

张 克 主 编
廖 理 主 审

温度测控技术 及应用

Wendu
Cekong
Jishu ji
Yingyong

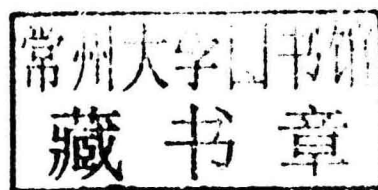


 中国质检出版社

温度测控技术及应用

张 克 主编

廖 理 主审



中国质检出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

温度测控技术及应用/张克主编. —北京: 中国质检出版社, 2011. 11
ISBN 978-7-5026-3488-9

I. ①温… II. ①张… III. ①温度测量方法②温度测量仪表 IV. ①TK311
②TH811

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 190150 号

内 容 提 要

本书内容分为三篇, 共三十七章, 涵盖温度测控技术原理、检定校准、设计和应用三部分内容。本书的特点是将温度测控领域最新技术的原理和应用, 从实际检定、校准以及设计应用等方面的需求考虑, 不拘泥于传统的温度计量检定专业领域, 从更广泛的传感器、仪器仪表等方面进行论述, 引入计算机、单片机和数值计算等现代的先进技术内容, 对目前广泛使用以及最新的计量仪器设备的功能及其检定、校准进行了详细叙述, 对日常检定、校准中遇到的一些难点问题进行分析, 并对温度计量技术的发展方向进行展望。

本书可供相关科研机构、大专院校、生产企业和计量部门从事温度领域科研开发、生产制造、计量检定等多方面技术人员使用。

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100013)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010)64275323 发行中心: (010)51780235

读者服务部: (010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 32.25 字数 760 千字

2011 年 11 月第 1 版 2011 年 11 月第 1 次印刷

*

定价 78.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

编 委 会

主 编 张 克

主 审 廖 理

副主编	王立新	彭铁军	王文革	杨永军	金志军	吴建英	王智超	王 毅
编 委	温晓清	张 哲	姜 波	田 昀	张 炯	董 亮	沈才忠	姚丽芳
	范晓红	黄 锋	朱 江	刘 扬	杨 青	梁显有	张漫山	许 杰
	何 欣	王文戈	杨俊涛	刘樱英	肖利华	潘 莉	华 蕾	吴 芳
	王 莉	张易农	郭云峰	黄 艳	王跃佟	马晓春	俞伦朋	徐 军
	张立谦	张立和	裴明瓚	李 刚	李 崴	余 颖	张卿贤	赵志丹
	杨 萌	喻力弘	俞小虎	刘一凡	饶 杰	何纲建	刘玉兴	肖建鹏
	王 颖	姚 敏	李 红	苗先云	鲁贵亮	张曦文	张玉律	孙富韬
	仝立功	刘 勇	蒋 静	王兴东	陈桂生	陈 恪	梁 平	张晓明
	腾绍祥	郭 强	周 娟	罗 涛	李颖(连)	张 军	陈 坚	吴燕春
	杜 宾	王传文	雷 蒙	尚丽萍	徐 彬	吕 宏	范翠文	宿海涛
	陆孝芸	胡 波	易 杰	曹淑君	金振涛	高卫兵	陈建国	王旭玲
	刘保国	张志宏	王文辉	朱建良	叶 明	孙 捷	张凤玲	苏凤华
	刘长江	王 启	赵庆田	王宝水	赵连起	田 雨	王 哲	宋云龙
	张会庭	刘建庆	杨英霞	贾桂华	邢志红	孙云飞	屠三军	罗健明
	林 军	孟雪娟	贾 健	何文焰	王建科	贺晓辉	刘晓辉	王轶巍
	刘佳鹏	张 燕	王 鹏	李 晨	李颖(京)	李 楠	黄 垚	李志强
	孙 晨	何艺超	孟 帆	任艳辉	任婷婷	薛婷婷	梁兴忠	张华文
	徐兴业	孙 勇	郭沈辉	张玉芝	张建伟	杨新光	王学杰	王佩君
	陈如冰	包可瑜	刘郁纪	成 钢	宋秉卿	路永立	阚世斌	郝占英
	张玖龙	彭慧颖	王爱东	张思雄	周 杨			

