6	-0.05332322	B_5	0.077993465	C_1	1.64650916	D_3	7.472018
A_7	0.28021362	B_6	0.012475611	C_2	-0.13714390	D_4	2.920828
A_8	0.10715224	B_7	-0.032267127	C_3	-0.00649767	D_5	0.005184
A_9	-0.29302865	B_8	-0.075291522	C_4	-0.00234444	D_6	-0.963864
A_{10}	0.04459872	B_9	-0.056470670	f_6	0.00511868	D_7	-0.188732
A_{11}	0.11868632	B_{10}	0.076201285	C_5	0.00187982	D_8	0.191203
A_{12}	-0.05248134	B_{11}	0.123893204	C_7	-0.00204472	D_9	0.049025

(d) 有关低温领域的偏差函数

整个低温范围主要是指平衡氢($e-H_2$)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 $e-H_2$ 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 $e-H_2$ 的蒸汽压—温度之间的关系式在 17.025 ~ 17.04K 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

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln W(T_{90})]^{i+2} \quad (1-18)$$

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 13.8033 ~ 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 24.5561~273.16K 区间

铂电阻温度计是在 e-H₂, Ne, O₂, Ar, Hg 和 H₂O 三相点上分度, 偏差函数式(1-18)中的系数 a, b, c₁, c₂ 和 c₃ 都从这些点上获得, 此时 c₄ = c₅ = n = 0;

② 54.3584~273.16K 区间

温度计在 O₂, Ar, Hg 和 H₂O 三相点上分度, 从而确定式(1-18)偏差函数中的系数 a, b 和 c₁, 这里 c₂ = c₃ = c₄ = c₅ = 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℃ 范围

在这个范围, 偏差函数的形式是

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

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℃;

② 0~419.527℃;

③ 0~231.928℃;

④ 0~156.5985℃;

⑤ 0~29.7646℃。

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	$a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln W(T_{90})]^{i+n}, n=2$	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℃	$a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660.323^\circ\text{C})]^2$	9, 12~15
0~660.323℃	上式中 $d = 0$	9, 12~14
0~419.527℃	上式中 $c = d = 0$	9, 12, 13
0~231.928℃	上式中 $c = d = 0$	9, 11, 12
0~156.5985℃	上式中 $b = c = d = 0$	9, 11
0~29.7646℃	上式中 $b = c = d = 0$	9, 10
-38.8344~29.7646℃	$a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2$	8~10