

新编计量技术初级教材

温度计量

(第二版)

李吉林 汪开道 张锦霞 蔡怀礼 俞伦鹏 编著

Wd



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

新编计量技术初级教材

温 度 计 量

(第二版)

李吉林 汪开道 张锦霞

编著

蔡怀礼 俞伦鹏

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

温度计量/李吉林等编著. —第二版. 北京: 中国计量出版社, 2006.10

新编计量技术初级教材

ISBN 7-5026-2478-3

I. 温… II. 李… III. 温度—测量—技术培训—教材 IV. TB942

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 080880 号

内 容 提 要

本书系统地介绍了温度与温标的基本概念以及温度计量的基础知识, 着重讲述了各种温度仪表, 如膨胀型温度计与压力式温度计、电阻温度计、热电偶、光学高温计、辐射温度计、动圈式测量仪表、电子自动平衡显示仪表、数字式温度仪表、智能化数字温度仪表等的工作原理、结构、使用、调修及检定等。

本书可供具有中等文化程度的地、县计量部门和厂矿企业计量人员作培训教材, 也可供有关中等专业学校师生参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm × 1092 mm 16 开本 印张 26.25 字数 599 千字

2006 年 10 月第 2 版 2006 年 10 月第 4 次印刷

*

印数 8 001—11 000 定价: 66.00 元

出版前言

为提高质量技术监督部门、技术机构和企业从事计量测试与检定工作的中青年技术人员、管理人员的专业技术水平和管理水平,中国计量出版社于20世纪80年代中期出版了由原国家计量局组织有关专家编写的一套《计量技术初级教材》,包括《长度计量》、《温度计量》、《力学计量》、《电学计量》、《无线电计量》5个分册。

该套书自出版以来,以其通俗易懂、简明扼要、实用性强等特点,受到广大读者,尤其是初、中级计量人员的欢迎,为培养一代计量测试与检定人员起到了重要的作用。

1998年,为适合形势的需要,我社组织数十位长年工作在计量测试领域第一线的、有实践经验的专家(其中多数为该套教材的原作者),重新编写了该套教材,并冠以《新编计量技术初级教材》书名。新编教材的读者对象和写作风格基本不变,注重更新技术内容和采用新的国家计量检定规程和国家标准,并缩减过多的原理阐述和繁杂的、难度较大的数学推导,进一步增强实用性,使之更加贴近基层计量工作者的实际需要。

近年来,由于计量及相关技术快速发展,国家有关标准和检定规程的更新速度加快,该套教材中的许多内容已显陈旧、过时,难以适应当前人员岗位培训和开展计量工作的需要。为此,我社又组织有关专家对该套教材进行了修订。这次修订再版,主要根据新形势下基层计量人员的实际需要内容进行了调整;更新了陈旧、过时的内容;采用了新的计量检定规程和国家标准;增加了最新仪器、仪表介绍和新技术知识等。

本套教材主要供具有中等以上文化程度的、有一定专业实际工作经验的基层计量测试与检定人员、管理人员的短期岗位培训班作教材使用,目的在于使他们经过培训具备开展业务所必备的专业基础知识和基本操作技能。本套教材也可作为质量技术监督行业(相应计量工种)技术工人等级培训与考核的参考教材和相应专业的计量人员的自学用书。

虽经作者和出版社有关人员的多方努力,但本套教材仍难免存在一些这样或那样的问题,望广大读者提出宝贵意见或建议。

最后,在《新编计量技术初级教材》(第二版)问世之际,对参加组织和编写原教材的同志谨致衷心的感谢,他们的辛勤劳动为本套书的出版打下了良好的基础。

中国计量出版社
2006年6月

编 者 的 话

自“新编计量技术初级教材”之一《温度计量》出版至今已有8年。近年来,温度计量及相关技术快速发展。自动化技术突飞猛进,数字式仪表又向前推进了一大步,由一般的模拟数字表跃升为智能化、多用途的智能仪表,能测温度信号(热电势、热电阻)、压力、流量等标准信号。这类仪表目前已广泛地应用于科研及工业生产中。

数字式仪表功能的不断拓展,又把热电偶、热电阻的检定技术向前推进一步,由手动检定逐步实现自动检定。为适应技术发展的需要,国家质检总局颁布了JJF 1098-2003《热电偶、热电阻自动测量系统校准规范》。