前 言

温度是国际计量委员会定义的七个基本物理量之一。温度的计量和控制直接影响到产品质量、过程控制、生命安全等。在冶金机械、国防军工、环境气象、石油化工、电力能源、医疗卫生等领域，温度的计量和控制更显得十分重要。

进入 21 世纪，电子技术、计算机技术迅猛发展，并被广泛应用于测量和控制领域。社会对计量检测的需求比以往更迫切，要求也更高。因此，计量检测人员不仅需要扎实的专业计量知识，还需要具备较高的综合技术素质，才能适应岗位工作的不断变化发展，满足社会对计量检测的需求。

本书着眼于实际温度计量技术的应用，关注实际需求，涵盖技术原理、检定校准、设计和应用三部分内容。本书的特点是将温度测控领域最新技术的原理和应用，从实际检定、校准以及设计应用的需求考虑，不拘泥于传统的温度计量检定专业领域，从更广泛的电测基础、传感器、仪器仪表等方面进行论述，引入目前广泛应用的计算机、单片机和数值计算等现代技术内容。本书的内容突出重点、立足当前、面向未来，对目前广泛使用以及最新的计量仪器设备的功能及其检定、校准进行了详细叙述，对日常检定校准中遇到的一些难点问题进行深层次的分析，并对温度计量技术的发展方向进行展望。本书可以满足科研机构、大专院校、生产企业和计量部门从事温度领域科研开发、生产制造、计量检定等多方面技术人员的需求，也可以作为学习参考书、工具书和培训教材使用。

本书的编委来自于北京、天津、上海、重庆、辽宁、吉林、黑龙江、河北、山西、内蒙古、河南、山东、浙江、安徽、江苏、福建、广东、湖南、广西、贵州、陕西、青海、甘肃、四川、新疆、海南、深圳、广州、大连、沈阳、青岛、淄博、潍坊、济宁、佛山、宁波、苏州等地的计量和检测技术机构，以及航空 304 所、航天 102 所、国家气象局计量中心、国家海洋标准计量中心、中国建筑科学研究院环境与能源所、解放军医用热学生物力学计量测试研究总站、北京航空

航天大学、河北大学、北京康斯特科技仪表有限公司、北京美吉时利科技有限公司、北京立丰世通科技发展有限公司、北京南奇星科技发展股份公司、北京金曼顿科技发展有限公司、北京燕京啤酒集团公司、北京康易格瑞能源技术有限公司、天津杰伦计量技术服务有限公司、天津中环温度仪表有限公司、冀州市耀华器械仪表厂、湖州唯立仪表厂、济南长峰国正科技发展有限公司、泰安磐然测控科技有限公司、深圳市艾依康仪器仪表科技有限公司、西安电力热工院、浙江电力试验研究院、黑龙江电力试验研究院、中国东方航空公司、中国航油华北公司、北京首都机场动力能源有限公司、北京燕山石化公司计量站、北京铁路局计量所、柳州铁路局计量所、东岳动力公司等单位长期从事温度、电学、计算机等专业领域的技术人员，结合自身工作经验、科研成果等编辑成书。

本书在策划和编写过程中得到了国际计量委员会委员、全国温度计量技术委员会主任委员、中国计量测试学会温度专业委员会主任委员、中国计量科学研究院副院长段宇宁，全国温度计量技术委员会秘书长陈伟昕，全国电磁计量技术委员会秘书长、中国计量科学研究院电学与量子科学研究所副所长邵海明等领导的指导和帮助。

