

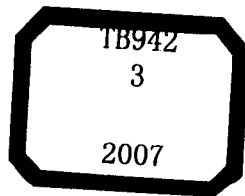
温度测量实用技术

WENDU CELIANG SHIYONG JISHU

王魁汉 等编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



温度测量实用技术

王魁汉 等编著



机械工业出版社

本书从温度测量实际出发,全面系统地介绍了温度测量实用技术。全书内容包括:1990年国际温标,各种温度计的工作原理、特性、选择与应用;温度传感器的防腐、耐磨、防爆、防爆技术,温度量值传递(溯源)、测温系统的校准与标准化;固体表面、高温气体、熔体、核电、食品、粮食、垃圾焚烧等特种及实用测量技术与应用,以及现场测温的典型故障分析与对策等。书中还收录了最新国际标准,美、英、德、日等国家标准与技术数据。

本书在内容上紧密联系实际,反映了国内外有关测温学的新理论、新发展、新动向,并凝集了作者30多年的教学、科研成果及现场测温实践经验。本书深入浅出,注重实用,力求提高读者解决实际问题的能力,具有很强的实用性,并兼有教材与工具书的特点,是一本难以寻求的实用测温技术大全。

本书可供冶金、石化、机械、电力等行业从事热工计量测试的工程技术人员、工人参考,也可供相关专业在校师生、研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

温度测量实用技术/王魁汉等编著. —北京:机械工业出版社, 2006.12

ISBN 7-111-20219-8

I. 温... II. 王... III. 温度测量 IV. TB942

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第126541号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:陈保华 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣

封面设计:王伟光 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷

2007年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·19印张·849千字

0 001—3 500册

定价:52.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

序

随着科学和经济的发展，测温学与测温技术在我国有了长足进展，并反过来推动了科学和生产技术的进步。多年来，国内出版的有关温度测量的著作已有多本，对我国测温技术的发展起了很好的推动作用。这些著作各有特点，有些侧重于温度计量学，有些侧重于温度测量仪表。至于侧重于测温应用技术的书，却很少见到。从事测温工作的人，常以此为憾。现在，王魁汉教授的这本新作可以较好地满足读者的要求了。

王魁汉教授长期从事温度测量技术的研究和教学。多年来，他把研究的重点放在工程中温度测量的应用技术上，放在解决工程中出现的测温问题上，在国内众多从事测温工作的同仁中，是很突出的。15年前，他在编著《温度测量技术》一书时，就作过重点向“测温应用技术”倾斜的尝试。该书出版后，得到了读者，尤其是在生产第一线从事测温工作的读者的高度赞许和热烈欢迎。这本新作更是突出了“应用技术”的主线。在温度测量仪表的各章中，都加入了不少与实际应用有关的内容。“测温防爆技术”和“温度传感器耐高温与防腐蚀技术”两章，介绍了在有爆炸危险场所和高温腐蚀性等恶劣环境中使用的仪表和技术，以适应越来越严格的工业生产安全性、可靠性和耐用性要求。作者把温度仪表的标准化和计量单独成章，是很有见地的，因为这些工作虽然重要却常被忽视。此外，作者还在这本书的附录中，收入了大量实际应用中经常需要的最新数据和资料。书中不但反映了测温技术各方面的新发展，而且介绍了许多在实际工作中十分重要、但在其他温度著作中很少介绍的知识。上述这些具有特色的内容，使这本专著具有很强的实用性，以至在某种程度上可作为工具书使用。作者将书名取为《温度测量实用技术》，的确是名副其实。

祝贺《温度测量实用技术》的出版！相信它会在测温工作中，助大家一臂之力。

中国温度仪表专业协会顾问、原上海工业自动化仪表研究所所长

张继培

2006年12月于上海

前 言

传感技术是现代信息技术的三大支柱之一。它是信息获取、处理及传输的源头，是自动化的技术基础。它是计算机、信息处理等综合性高技术密集型前沿技术之一。各国都在积极开发新型传感器。伴随传感技术的发展，每个领域都将呈现出种类繁多、型号各异的传感器。温度传感器就是一种最常用的家喻户晓的传感器。因此，如何对温度传感器进行最佳选择、校准及使用将是十分重要的。