鉴于上述原因,此次修订再版,对原书若干内容作了更新调整,增加了第十章“智能化数字温度仪表”以及第十一章“热电偶、热电阻自动检定”两章。

本书主要是供具有中等以上文化程度、有一定实际工作经验的地、县计量部门和厂矿企业温度计量人员短训班使用,其目的是使初级计量人员具有进行业务工作所必备的基础知识,并为他们进一步提高业务能力打下基础。本书也可作为具有相应文化程度的温度计量人员的自学用书。

本书第一、二、三章由汪开道编写;第四、七章由张锦霞编写;第五、六、八章由李吉林编写;第九章由蔡怀礼编写;第十、十一章由俞伦鹏编写。在编写过程中,得到了中国计量出版社陈小林、王红同志的指导和帮助,在此谨致衷心的感谢。

由于我们的水平所限,书中的错误及不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者
2006年3月

目 录

第一章 温度与温标	(1)
第一节 温度的概念	(1)
第二节 温标	(2)
一、经验温标	(3)
二、热力学温标	(3)
三、理想气体温标	(5)
四、国际温标	(8)
第三节 温标的传递	(14)
第二章 膨胀型温度计与压力式温度计	(15)
第一节 玻璃液体温度计	(15)
一、结构与工作原理	(15)
二、玻璃液体温度计的分类	(17)
三、温度计的正确使用	(24)
四、温度计的检定设备	(26)
五、玻璃液体温度计的检定	(31)
第二节 双金属温度计	(35)
一、结构与工作原理	(35)
二、分类	(36)
三、检定	(37)
第三节 压力式温度计	(38)
一、结构与工作原理	(38)
二、分类	(39)
三、正确使用	(39)
四、检定	(40)
第三章 电阻温度计	(45)
第一节 电阻温度计工作原理	(45)
第二节 工业热电阻	(46)
一、结构	(46)
二、热电阻材料	(48)
三、热电阻参数	(48)
第三节 半导体热敏电阻	(49)
一、温度特性	(49)
二、结构与系列	(50)

第四节 标准铂电阻温度计·····	(52)
一、中温标准铂电阻温度计·····	(52)
二、低温标准铂电阻温度计·····	(53)
三、高温标准铂电阻温度计·····	(53)
第五节 电阻温度计电阻值的测量·····	(54)
一、实验室精密测量·····	(54)
二、工业测量·····	(55)
三、电阻温度计的正确使用·····	(56)
第六节 工业铂、铜热电阻的检定·····	(58)
第四章 热电偶·····	(62)
第一节 工作原理·····	(62)
一、热电现象·····	(62)
二、基本定律及应用·····	(66)
第二节 构造·····	(71)
一、热电极·····	(72)
二、绝缘材料·····	(83)
三、保护管·····	(84)
四、接线盒·····	(87)
第三节 类型·····	(88)
一、普通工业用热电偶·····	(88)
二、铠装热电偶(套管式热电偶)·····	(88)
三、薄膜热电偶·····	(89)
四、专用热电偶·····	(90)
第四节 热电偶的正确使用·····	(93)
一、热电偶参考端温度的处理方法·····	(93)
二、热电偶的测量误差及克服方法·····	(98)
三、热电偶的安装及维修·····	(102)
第五节 检定·····	(104)
一、技术要求·····	(104)
二、标准仪器和设备·····	(109)
三、检定方法·····	(114)
四、数据处理·····	(125)
五、热电偶的传递误差·····	(131)
第五章 光学高温计·····	(137)
第一节 概述·····	(137)
第二节 辐射理论基础·····	(137)
一、热辐射·····	(137)
二、辐射能的分配·····	(140)
三、基尔霍夫定律·····	(141)