本书由全国温度计量技术委员会、中国计量测试学会温度专业委员会副主任委员，航空 304 所副所长廖理研究员主审。

特此向所有关心、帮助我们的领导、专家和朋友们致以衷心的感谢！

编 著 者

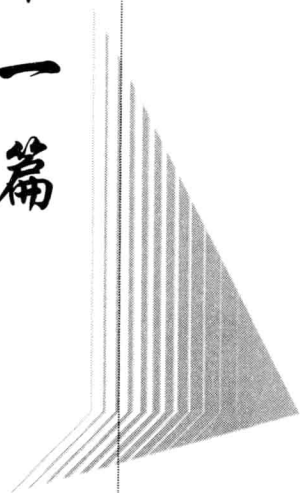
2011 年 7 月

目 录

第一篇 技术基础	(1)
第一章 温标	(3)
第二章 温度测控技术基础	(20)
第三章 辐射测温技术	(57)
第四章 黑体发射率的计算和验证	(84)
第五章 常用低压电器	(98)
第六章 温度控制技术	(111)
第七章 数值分析和数字滤波	(119)
第八章 模数转换器	(129)
第九章 数模转换器	(177)
第十章 总线	(191)
第十一章 智能型数字控温仪表	(198)
第十二章 虚拟仪器技术与应用	(245)
第十三章 噪声干扰与抑制	(276)
第十四章 常用检定/校准设备	(281)
第二篇 检定/校准	(295)
第十五章 热电阻的检定	(297)
第十六章 热电偶的检定和校准	(304)
第十七章 热电偶检定炉的测试	(331)
第十八章 辐射温度计的校准装置	(339)
第三篇 设计和应用	(341)
第十九章 热电偶、热电阻自动检定系统一	(343)
第二十章 热电偶、热电阻自动检定系统二	(349)
第二十一章 玻璃液体温度计自动检测系统	(374)
第二十二章 仪表读数的视频自动识别	(381)
第二十三章 温湿度自记仪	(391)
第二十四章 高精度温度测量系统	(399)
第二十五章 温度数据采集器	(404)
第二十六章 无线环境测控系统	(412)
第二十七章 通风干湿表	(415)

第二十八章	温湿度检定箱.....	(421)
第二十九章	高温盐槽	(424)
第三十章	热管恒温槽.....	(428)
第三十一章	常用黑体.....	(435)
第三十二章	2500K ~ 3500K 高温黑体辐射源	(439)
第三十三章	红外测温系统.....	(444)
第三十四章	气流温度的稳态和动态测量.....	(450)
第三十五章	墙体热阻测试仪.....	(485)
第三十六章	岩土热响应试验测试仪.....	(489)
第三十七章	温度测量在大气探测中的应用.....	(500)
参考文献		(508)

第一篇



技术基础

第一章 温 标

第一节 概 述

温度是表征物质冷热程度的物理量，是七个基本物理量之一。但它与其他基本量相比要复杂，温度是一个内涵量（强度量），不是的一个广延量。温标是度量温度的标尺，就是用数值表示温度高低的方法。温标的三要素：固定点、内插仪器和内插公式。

1 经验温标

经验温标是利用某种物质的物理特性和温度之间的变化关系，用实验的方法来确定的温标。

经验温标主要包括摄氏温标、华氏温标和列氏温标等几种。

摄氏温标：1742 年，瑞典天文学家安德斯·摄尔修斯（Anders Celsius，1701 ~ 1744）将 1 个标准大气压下的水的沸点规定为 0°C ，冰点定为 100°C ，两者间均分成 100 个刻度，和现行的摄氏温标刚好相反。直到 1744 年才被卡尔·林奈修订成现行的摄氏温标：冰点定为 0°C ，沸点定为 100°C 。1954 年的第十届国际度量衡大会特别将此温标命名为“摄氏温标”，以表彰摄氏的贡献。目前，摄氏温标为世界上大多数国家采用的温度单位。

华氏温标：1714 年，德国物理学家丹尼尔·家百列·华伦海特（Daniel Gabriel Fahrenheit，1686 ~ 1736），他使用三个参考温度来标示他的刻度。将温度计放入由冰、水以及氯化铵构成的混合物中，量得的刻度即为零度。第二是将温度计放入冰水混合物中所量得的刻度标记为 32 度。第三个刻度为 96 度，是将温度计含入口中，或夹在腋下时所量得的刻度。之后，其他科学家决定重新修订华氏温标，使得沸点刚好高于冰点 180 度。这样，人体的正常体温也修正成了 98.6 度。目前，只有英美等少数国家还在使用华氏温标。