温度是一个基本的物理量，它是生产过程中应用最普通、最重要的工艺参数，无论是工农业生产，还是科学研究、国防现代化，都离不开温度测量。它是现代测试技术中应用频率最高的技术之一。然而，温度的准确测量并非轻而易举，即使有了准确度很高的温度计，如果测量方法选择不当，或者测量环境不能满足要求，皆难以得到预期结果。目前，有关温度测量实用技术的专著很少。作者长期从事温度测量与材料科学的理论与应用技术研究，切身感到实用测温技术的重要性、复杂性及实施的困难。作者曾在1991年撰写《温度测量技术》一书，颇受欢迎，很快销售一空，海内外的读者纷纷要求再版，美国学者希望能有英文版本。在中国温度仪表专业协会、仪表材料分会的支持与关怀下，在同行专家的鼓励下，决心再撰写一本材料更新颖、内容更实用、理论更系统、结构更科学的新著，并邀请国内知名专家及富有实践经验的企业家、工程技术人员参与撰写。

本书从温度测量实际出发，全面系统地介绍了温度测量实用技术。全书内容包括：1990年国际温标，各种温度计的工作原理、特性、选择与应用；温度传感器的防腐、耐磨、隔爆、防爆技术，温度量值传递（溯源）、测温系统的校准与标准化；固体表面与内部、气体、液体温度测量，温度测量在相关行业的实际应用，以及现场测温的典型故障分析与对策等。书中还收录了最新国际标准，美、英、德、日等国家标准中关于温度测量的技术数据。在内容上紧密联系生产实际，力求学以致用。其他专著中很少涉及的有关传感器的防爆技术，连接、安装用螺纹、法兰与接插件，本书也作了适当介绍。本书不仅系统地收集了国内外新型温度传感器及测温技术方面的新成果、新动向，还凝聚了作者多年的教学与科研成果及现场测温经验。

本书深入浅出,注重实用,具有很强的实用性、先进性,并具有一定的指导作用,兼有教材与工具书的特点,可谓是一本难以寻求的实用测温技术大全。本书可供冶金、石化、机械、电力等行业的工程技术人员、工人参考,也可供相关专业在校师生、研究人员参考。

本书由王魁汉教授等编著。其中,第3章3.5节由张明高工编写;第4章4.7节由华东仪表厂吴兴华厂长编写;第6章6.1、6.2节由沈阳工业大学贾丹萍副教授编写;第6章6.5节由沈阳航空学院田丰教授编写;第7章由上海工业自动化仪表研究所国家级仪器仪表防爆安全监督检验站原站长胡富民高工编写;第8章8.1至8.5节由北京科技大学黄进峰博士编写;第9章9.1节由辽宁省计量科学研究院侯素兰高工编写;第10章10.3至10.5节、10.7节由春晖仪表公司邹华总经理、天津中环仪表公司刘汉杰总经理、上海自动化仪表三厂宋平总工、沈阳测温仪表厂孙新国总工、肇庆自动化仪表公司吴珏总经理、东北大学刘喜海副教授编写;其他章节由王魁汉教授编写。全书由王魁汉教授统稿。

在编写过程中,辽宁省计量科学研究院黄成新教授协助对全书进行整理、归纳,还得到西仪集团温度仪表厂宋普厂长、浙江伦特机电公司吴加伦总经理、辽宁省计量科学研究院宋德华教授等许多专家、朋友的指导与帮助。在此一并致以诚挚谢意!