四、发射率和基尔霍夫定律	(142)
五、普朗克定律	(143)
六、维恩公式	(143)
七、辐亮度温度的概念	(144)
第三节 光学高温计的结构	(145)
一、光学系统各元件的作用与要求	(145)
二、电测系统各元件的作用与要求	(147)
三、光学高温计的测量电路	(150)
第四节 光学高温计的正确使用与维护	(153)
一、工业光学高温计的使用	(153)
二、工业光学高温计的维护和保养	(154)
第五节 影响光学高温计测量准确度的因素及其消除方法	(154)
一、影响因素	(155)
二、求真实温度的方法	(156)
三、用光学高温计测量未知 ϵ_λ 物体的温度	(158)
第六节 国产光学高温计的类型和结构特点	(158)
一、工业用光学高温计	(159)
二、精密光学高温计	(166)
三、标准光学高温计	(169)
第七节 光学高温计的检定	(171)
一、技术要求	(171)
二、检定设备	(172)
三、检定方法	(175)
四、光学高温计 (2000 ~ 3200) °C 示值的检定	(177)
第六章 辐射温度计	(179)
第一节 概述	(179)
第二节 辐射感温器	(180)
一、辐射感温器的工作原理	(180)
二、辐射感温器的分类、结构	(181)
三、辐射感温器与显示仪表	(184)
四、辐射感温器的技术指标	(184)
五、辐射感温器的检定	(185)
六、辐射感温器的正确使用和维护	(188)
第三节 光电温度计	(188)
一、工作原理	(189)
二、结构	(189)
三、主要技术特性	(193)
第四节 比色温度计	(193)
一、工作原理	(194)

二、结构形式	(195)
三、比色温度计的特点	(195)
第五节 红外辐射温度计	(196)
一、工作原理	(196)
二、结构形式	(196)
三、正确使用方法	(196)
第六节 光电、红外、比色温度计的检定	(199)
一、检定用仪器设备	(199)
二、辐射源的构造及正确使用	(199)
三、检定方法	(206)
四、辐射温度计检定结果的处理	(207)
第七节 辐射温度计的发展动态	(207)
一、测量范围及检测器	(207)
二、提高性能和加强功能	(208)
三、向小型化、轻量化发展	(208)
四、光导纤维的应用	(208)
五、扫描热像仪	(209)
第七章 动圈式测量仪表	(211)
第一节 动圈式测量仪表概述	(211)
一、动圈式测量仪表的类型	(211)
二、动圈式测量仪表的特点	(212)
第二节 动圈式温度指示调节仪的原理与结构	(213)
一、动圈式温度指示调节仪测量指示部分	(213)
二、动圈式温度指示调节仪调节部分	(228)
三、XF 系列强力矩动圈仪表	(238)
第三节 动圈仪表的正确使用	(239)
一、误差来源及使用注意事项	(239)
二、动圈仪表的改刻度	(242)
三、动圈仪表的故障现象及原因	(243)
第四节 动圈仪表的检定	(244)
一、技术要求	(245)
二、标准仪器及设备	(250)
三、检定方法及数据处理	(252)
第八章 电子自动平衡显示仪表	(266)
第一节 概述	(266)
一、电子自动平衡显示仪表的类型	(266)
二、电子自动平衡显示仪表型号的命名	(267)
三、电子自动平衡式显示仪表的特点	(267)
第二节 电子电位差计的工作原理	(268)

一、测量桥路的工作原理	(268)
二、电子电位差计中的测量桥路	(270)
第三节 晶体管放大器	(273)
一、变流级	(274)
二、电压放大器	(282)
三、相敏功率放大器	(284)
四、耦合变压器	(290)
第四节 可逆电动机	(291)
一、结构原理	(291)
二、主要技术特性	(293)
第五节 同步电动机与记录装置	(294)
第六节 电子电位差计的正确使用	(296)
一、安装注意事项	(296)
二、正确使用与维护	(296)
三、电子电位差计的干扰问题	(298)
四、数字显示仪表准确度等级的表示方法	(301)
第七节 电子电位差计的检定	(301)
一、技术要求	(301)
二、检定用仪器设备	(303)
三、测试条件	(305)
四、检定项目	(305)
五、检定方法	(305)
六、检定结果处理和检定周期	(308)
第八节 电子平衡电桥	(309)
一、概述	(309)
二、平衡电桥测量线路的基本原理	(309)
第九节 电子平衡电桥的检定	(312)
一、技术要求	(312)
二、检定用仪器设备	(312)
三、检定条件	(312)
四、检定项目	(312)
五、检定方法	(312)
六、检定结果处理及检定周期	(314)
第九章 数字式温度仪表	(315)
第一节 概述	(315)
一、数字仪表的优点	(315)
二、数字指示调节仪的类型	(316)
第二节 数字温度指示调节仪原理	(317)
一、输入电路	(318)

