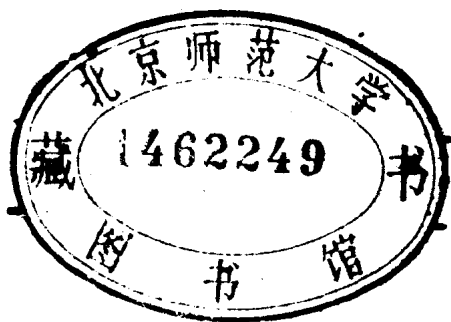


物理实验丛书

热 学 实 验

陆申龙 郭有思 编

JY1/35/17



上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书系根据我国高等院校普通物理实验中有关热学实验内容以及作者在复旦大学物理系从事实验教学工作及科教仪器研究工作的实践经验编写而成的。作者在编写过程中还参阅了国内外有关热学实验资料, 尽量使经典的和一些新的实验和方法都能反映到本书中。

本书共分两大部分: 第一部分是第一和第二章, 主要叙述有关测温学和量热学的基础知识。第二部分是第三章至第七章, 主要叙述了测温学、量热学、潜热、导热、热膨胀等方面的基本实验。

本书可供大专院校理工科师生、中等专科学校物理教师以及从事有关物理实验的科技工作者参考。

物理实验丛书

热 学 实 验

陆申龙 郭有思 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海东方印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 8.5 字数 185 000

1988 年 3 月第 1 版 1988 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1—3,900

ISBN 7-5323-0201-6/O·12

定价: 2.55 元

前 言

热学实验是物理实验的一个重要组成部分。在生产建设 and 科学研究中,热学实验有着广泛和重要的应用,在物理实验教学中热学实验也逐渐被人们所重视。本书主要根据作者在复旦大学物理系从事实验教学工作及科教仪器研究工作的实践经验编写而成的。在编写过程中还参阅了国内外有关热学实验资料,尽可能使经典的和一些新的实验和方法都能反映到本书中。对同一个物理量用多种方法测量,本书还进行了一定的分析和比较,便于读者选用。

本书共分两大部分:第一部分是第一和第二章,主要叙述有关测温学和量热学的基础知识。第二部分是第三章至第七章叙述测温学、量热学、潜热、导热、热膨胀等方面的基本实验。

· 华惠迪先生曾为本书草拟过编写目录。在编写过程中,还得到孙燕清、金浩明等同志的帮助,他们为本书提供一些实验资料。特别是华东师范大学物理系马葭生同志对全书初稿进行了认真仔细的审阅,提出了许多宝贵意见,在此一并表示感谢!

本书第一、三、五、七章和附录由陆申龙编写,第二、四、六章由郭有思编写。由于水平有限,本书不可避免存在许多不足之处,敬请读者不吝指正为幸。

编 者 1985年8月

目 录

前言

第一章 测温学	1
§ 1 温度	1
§ 2 温标	3
§ 3 固定点	12
§ 4 温度计	17
§ 5 恒温槽	46
§ 6 标准温度灯	56
§ 7 黑体炉	59
第二章 量热学	63
§ 1 热量与量热学	63
§ 2 热容及比热容	65
§ 3 冷却的经验公式	66
§ 4 常用的量热方法	68
第三章 测温学实验	83
§ 1 比较法校准玻璃水银温度计	83
§ 2 定点法校准玻璃水银温度计	88
§ 3 定点法对铜-康铜热电偶温度计定标	95
§ 4 比较法校准热电偶温度计	101
§ 5 铂电阻温度计的电阻与温度关系测定	106
§ 6 热敏电阻的电阻——温度特性测定	111
§ 7 用定容气体温度计测定空气的压强系数	115
§ 8 光学高温计的校准	119
第四章 量热学实验	122

§ 1 焦耳实验	122
§ 2 能量转换实验	125
§ 3 气体定容比热容的测定	128
§ 4 气体定压比热容的测定	130
§ 5 气体比热商的测定	133
§ 6 固体比热容的测定	139
§ 7 液体比热容的测定	149
§ 8 金属在低温下的热容量	153
第五章 潜热实验	155
§ 1 混合法测定液体的比汽化热	155
§ 2 电测法测定水的比汽化热	164
§ 3 称衡法测定液氮的比汽化热	166
§ 4 电测法测定液氮的比汽化热	173
§ 5 混合法测定冰的比熔解热	176
§ 6 电测法测定冰的比熔解热	181
§ 7 金属比熔解热的测定	185
第六章 对流与热传导实验	189
§ 1 对流	189
§ 2 研究冷却规律的实验	190
§ 3 热传导	195
§ 4 测定不良导体导热系数的实验	197
§ 5 测定金属导热系数的实验	201
§ 6 流体导热系数的测定	211
第七章 热膨胀实验	216
§ 1 固体线膨胀系数的测定	216
§ 2 用比重瓶测量液体的体膨胀系数	222
§ 3 用膨胀计测定液体的体膨胀系数	226
§ 4 用杜隆-珀替法测定液体的体膨胀系数	231
§ 5 用 Matthiessen 的方法测定液体的体膨胀系数	234
§ 6 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$ 时水的反常膨胀的研究	240

§ 7 用比重瓶测定气体的热膨胀系数	247
§ 8 用集气法测定气体的热膨胀系数	251
附录 常用物理量及数表	255
1. 部分热学量的法定计量单位与旧制单位的换算关系	255
2. 铂铑-铂热电偶分度表	256
3. 镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶分度表	257
4. 铜-康铜热电偶分度表	258
5. 铂热电阻分度表	258
6. 水在不同大气压强时的沸点值	259
7. 水在不同温度时的密度	259
8. 水在不同温度时的比热容	260
9. 在 25°C 时金属的比熔解热、比热容和线膨胀系数	260
10. 液体的体膨胀系数、比热容、凝固点和沸点	261
11. 在 15°C 时不同气体的比热容比 γ 的实验值	261
12. 国内三个不同生产厂康铜丝的化学成份	261
13. 金属及其合金的导热系数、熔融温度和密度	262
14. 无机及有机材料的导热系数和密度	263