作者虽然在测温领域耕耘30多年,但书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。希望本书在促进我国测温技术的发展、缩小我国温度仪表与先进国家的差距、创立温度仪表民族品牌等方面发挥其作用。

王魁汉

2006年12月于沈阳

目 录

序 前言

第 1 章 温度测量概述	1
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	10
1.3.1 温度测量的基本原理	10
1.3.2 温度计的选择	10
1.4 温度测量的最新进展	14
1.4.1 测温技术的最新进展	14
1.4.2 暂行低温温标 (PLTS-2000) 0.9mK ~ 1K 简介	16
1.4.3 金属-碳共晶点高温温度标 准	16
第 2 章 膨胀式温度计	19
2.1 玻璃液体温度计	19
2.1.1 特性与分类	19
2.1.2 原理与结构	19
2.1.3 使用注意事项及测量误差	23
2.2 压力式温度计	24
2.2.1 原理与结构	24
2.2.2 使用注意事项及测量误差	28
2.3 双金属温度计	28
2.3.1 原理与结构	28
2.3.2 使用注意事项及测量误差	31
2.3.3 带热电阻 (偶) 温度变送器的 双金属温度计	31
2.4 产品型号的组成	32

第 3 章 电阻温度计 (热电阻)	34
3.1 电阻温度计及其特性	34
3.1.1 特性	34
3.1.2 原理	34
3.1.3 标准铂电阻温度计	36
3.2 热电阻的结构	38
3.2.1 感温元件	38
3.2.2 内引线形式	40
3.2.3 保护管	41
3.3 工业热电阻	42
3.3.1 热电阻的分类与性能	42
3.3.2 工业热电阻	45
3.3.3 铠装热电阻	49
3.3.4 薄膜铂热电阻	50
3.3.5 厚膜铂热电阻	51
3.3.6 热电阻的选择	53
3.4 热敏电阻	54
3.4.1 热敏电阻材料及特性	54
3.4.2 热敏电阻的结构与使用注意 事项	60
3.5 测量线路	67
3.5.1 电阻法 (电桥法)	68
3.5.2 电位法 (电位差计法)	70
3.5.3 工程测温仪表	72
3.5.4 热电阻检测设备	73
3.6 使用注意事项及测量误差	74
3.6.1 灵敏度与自热效应	74
3.6.2 实际电阻值对 R_0 偏离的影 响	76
3.6.3 连接导线与绝缘电阻的影 响	76
3.6.4 连接导线温度变化的影响	77
3.6.5 动态特性	77
3.6.6 安装方法	79
3.6.7 热电阻的劣化与使用寿命	79

3.6.8 稳定性误差	80	4.7.1 热电偶的焊接、清洗与退火	197
3.6.9 产品型号的组成	80	4.7.2 热电偶及补偿导线的劣化	200
3.6.10 检定与精度管理	81	4.7.3 铠装热电偶的分流误差、劣化 与漂移	205
3.7 热能表	81	4.7.4 使用注意事项与测量误差	209
第4章 热电温度计(热电偶)	84	4.7.5 在感应条件下测温的干扰与抗 干扰	218
4.1 热电偶的原理与特点	84	4.7.6 产品型号的组成	219
4.1.1 特点	84	4.7.7 检定与精度管理	219
4.1.2 原理	84	4.8 钨铼热电偶抗氧化技术及应用	220
4.1.3 基本定则	88	4.8.1 钨铼热电偶在空气中热电动 势稳定性的研究	220
4.2 热电偶的分类及其特性	93	4.8.2 钨铼热电偶在非氧化气氛中 的稳定性	223
4.2.1 贵金属热电偶与廉金属热电 偶	93	4.8.3 钨铼热电偶抗氧化技术与应 用	223
4.2.2 标准化热电偶	94	4.9 热流计	226
4.2.3 标准化热电偶的基本参数	109	4.9.1 热流计的原理	227
4.2.4 非标准化热电偶	115	4.9.2 热流计的结构	228
4.2.5 热电偶的选择	126	4.9.3 热流计的应用	229
4.3 绝缘物与保护管	129	第5章 辐射温度计	231
4.3.1 绝缘物	129	5.1 辐射测温原理	232
4.3.2 保护管材料	131	5.1.1 热辐射	232
4.3.3 保护管的结构	150	5.1.2 黑体辐射与发射率	234
4.3.4 保护管的强度	151	5.1.3 黑体辐射定律	236
4.3.5 保护管的耐热冲击性能	155	5.2 光谱辐射温度计	238
4.4 热电偶的结构与分类	157	5.2.1 光学高温计	238
4.4.1 工业用热电偶	157	5.2.2 光学高温计的使用及测量误 差	244
4.4.2 铠装热电偶电缆及铠装热电 偶	158	5.2.3 光电高温计	246
4.4.3 高性能实体热电偶	167	5.3 辐射高温计	248
4.4.4 复合管型铠装热电偶	170	5.3.1 辐射高温计原理与分类	249
4.4.5 特种热电偶	170	5.3.2 辐射感温器的结构	250
4.5 补偿导线	173	5.3.3 辐射高温计的使用及测量误 差	252
4.5.1 原理	173	5.3.4 前置反射器辐射温度计	256
4.5.2 补偿导线的型号、规格与标 志	174	5.4 比色温度计	256
4.5.3 补偿导线的基本参数	178	5.4.1 比色温度计的原理与分类	256
4.5.4 补偿导线的使用	180	5.4.2 比色温度计的结构	258
4.6 测温线路	183	5.4.3 比色温度计的使用及测量误	
4.6.1 参考端	183		
4.6.2 测温线路	186		
4.6.3 温度变送器	192		
4.7 热电偶的使用与测量误差	197		