列氏温标：代表符号为 $^{\circ}\text{R}$ ，是由法国科学家列奥米尔于 1731 年提出的。将水的冰点定为列氏 0 度，而沸点则为列氏 80 度。列氏温标曾经在欧洲特别是法国和德国相当流行，但随后均由摄氏温标所取代。

$$\text{摄氏温标和华氏温标的换算关系： } t/^{\circ}\text{C} = (t/^{\circ}\text{F} - 32) \times \frac{5}{9}$$

$$\text{摄氏温标和列氏温标的换算关系： } t/^{\circ}\text{C} = \frac{5}{4} \times t/^{\circ}\text{R}$$

$$\text{列氏温标和华氏温标的换算关系： } t/^{\circ}\text{R} = \frac{4}{9} \times (t/^{\circ}\text{F} - 32)$$

2 热力学温标

经验温标由于其需要借助于测温物质的物理特性，因此有很大的局限性，也是不科学的。热力学温标是开尔文（Kelvin）在 1848 年提出的。该温标是利用卡诺定理建立起来的。以热力学第一及第二定律为基础的建立起来的，它与测温物质本身的性质无关。在 1967 年的第十三届国际计量大会上，将热力学温度的单位开尔文（K）列为国际单位制（SI）7 个基本单位之一。

热力学第一定律是由迈尔（Mayer）和焦耳（Joule）在 1842 年和 1843 年先后独立提出的。可以表述为：一切物质的能量从一种形式转化为另一种形式，从一个物体传给另一个物体，在转化和传递中能量的数量不变。

热力学第二定律是由克劳修斯和开尔文在 1850 年和 1856 年先后提出的。克氏表述为：不可能把热从低温物体传到高温物体而不产生其他影响；开氏表述为：不可能从单一热源取热使之完全变为有用的功而不产生其他影响。

上述两个定律的明确，使卡诺定理严格证明有了依据。卡诺定理可以简述为：所用工作于两个一定温度之间的热机，以可逆热机的效率为最大。其推论为：所有工作于两个一定的温度之间的可逆热机，其效率相等。卡诺循环是由两个定温过程和两个绝热过程交错组成的。遵守卡诺定理的可逆热机的热效率 η 为

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1-1)$$

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发出的热量；

W ——卡诺热机所做的功（由热力学第一定律可得知 W, Q_1, Q_2 ）；

T_1 ——高温热源的温度；

T_2 ——低温热源的温度。

简化后可得

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-2)$$

这就说明，工作于两个热源之间交换热量之比等于两热源温度之比。这样引入的温标成为热力学温标或开尔文温标。显然，热力学温标与测温物质的性质无关，因此又称为绝对温标，符号用 K 来表示。1954 年国际计量大会决定把水三相点温度 273.16K 定义为热力学温标的基本固定温度，而热力学温度的单位开尔文（K）就是水三相点的热力学温度的 1/273.16。

为了统一摄氏温标和热力学温标，1960 年的第 11 届国际计量大会对摄氏温标做了新的定义，规定它由热力学温标导出，摄氏温度 t 的定义为

$$t = T - 273.15$$

它的单位是摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ ，摄氏度与开尔文完全是等值的。

3 理想气体温标

理论证明, 利用定容或定压理想气体温度计测出的温度就是热力学温标中的温度。因此, 人们通常是利用理想气体温度计来实现热力学温标。

理想气体是实际气体在压强趋于零时的极限, 它具有两个基本性质:

$$(1) pV = NRT'$$

式中, p 是压强; V 是体积; N 是物质的量; R 是摩尔气体常数; T' 是理想气体温标所确定的温度。

(2) 内能仅仅是温度的函数, 即

$$U = U(T')$$

利用上述性质可以证明, 理想气体可逆卡诺定理的效率为

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 分别与式 (1-1) 和式 (1-2) 进行比较后得

$$\frac{T'_2}{T'_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

同时, 理想气体温标也把水三相点温度值规定为 273.16K。因此, 理想气体温标所确定的温度 T' 等于热力学温度 T 。

理想气体温标可以用气体温度计来实现, 但是由于实际气体并不是理想气体, 所以在利用气体温度计测温时, 必须对测量值进行修正, 才能得到热力学温度值。

4 ITS-90 国际温标

国际温标定义: 由国际协议而采用的易于高精度复现, 并在当时的知识和技术水平范围内尽可能接近热力学温度的经验温标。

前文中已提到热力学温标是最基本的温标, 但热力学温标装置太复杂, 实现非常困难, 因此为了实用上的准确和方便, 1927 年第七届国际计量大会上决定采用国际温标, 这是第一个国际协议性温标 (ITS-27)。