二、非线性修正电路	(321)
三、模-数 (A/D) 转换电路	(326)
四、标准信号输出电路	(331)
五、调节电路	(332)
六、驱动电路	(340)
第三节 数字温度指示调节仪的检定	(343)
第十章 智能化数字温度仪表	(348)
第一节 智能化仪表的概述	(348)
一、什么是智能化仪表	(348)
二、智能化仪表和数字式仪表的区别	(349)
三、智能化仪表主要功能	(350)
第二节 智能化数字温度仪表的种类	(355)
一、智能化温度控制仪表	(355)
二、智能化温度测量和记录仪表	(358)
三、智能化多功能温度综合仪表	(360)
第三节 智能化数字温度仪表工作原理	(360)
第四节 智能化数字温度仪表的检定	(362)
第五节 智能化数字温度仪表的发展方向	(365)
第十一章 热电偶、热电阻自动检定	(367)
第一节 热电偶、热电阻自动检定系统的组成	(367)
一、常规热电偶检定系统的组成	(368)
二、热电偶自动检定系统的组成	(369)
三、常规热电阻检定系统的组成	(369)
四、热电阻自动检定系统的组成	(371)
五、低温热电偶的检定	(371)
六、热电偶、热电阻完整的自动检定系统	(372)
七、热电偶、热电阻常规检定系统和自动检定系统在硬件设备上的区别	(372)
第二节 热电偶、热电阻自动检定系统的设备和检测方法	(373)
一、标准器	(374)
二、热电偶检定炉和温度控制器	(376)
三、恒温槽	(382)
四、数字多用表	(389)
五、程控低热电势切换开关	(389)
第三节 热电偶、热电阻自动检定系统的连接	(390)
一、检定信号线布线和连接	(391)
二、检定设备的连接	(391)
三、通讯方式的设定	(391)
第四节 热电偶、热电阻自动工作软件	(391)
一、系统的连接检查	(392)

二、标准检定证书数据更新	(392)
三、控制参数的修改	(393)
四、检定信息输入和参数设置	(394)
五、自动检定	(396)
六、数据查询处理输出	(397)
七、辅助功能	(398)
第五节 自动检定系统的考核	(398)
一、校准结果不确定度验证	(399)
二、重复性测试	(400)
三、恒温性能测试	(400)
四、测量数据结果处理验证	(400)
第六节 自动检定系统的不确定度分析	(400)
一、热电偶自动校准系统不确定度分析	(400)
二、热电阻自动校准系统不确定度分析	(404)

第一章 温度与温标

第一节 温度的概念

人们在日常生活和工作中，经常会遇到许许多多冷与热的现象。凭借我们的感觉器官，可以分辨出物体的冷和热。比如，众所周知的天气谚语：“热在三伏、冷在三九。”夏季“三伏”天使人感到“闷热”，而冬季“三九”天则使人感到异常寒冷。人得了病，常会感到浑身发烧，一旦病除，又会恢复正常。靠近火炉，会使你感到“烤得很”，进了冷库则会感到“冻得很”。汽车运行了一段时间，发动机要发热，停驶以后发动机又逐渐“冷”下来。但是，光凭人们的感觉，有时也靠不住，甚至得出错误结论。如果恒温室的电测工作台上，放置着一块铝板和一块绝缘橡皮，当我们用手分别触及它们时，由于铝板比绝缘橡皮的导热性能好，常常会使我们错误地感觉到铝板比绝缘橡皮“冷”。由此可见，光凭感觉，不但不能定量地表示出物体的冷热程度，有时还会得出错误的结论。

怎样才能科学地、定量地表示出物体的冷热程度呢？这就要借助于“温度”这个物理量。按照人们的习惯，在确定温度数值的时候，使较热状态具有较高的温度数值，较冷状态具有较低的温度数值。所以，温度是描述物体冷热程度的物理量。

温度概念的建立以及温度的测量，都是以热平衡现象为基础的。两个冷热程度不同的物体，当它们互相接触以后就会产生热量交换，使原有的平衡状态受到破坏，较热的物体逐渐变冷些，较冷的物体逐渐变热些，经过一段时间以后，就不再发生热量交换，两个物体处于同样的冷热状态，即称为处于热平衡状态。