差	260	6.6.1 电阻式热噪声温度计	319
5.4.4 辐射温度计的选择	261	6.6.2 比较式热噪声温度计	320
5.5 部分辐射温度计	264	6.7 核四级共振温度计 (NQR 温度	
5.5.1 部分辐射温度计原理与分类 ..	264	计)	321
5.5.2 红外温度计	264	6.7.1 NQR 温度计原理及特性	321
5.5.3 红外温度计原理与结构	266	6.7.2 NQR 温度计的测温系统与应	
5.5.4 黑体空腔红外辐射测温仪	267	用	322
5.5.5 红外探测器	269	6.8 示温、感温材料与耐热数据记录	
5.5.6 红外热像仪	272	器	324
5.5.7 红外温度计的选择	273	6.8.1 示温涂料	324
5.5.8 红外温度计的使用及测量误		6.8.2 液晶	328
差	276	6.8.3 感温铁氧体	330
5.5.9 红外“热电偶”	278	6.8.4 塞格测温熔锥	331
5.5.10 辐射温度计产品型号的构		6.8.5 耐热数据记录器	335
成	280	第 7 章 测温防爆技术	338
第 6 章 新型温度传感器	281	7.1 概述	338
6.1 光纤温度传感器	281	7.2 我国爆炸危险环境电气安全规范	
6.1.1 光纤温度传感器的原理与特		和标准	338
性	281	7.2.1 爆炸危险环境电气安全规	
6.1.2 接触式光纤温度传感器	286	范	339
6.1.3 非接触式光纤温度传感器	290	7.2.2 爆炸性环境用防爆电气设备制	
6.1.4 分布参数式光纤传感器	296	造标准	340
6.1.5 光纤光栅温度传感器	298	7.3 爆炸性混合物	341
6.1.6 光纤测温技术的应用	300	7.3.1 爆炸性混合物的基本特性	341
6.2 特种测温热敏电缆	302	7.3.2 爆炸性混合物的类、级、组别	
6.2.1 热敏电缆的结构与特点	303	划分	346
6.2.2 热敏电缆的工作原理	303	7.4 爆炸危险环境的区域划分	350
6.2.3 热敏电缆的主要性能	305	7.4.1 爆炸危险环境的分类和分	
6.3 半导体集成电路温度传感器	306	级	350
6.3.1 AD590 集成电路温度传感		7.4.2 爆炸危险环境区域等级的判断	
器	306	方法	350
6.3.2 DS1820 智能温度传感器	308	7.5 防爆电气设备的防爆原理	353
6.4 石英温度计	311	7.6 防爆电气设备的基本技术要	
6.4.1 石英温度计原理与特性	312	求	354
6.4.2 石英温度计的性能与应用	313	7.6.1 防爆电气设备的通用技术	
6.5 声学温度计	315	要求	355
6.5.1 声学测温原理	315	7.6.2 防爆电气设备的隔爆型技术	
6.5.2 声学测温方法	315	要求	362
6.5.3 超声波温度计	317	7.6.3 防爆电气设备的增安型技术	
6.6 热噪声温度计	319	要求	372