现行国际温标是 ITS-90, ITS-90 国际温标替代了 1968 年国际实用温标 (1975 年修订本) 和 1976 年 0.5K 到 30K 临时温标 (EPT-76)。

热力学温度 (符号为 T) 是 7 个基本物理量之一。其单位为开尔文 (符号为 K), 定义为水三相点热力学温度的 1/273.16。

由于在以前的温标定义中使用了与 273.15K (冰点) 的差值来表示温度, 因此, 现在仍保留这一方法。用这种方法表示的热力学温度成为摄氏温度 (符号为 t), 其定义为

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15$$

摄氏温度的单位为摄氏度 (符号 $^{\circ}\text{C}$), 根据定义, 它的大小等于开尔文 (K), 温差

可以用开尔文或摄氏度来表示。

1990 年的国际温标同时定义了国际开尔文温度（符号为 T_{90} ）和国际摄氏温度 t_{90} ， T_{90} 与 t_{90} 之间的关系为

$$t_{90}/^{\circ}\text{C} = T_{90}/\text{K} - 273.15$$

物理量 T_{90} 的单位为开尔文（符号为 K）， t_{90} 的单位为摄氏度（符号为 $^{\circ}\text{C}$ ），与热力学温度 T 和摄氏温度 t 一样。

ITS—90 由 0.65K 向上到根据普朗克辐射定律使用单色辐射，实际可测量的最高温度。ITS—90 通过各温区和各分温区来定义 T_{90} 。某些温区或分温区是重叠的，重叠区的 T_{90} 定义有差异。然而，这些定义应属等效。在相同温度下使用此有异议的定义时，只有高精度的不同测量之间的数值才能探测出来。在相同温度下，即使使用一个定义，对于两支可接受的内插仪器（例如电阻温度计），亦可得出 T_{90} 的细微差值。实际上这些差值可以忽略不计。

1990 国际温标的定义：0.65K 到 5.0K 之间， T_{90} 由 ^3He 和 ^4He 的蒸汽压与温度的关系式来定义。

由 3.0K 到氦三相点（24.5561K）之间， T_{90} 是用氦气体温度计来定义的。它使用了 3 个定义固定点及利用规定的内插方法来分度。这 3 个定义固定点是可以实验复现，并具有给定值的。

由平衡氢三相点（13.8033K）到银凝固点（961.78 $^{\circ}\text{C}$ ）之间， T_{90} 是用铂电阻温度计来定义的，在一组规定的定义固定点上利用所规定的内插方法来分度。

银固定点（961.78 $^{\circ}\text{C}$ ）以上， T_{90} 借助于一个定义固定点和普朗克辐射定律来定义。

(1) 由 0.65K 到 5.0K：用氦蒸汽压—温度方程

在此温区内， T_{90} 按下式用 ^3He 和 ^4He 蒸汽压 p 来定义：

$$T_{90}/\text{K} = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i \{ [\ln(p/\text{Pa}) - B]/C \}^i$$

式中， A_0 、 A_i 、 B 和 C 为常数。

(2) 由 3.0K 到氦三相点（24.5561K）：用 ^3He 和 ^4He 作为测温气体

对于 ^3He 气体温度计，以及用于低于 4.2K 的 ^4He 气体温度计，必须明确考虑到气体的非理想性，应使用有关的第二维里系数 $B_3(T_{90})$ 或 $B_4(T_{90})$ 。在此温区内， T_{90} 由下式定义：

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90})N/V}$$

式中， p 为气体温度计的压强； a 、 b 和 c 为系数； N/V 为气体温度计温泡中的气体密度， N 为气体量， V 为温泡的容积， x 根据不同的同位素取 3 或 4。第二维里系数由下式给出：

对于 ^3He

$$B_3(T_{90})/\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} = [16.69 - 336.98(T_{90}/\text{K})^{-1} + 91.04(T_{90}/\text{K})^{-2} - 13.82(T_{90}/\text{K})^{-3}] \times 10^{-6}$$