如果两个物体分别和第三个物体处于相同的热平衡状态，则将这两个物体互相接触时也必然处于同样的热平衡状态。这个实验事实就称为热平衡定律。由热平衡定律可以得知，处于同一个热平衡状态的物体必定拥有某个共同的物理性质，而温度就是表征这种物理性质的一个量。所以，处于同一热平衡状态的物体具有相同的温度。这是温度最基本的性质。在比较每个物体温度的时候，不必让它们互相接触，只要将一个被选做“标准”的物体分别与每个物体接触就行了。这个被选做标准的物体就是测量物体温度的温度计。这就是使用温度计测量温度的原理。

上述的温度定义仅仅是定性的，还是不完全的，完全的定义还应当包括温度的数值表示方法。温度这个物理量还有一个特性，那就是温度本身具有的标志性。两个受热状态不同的物体，它们只能被标志成温度的高低不同，而不能说某物体的温度是另一物体温度的几倍，换句话说，两个物体的温度的数值是不能相加的，否则是毫无意义的。

温度也是一个重要的物理量，经常用它来表征物体冷热的程度。国际单位制（简称 SI）规定了 7 个基本单位，温度就是其中之一。

热力学温度的单位是开尔文（K）。1 K 等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

目前,国际上通用的温标是国际温标(符号 ITS),它能在各国得到复现,从而将温度量值逐级传递,直到各种测温仪表。

第二节 温 标

为了定量表示物体的冷热程度,必须用数值将温度表示出来。用数值表示温度的方法称为温度标尺,简称温标。

建立任何一种温标都必须具备以下 3 个条件。

1. 测温仪器

确定测温仪器的实质是确定测温质和测温量。利用某种物质的物理性质(如热膨胀、热电阻等)随温度的改变而变化的特性进行温度测量。这种被用来测定温度的物质称为测温质,用来测定温度的物理量称为测温量。例如利用水银体积随温度的变化来测定温度的水银温度计和利用铂丝电阻值随温度变化来测定温度的热电阻等,其中水银和铂丝就是测温质,而热膨胀的高低和热电阻随温度的变化量则是测温量。

2. 固定温度点

任何物质都是由分子组成的,在不同条件下通常都可以呈现为固体、液体、气体三种不同状态,称为物质的三“态”或三“相”。在一定条件下物质的三相可以互相转化,或是维持在两相或三相共存的平衡状态。

利用一些物质的“相”平衡温度(如水的汽相和液相的平衡温度——水沸点,水的液相和固相的平衡温度——冰点等)作为温标基本点,并对每个点的温度给以确定的数值。这些点就称为固定温度点(被选用的固定温度点的数值应当恒定,固定点的实现装置也应当便于制造和复现)。

3. 温标方程

用来确定各固定点之间任意点温度数值的数学关系式。以线性关系为例,设 y 为测温量; t 为温度。则有:

$$y = Kt + C \quad (1-1)$$

式中: K ——待定比例系数;

C ——决定于初始值的常数。

利用两个已知温度数值 t_1, t_2 的固定温度点,可以求出常数 K 和 C :

$$y_1 = Kt_1 + C \quad (1-2)$$

$$y_2 = Kt_2 + C \quad (1-3)$$

两式相减得:

$$K = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}$$

将 K 值代入上式中之一式得:

$$C = y_1 - \left(\frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \right) t_1$$

将 K, C 值代入式 (1-1), 得到线性温标方程如下:

$$t = \left(\frac{t_2 - t_1}{y_2 - y_1} \right) y + \left[t_1 - \left(\frac{t_2 - t_1}{y_2 - y_1} \right) y_1 \right] \quad (1-4)$$

一、经验温标

由特定测温质、特定测温量所确定的温标称为经验温标。

17 世纪初, 伽利略制做成的第一个测温器只能定性的测定温度。直到 1660 年福洛伦丁提出了第一个温标。他规定用玻璃酒精温度计测定温度, 以当地冬季最冷之日的温度定为 11 度, 夏季最热之日的温度定为 40 度。其后又有很多人提出了不同形式的温标, 其中影响较大的是摄氏温标和华氏温标。