7.6.4 防爆电气设备的本质安全型 技术要求	373	9.1.1 温度量值传递简介	414
7.7 防爆电气设备的标志	382	9.1.2 温度计量器具检定系统	414
7.8 防爆电气设备设计与型号表示	385	9.2 在线温度测量与校准	423
7.8.1 防爆电气设计	385	9.2.1 从热处理工艺温度要求探讨我 国工程测温存在的问题	423
7.8.2 隔爆热电偶(阻)型号	387	9.2.2 分立元件检定法存在的弊端与 对策	424
第 8 章 温度传感器耐高温与防腐蚀 技术	388	9.2.3 分立元件检定法与整体校准法 对比	426
8.1 热电偶的工作环境	388	9.2.4 测温系统的整体在线校准	431
8.1.1 高温氧化	388	9.2.5 校准实验室的认可制度	433
8.1.2 高温碳化、氮化、硫化和 氯化	389	9.3 温度领域的标准化	434
8.1.3 多相作用复杂环境腐蚀	391	9.3.1 标准及标准化	434
8.2 不锈钢及耐腐蚀合金保护管	391	9.3.2 ASTM 在温度领域的标准化工 作	435
8.2.1 不锈钢的牌号、性能与应 用	391	9.3.3 国际电工委员会第 65 技术委 员会(IEC/TC65)简介	436
8.2.2 耐腐蚀合金特点、应用和常见 牌号	395	第 10 章 测温技术与应用	438
8.3 耐热钢及耐热合金保护管	397	10.1 固体内部温度测量	438
8.3.1 耐热钢及耐热合金的分类	398	10.1.1 接触法测量	438
8.3.2 耐热钢及耐热合金的性能与 应用	399	10.1.2 非接触法测量	440
8.4 耐磨合金	399	10.2 固体表面温度测量	440
8.4.1 高温高强耐磨合金	399	10.2.1 固体表面温度测量的特 点	440
8.4.2 高温高强耐磨钴基合金	402	10.2.2 静止表面的温度测量	440
8.5 高温耐热耐磨材料的新进展	403	10.2.3 运动物体表面的温度测量	444
8.5.1 高温抗氧化合金	403	10.2.4 带电物体表面的温度测量	447
8.5.2 新型耐磨合金	405	10.2.5 移动细丝的表面温度测量	448
8.6 提高热电偶保护管耐磨性能 途径	407	10.2.6 摩擦表面的氯化测温技术	449
8.6.1 保护管涂层	407	10.2.7 表面温度计检定装置	449
8.6.2 新技术、新材料保护管涂 层	410	10.3 气体温度测量	451
8.6.3 改变保护管几何形状,提高耐 磨性能	413	10.3.1 高速气流的温度测量	451
第 9 章 温度量值传递(溯源)、校准 与标准化	414	10.3.2 高温气体的温度测量	454
9.1 温度量值传递	414	10.3.3 阳极焙烧炉连续测温	459
		10.3.4 高温强腐蚀还原性气体(渗 碳炉)测温	459
		10.3.5 真空炉温度测量	461
		10.3.6 微波场温度测量	462
		10.4 液体温度测量	463
		10.4.1 石油化工企业中液体温度测	