对于⁴He

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

利用上述两式复现了 T_{90} 的准确度取决于气体温度计的设计, 以及所用气体的密度。

(3) 由平衡氢三相点 (13.8033K) 到银凝固点 (961.78℃): 用铂电阻温度计

在此温区内, T_{90} 用铂电阻温度计来定义, 在一组规定的定义固定点上和规定的参考函数以及内插温度的偏差函数来分度。

温度值 T_{90} 是由该温度时的电阻 $R(T_{90})$ 与水三相点时的电阻 $R(273.16\text{K})$ 之比来求得的。此比值 $W(T_{90})$ 为

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273.16\text{K})}$$

适用的铂电阻温度计必须是无应力的纯铂丝做成的, 并且至少应满足下列两个关系式之一:

$$\begin{aligned} W(29.7646^\circ\text{C}) &\geq 1.11807 \\ W(-38.8344^\circ\text{C}) &\leq 0.844235 \end{aligned}$$

用于银凝固点的铂电阻温度计, 还必须满足以下要求:

$$W(961.78^\circ\text{C}) \geq 4.2844$$

在电阻温度计的每个温区内, T_{90} 可由相应的参考函数给出的 $W_r(T_{90})$, 以及偏差值 $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$ 经计算得到。

下面给出各温区所用的定义固定点和各温区的偏差函数

(1) 平衡氢三相点 (13.8033K) 到水三相点 (273.16K)

温度计在下列固定点分度: 平衡氢三相点 (13.8033K)、氦三相点 (24.5561K)、氧三相点 (54.3584K)、氩三相点 (83.8058K)、汞三相点 (234.3156K) 和水三相点 (273.16K), 以及接近于 17.0K 和 20.3K 的两个附加温度点。偏差函数为

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

式中, $n=2$, 系数 a 、 b 、 c 由定义固定点上测定得到。

(2) 0℃到银凝固点 (961.78℃)

温度计在水三相点 (0.01℃), 以及锡凝固点 (231.928℃)、锌凝固点 (419.527℃)、铝凝固点 (660.323℃) 和银凝固点 (961.78℃) 上分度。偏差函数为

$$\begin{aligned} W(T_{90}) - W_r(T_{90}) &= a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + \\ &c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660.323)]^2 \end{aligned}$$

(3) 汞三相点 (-38.8344℃) 到镓三相点 (29.7646℃)

温度计在汞三相点 (-38.8344℃)、水三相点 (0.01℃) 和镓熔点 (29.7646℃) 上

分度。偏差函数为

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660.323)]^2$$

其中 $c = d = 0$ ，系数 a 和 b 在定义规定点上的测量值求得。

(4) 银凝固点 (961.78℃) 以上温区：用普朗克辐射定律

银凝固点以上 T_{90} 由下式定义：

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda[T_{90}(x)]} = \frac{\exp\{c_2[\lambda T_{90}(x)]^{-1}\} - 1}{\exp[c_2(\lambda T_{90})^{-1}] - 1}$$

式中, $T_{90}(x)$ 是指下列各固定点中任一个：银凝固点 [$T_{90}(\text{Ag}) = 1234.93\text{K}$]，金凝固点 [$T_{90}(\text{Au}) = 1337.33\text{K}$] 或铜凝固点 [$T_{90}(\text{Cu}) = 1357.77\text{K}$]； $L_\lambda(T_{90})$ 和 $L_\lambda[T_{90}(x)]$ 是在波长（真空中） λ ，温度分别为 T_{90} 、 $T_{90}(x)$ 时黑体辐射的光谱辐射亮度； $c_2 = 0.014388\text{m} \cdot \text{K}$ 。有关光学高温计的实际应用细节和经验见《ITS—90 补充材料》（中国计量出版社，1992 年）。