1714 年德国人华伦海脱 (Fahrenheit) 制造了玻璃水银温度计。他规定水的沸腾温度为 212 度, 氯化氨和冰的混合物为 0 度, 用来标定玻璃水银温度计。温度计两固定温度点之间的距离等分为 212 份, 每一等分称为华氏一度, 记做 1°F 。这种标定温度的方法称为华氏温标。冰的融化温度相当于 32°F 。

1740 年瑞典人摄尔塞斯 (Celsius) 把冰的融化温度规定为 0° , 把水的沸腾温度规定为 100° 。用这两个固定温度点来标定玻璃水银温度计, 将两固定温度点之间的距离等分为 100 份, 每一等分称做摄氏一度, 记做 1°C 。这种标定温度的方法称为摄氏温标。

华氏度 t_{F} 与摄氏度 t_{C} 的换算关系如下:

$$\therefore \frac{t_{\text{C}}}{t_{\text{F}} - 32} = \frac{100}{212 - 32} \quad (1-5)$$

$$\therefore t_{\text{C}} = \frac{5}{9}(t_{\text{F}} - 32) \quad (1-6)$$

$$t_{\text{F}} = \frac{9}{5}t_{\text{C}} + 32 \quad (1-7)$$

经验温标的缺点在于它的局限性和任意性。特别是后者, 它来源于选择测温量和测温质的任意性。如果温标选定的温度计是玻璃水银温度计, 那么就不能用玻璃酒精温度计去测定温度。此外, 还有经验温标的上限和下限都受特定物的限制, 不能超过规定值。如果超过规定值就不能标定温度了。

二、热力学温标

如前所述, 经验温标具有局限性和任意性两个缺点, 因而是科学的。只有超脱于任何特定物质, 而由普遍适用的自然规律所决定的温标, 才能将温度计量建立在科学的基础上。

由于温度这个物理量在热力学中占有特殊地位, 所以对温度进行标志所选定的普遍适用的自然规律, 应在热力学范围以内。这项工作是由物理学家开尔文 (Kelvin) 在 1848 年完成的。他所提出的以热力学第二定律为基础的热力学温度于 1967 年第十三届国际计量大会上被正式肯定, 并将热力学温度的单位开尔文 (符号 K) 列为国际单位制 (SI) 7 个基本单位之一。

为了弄清热力学温标的含义, 必须对热力学的基本内容有所了解。热力学是以经验为基础, 以热能和功之间的转换和热运动为研究对象的科学。为了叙述方便, 以下简要介绍热力学第一定律、第二定律和卡诺定理等基本概念。

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。其主要实质是能量守恒和能量转化定律在热现象上的应用。它可以简略概括为: 热是能的一种, 当它与另外形式的能或功之间转换时, 总量不变。热力学第一定律指明, 不消耗任

何能量而做功或用较少能量而做较多功的机器是不可能实现的。人们把这类机器称为第一类永动机。所以热力学第一定律又可以简叙为第一类永动机是不可能实现的。

热力学第一定律指明了热过程的能量关系,但没有说明热过程进行的方向。而热力学第二定律指明了热过程进行的方向。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。定律本身有不同的说法,但在实质上都是等效的。

克劳修斯对热力学第二定律的解释是这样的:不可能制造出一种循环动作的机器,把热量自低温物体传送到高温物体,而且不消耗其他形式的能量。

开尔文提出:不可能制造出一种循环动作的机器,它只使一个热源冷却而动作,而使其他物体不发生任何变化。

上述这一类机器被称为第二类永动机。所以热力学第二定律也可以简叙为第二类永动机也是不可能实现的。

卡诺定理的提出,远在热力学第一定律和第二定律明确之前,并且成为热力学第二定律的出发点。但是,卡诺定理的严格证明,必须依赖热力学第一定律和第二定律的明确叙述。

卡诺定理可简述如下:所有工作于两个恒定温度热源之间的热机,以可逆热机的效率最高,并且所有可逆热机效率相等。

遵守卡诺定理的可逆热机热效率 η 为:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1-8)$$

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:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

则:

$$T_1 = \frac{Q_1}{Q_2} T_2 \quad (1-9)$$

这就是说,工作于两热源之间的卡诺热机,其与两热源之间交换热量之比等于两热源温度之比。

1848 年开尔文建议,利用卡诺定理及其推论,可以建立一个与测温质无关的温标,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亦称绝对温度。用符号 K 表示。它选用卡诺热机作为测量量(即温度计),而选择热量比作为测量量(即温度计参数)。