量	464	10.7.1 螺纹	519
10.4.2 高温盐浴炉的温度测量	465	10.7.2 法兰	522
10.4.3 钎焊炉温度测量	468	10.7.3 安装固定装置的承压能力	525
10.4.4 铝液及铝电解液测温	470	10.7.4 热电偶用接插件	529
10.4.5 铜液连续测温	473	10.8 现场测温典型故障分析与对策	531
10.4.6 钢液温度测量(间断法)	475	10.8.1 典型故障分析与对策	531
10.4.7 钢液连续测温	489	10.8.2 钨铼热电偶折损原因分析	537
10.4.8 铁液连续测温	499	10.9 钢液、铜液与铁液成分传感器	538
10.5 行业测温	500	10.9.1 氧传感器的原理及其应用	538
10.5.1 航空、航天与舰艇测温	500	10.9.2 钢液测温定氧	544
10.5.2 玻璃、橡塑工业测温	502	10.9.3 铜液连续测温定氧	547
10.5.3 工业炉窑与轧辊测温	504	10.9.4 钢液结晶定碳	548
10.5.4 核电、火电行业测温	506	10.9.5 铁液定硅	550
10.5.5 石油化工与燃气测温	512	附录	552
10.5.6 造纸、粮食及食品工业的温度 测量	515	附录 A 第3章相关内容附录	552
10.5.7 城市垃圾焚烧炉测温	516	附录 B 第4章相关内容附录	557
10.6 超高压环境下的温度测量	517	附录 C 第5章相关内容附录	570
10.6.1 超高压条件下热电偶测温的 特点	517	附录 D 第7章相关内容附录	573
10.6.2 超高压下的温度测量	518	附录 E 第8章相关内容附录	580
10.7 温度传感器连接、安装用螺纹、 法兰	519	附录 F 第10章相关内容附录	590
		参考文献	595

第 1 章 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。对于非平衡态系统, 目前对温度尚缺乏准确的定义。

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, 一个长时间工作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像长度计量那样, 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, 才能用来测量长度。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像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做温标的三要素，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。

1714年德国人华伦海脱（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。他规定以人的体温为96度，以当时人们可获得的最低温度，即氯化氨和冰的混合物的平衡温度为0度。这两个固定点中间等分为96份，每一份为1度记作 $^{\circ}\text{F}$ 。这种标定温度的方法称为华氏温标。

1740年瑞典人摄尔休（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 $^{\circ}\text{C}$ 。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。

表 1-1 温度换算系数表

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

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。

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，因而不是科学的。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，即

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

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 ——高温热源的溫度；

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 $T_s = 273.16\text{K}$, 则由式 (1-1) 有:

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

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 ——摩尔气体常数;

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, 则

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

可以看出, 式 (1-4) 与式 (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)。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。

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)。

国际温标进行重大修改的原因,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。过去各国使用的温标是 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)暂行温标(简称 EPT-76)。但从 1990 年 1 月 1 日开始,各国陆续采用 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。我国从 1994 年 1 月 1 日起全面实行 ITS-90 国际温标。

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} 的关系仍为

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

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。

表 1-2 ITS-90 定义固定点

序号	温度		物质 ^①	状态 ^②	$W_r(T_{90})$
	T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}\text{C}$			
1	3~5	-270.15 \approx -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

(续)

序号	温度		物质 ^①	状态 ^②	$W_r(T_{90})$
	T_{90}/K	$t_{90}/\text{°C}$			
11	429.7485	156.5985	In	F	1.60980185
12	505.078	231.928	Sn	F	1.89279768
13	692.677	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	

① 除³He外,所有物质都是天然同位素成分, e-H₂ 是正、仲分子平衡态氦。

② 符号代表的意义是: V—蒸气压点; T—三相点; G—气体温度计测定点; M、F—熔点、凝固点。

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 (O₂) 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 蒸气压方程, 下限延到 0.65K。

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 蒸气压温度计。
- 2) 3.0 ~ 24.5561K, ³He、⁴He 定容气体温度计。
- 3) 13.8033K ~ 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叠使用。

1. 0.65 ~ 5.0K 范围

本范围 T_{90} 按下式用³He 和⁴He 蒸气压 P 来定义:

$$T_{90} = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i [(\ln P - B)/C]^i \quad (1-6)$$

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。

表 1-3 氦蒸气压方程式常数

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	0.980106	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

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：氦 (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 蒸气压温度计确定)。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 、 b 和 c 3 个系数数值由前述 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 $B_3(T_{90})$ 或 $B_4(T_{90})$ 。此时， T_{90} 的定义如下：

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

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。