表 1-1 为 ITS—90 定义固定点。

表 1-1 ITS—90 定义固定点

序号	物质平衡状态	温 度 值		参考函数
		T_{90}/K	$T_{90}/^\circ\text{C}$	
1	氢蒸汽压点	3 ~ 5	-270.15 ~ 268.15	
2	平衡氢三相点	13.8033	-259.3467	0.00119007
3	平衡氢蒸汽压点（或氦气体温度计点）	~ 17	~ -256.15	
4	平衡氢蒸汽压点（或氦气体温度计点）	~ 20.3	~ -252.85	
5	氦三相点	24.5561	-248.5939	0.00844974
6	氧三相点	54.3584	-218.7916	0.09171804
7	氩三相点	83.8058	-189.3442	0.21585975
8	汞三相点	234.3156	-38.8344	0.84414211
9	水三相点	273.16	0.01	1.0000000
10	镓熔点（M）	302.9146	29.7646	1.11813889
11	铟凝固点（F）	429.7485	156.5985	1.60980185
12	锡凝固点（F）	505.078	231.928	1.89279768
13	锌凝固点（F）	692.677	419.527	2.56891730
14	铝凝固点（F）	933.473	660.323	3.37600860
15	银凝固点（F）	1234.93	961.78	4.28642053
16	金凝固点（F）	1337.33	1064.18	
17	铜凝固点（F）	1357.77	1084.62	

5 关于新温标的展望

新的温标正在制修订中，暂且简称其为 ITS—201 × 温标。

同历次国际温标修订一样，经过二十年科学技术的发展，ITS—201 × 温标相对于 ITS—90 温标变化预计还是很大的。

5.1 热力学定义可能发生变化

主要原因在于水的三相点的温度不再是完全精确的，而须通过实验来确定。虽然水的三相点的温度（开始时）为 273.16 K，但它具有不确定度，也就是说，它的值将为 $T_{\text{tpw}} = 273.160000(50) \text{ K}$ [$u_r = 0.18 \text{ ppm}$ ($1 \text{ ppm} = 1 \times 10^{-6}$)]。

实验结果可能会改变 T_{tpw} 的值，使其稍稍偏离精确的 273.16 K。这种相对变化与在不修改定义的情况下，玻耳兹曼常数值所出现的相对变化是相当的，可能为 10^{-6} 的量级，即小于 1 mK。

5.2 固定点可能发生的变化

最大的变化可能在于高温固定点的定义，即铜凝固点以上固定点的定义会发生变化。

第二节 ITS—90 温标定义的固定点

1 物质的相变

在 ITS—90 国际温标中所选用的固定点（纯物质的三相点、沸点和凝固点）都是根据物质的相变过程来实现的。所选用的固定点绝大部分都是纯物质的相变点。

所谓相，是指系统中物理性质均匀的部分，它和其他部分之间有一定分界面隔离开来，相是物质以固态、液态、气态存在的具体形式。自然界中的许多物质都是以固态、液态、气态三种状态存在着的，它们在一定条件下可以平衡存在，也可以相互转变。实验证明，在压强恒定的条件下，由同一物质的固态和液态所组成的系统，只能在一定温度下保持相平衡，此时固态和液态同时存在。同样，在压强一定时，液体和它的蒸汽也只能在一定温度下同时存在，保持相平衡。

如水为固体时以冰的状态存在，作为液体时以水的状态存在，作为气体时以水蒸气的状态存在。在某种条件下，水的两种或三种状态可以同时共存，处于平衡状态。在 1 个标准大气压下，温度为 0℃ 时，冰和水可以同时共存，并处于平衡状态，其中冰和水各称为固相和液相，即两相共存，固液相平衡。通过加热，则可使冰全部变成水；反之，通过冷却，水也可以全部变成冰。两相可以相互转化。

所有的纯物质在一定温度和压强下以三相中任一相的形式存在。当温度和压强变化时物质能从一相向另一相变化，如水结冰、水汽化、冰化为水等。物质从一相变为另一相称为相变。纯物质在相变过程中保持其温度恒定不变，这是由于从外界吸收的热量在相变中用来增加分子的内能，而不是升高纯物质的温度；反之，内能减少伴有热量的放出，因此在纯物质从一相过渡到另一相时会有热量的吸收或释放，而保持在相变过程中温度恒定不变。吸收或释放的热量称作相变潜热。对于熔解所吸收的潜热称作熔解热、对于汽化所吸