如拟测定或标志某待测热源的热力学温度数值 T ,需先确定具有水三相点热力学温度 T_3 的热源为标准热源,并指定其标志的数值为 273.16 K(即 $T_3 = 273.16$ K)。利用卡诺机进行测温,令其工作在 T 与 T_3 两热源之间。则卡诺机与两热源之间交换热量之比,与两者热力学温度数值之比应相等。即:

$$\frac{T}{T_3} = \frac{Q}{Q_3} \quad T = \frac{Q}{Q_3} T_3 = \frac{Q}{Q_3} 273.16 \quad (1-10)$$

此时,用卡诺机来测定比值 Q_1/Q_3 , 就可由公式求出待测热源的热力学温度数值。式(1—10)就是热力学温标的温标方程。

由热力学温标所确定的待测热源的温度称为热力学温度。它为温度计量奠定了牢固的科学基础。热力学温度的内容既包括了热力学温度的定义,也包括了热力学温度单位的定义。前者是后者的基础,后者是前者的补充。热力学温标是以热力学第二定律为理论基础,只有在严格的热力学温度和热力学温度单位的定义确定之后,才能依照温度本身的比较意义来进行温度测量。这里所说的测量只是一种手段,其最终目的是要对温度进行标志。

热力学温度单位开尔文(符号 K)是水三相点热力学温度的 $1/273.16$,它是在热力学温度定义基础之上,首先确定了水三相点热力学温度的标志数值,再取其 $1/273.16$ 定为开尔文,将计量单位 K 加在所标志的温度数值上就形成了完整的量值表示形式,它可以不受限制地对任何温度间隔的任何温度给以科学的标志。

热力学温度不能根据其定义直接实现,因为直接测定其温度必须测量卡诺机在工作过程中的热量变化,而热量变化不能直接测量,它又必须依赖于温度的测量来确定。

可以证明理想气体温标与热力学温标是完全等值的。所以,热力学温标的实现可以借助于理想气体温标。在一定范围内的热力学温度可直接由气体温度计进行测量,超出这一范围,气体温度计不能正常工作。因而在极高温区是以黑体辐射的普朗克公式来确定温度,而在极低温区,则采用声学测温法和磁学测温法来确定温度。它们同样是以热力学第二定律为基础导出的,所以仍然称作热力学温度。

由于历史原因,联系到温标原始定义的方法,仍然保留了摄氏温标的形式,给予热力学温度以第二种表示方法——摄氏温度(符号 t)。摄氏温度的单位是摄氏度,符号 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏度与开尔文完全是等值的。表示温度差时可用开尔文表示,也可用摄氏度表示。

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta t(^{\circ}\text{C})$$

其中:

$$t = T - T_0, T_0 = 273.15 \text{ K}$$

故:

$$t = T - 273.15$$

$$T = t + 273.15$$

通常在 0°C 以下习惯用开尔文表示,而在 0°C 以上用摄氏度表示,这样可以避免使用负值。两者之间的关系可用图 1—1 表示。

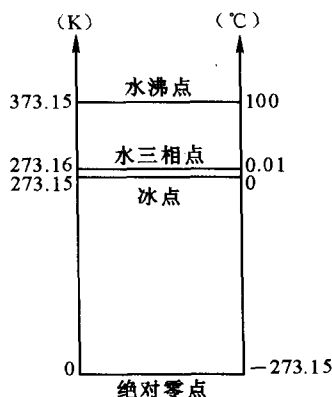


图 1—1 K- $^{\circ}\text{C}$ 对应图

三、理想气体温标

以理想气体的绝对零度 T_0 及水三相点温度 T_3 为两个定义固定点,并确定其温度数值的指定值分别为 $T_0 = 0 \text{ K}$, $T_3 = 273.16 \text{ K}$ 。由遵守气体实验三定律的理想气体所决定的温标就称为理想气体温标。

一定质量的气体,其热平衡状态可以由它的压强 p , 体积 V , 温度 T 这三个物理量来描述。 p , V , T 称为气体的状态参量。气体实验三定律是以大量的实验为基础,以理想气体为研究对象,利用真实气体经过修正,通过 p , V , T 三个气体状态参量来描述理想气体热