第一章 测 温 学

§ 1 温 度

人类在长期的生活和生产活动中，通过感觉器官与外界接触，早已形成了冷和热的概念。虽然凭借人的直接感受，人们可以判别物体的冷热程度，但是这样辨别物体的冷热，不仅范围狭小，不能定量，而且也很不可靠。譬如，在寒冷的环境中，用手接触桌面上的黄铜块就比接触木制的桌子冷得多，这是因为黄铜比木材有较良好的热传导性。所以，要准确地辨别物体的冷热程度，不能凭主观感觉，必须采用精确的实验仪器和科学的测量方法。

随着生产实践和科学研究的深入，人们逐渐认识到物体的许多物理和化学性质与它的冷热程度有关，科学地测定物体的冷热程度显得越来越重要。为此，人们引进了温度这个物理量，以表征物体的冷热程度。

为了分析和解决实际中提出的各种热学问题，必须对温度概念作出一个严格的科学定义。温度概念的建立和温度的定量测量都是以热平衡现象为基础的。假设有两个物体它们各自达到了一定的平衡态，现将这两个物体相互接触，一般情况下，由于两个物体之间没有达到热平衡，它们之间将发生热交换，于是两个物体的原平衡态都将受到破坏，但是实验证明，经过一定时间后，两个物体相互之间达到了热平衡。进一步，我们研究 A 、 B 、 C 三个物体。若 A 物体和 B 物体互相热

接触并作为组合系统处在平衡态,而 A 物体和 C 物体互相热接触并作为组合系统处于平衡态,则实验证明,将 B 物体和 C 物体热接触而作为作为一个组合系统时,此组合系统也必处于平衡态。因此,两个物体同时和第三个物体热平衡时,这两个物体彼此之间也必热平衡,这个结论通常叫做热力学第零定律。热力学第零定律为温度概念的建立提供了实验基础,根据这个定律,温度的定义可以这样来表述:当两个(或几个)系统进行热接触而达到热平衡时,我们把这两个(或几个)系统看成具有相同的性质,此性质确保它们之间已达成热平衡,此性质称为温度。可见,处在相互热平衡态的一切物体都具有相同的温度,这样人们就可以取一个标准物体(测温仪器)与待测物体处于热平衡,以测量物体的温度,测量温度的仪器通常称为温度计。温度计是这样一种仪器,当它与待测物接触进行热交换时,它只有一个宏观参量改变,这个参量为温度计的测量参量。例如水银温度计的测量参量为玻璃毛细管中的水银柱长度,金属电阻温度计的测量参量为金属丝的电阻值等。

随着热学的进一步发展,人们用气体分子运动论来解释许多热现象,从而对温度的概念有了更本质的认识。从理想气体的压强公式及状态方程,导出了气体的温度与分子的平均平动能之间的关系满足下面等式:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT,$$

其中 $\bar{E}$ 为气体分子的平均平动能, k 为玻尔兹曼常数, T 为气体的热力学温度。此式揭示了宏观量温度与微观量气体分子的平均平动能的关系,说明气体分子的平均平动能只与温度有关,且与热力学温度成正比,这就是从微观的分子运动论

观点来解释温度。因而又可以这样来表述温度概念, 温度标志着物体内部分子运动的剧烈程度, 温度越高就表示平均说物体内部分子运动越剧烈, 所以温度是统计的结果, 是大量分子热运动的集中表现。

§ 2 温 标

生产和科学实验往往需要精确地测定或控制温度。要测定温度就必须制定测定温度的标准, 并以数值表示温度。温度的数值表示方法叫做温标。用不同的温标测量同一物体的温度, 会得出不同的数值。下面介绍几种人们常见的温标。

一、华氏温标和摄氏温标

所谓建立温标, 就是确定温标的分度方法。温标的建立有一历史过程。早在 1660 年人们就开始用酒精温度计测定物体的温度, 并开始建立温标。

早期建立温标的过程大致分下面几步: 1. 确定合适的工作物质制成温度计, 作为实现温标的仪器。2. 选定两个比较容易获得, 而且具有适当温差的固定点(通常是高纯物质各相平衡共存时的温度)作为原始分度点。3. 规定这二个固定点的温度数值, 以便确定温标的基本间隔。华氏温标和摄氏温标就是这样建立的。

1714 年, 德国物理学家华伦海脱(Fahrenheit)采用水银在玻璃管内膨胀来指示温度, 从而建立了华氏温标。当时, 他选氯化氨、冰和水混合物的熔点作为 0 度, 这大体相当于当地冬天最低温度, 而把冰水混合物的温度定为 32 度。然后把两点间长度 32 等分, 每小格代表华氏 1 度, 写作 1°F 。水的沸点

在华氏温标中为 212°F 。这样定义使水的沸点和冰点相差 180°F ，恰好相当于半圆的“度”数，而人的体温按华氏温标计算非常接近 100°F 。历史上，华氏温标曾在相当长时间内在许多国家被采用，现在部分讲英语的国家内尚在使用。而在我国物理学和工业上早已不用华氏温标。当然，在我国个别生产的温度计上还标有华氏温度，有些手册上还有华氏温度计量的物理资料。

1742 年，瑞典天文学家摄尔修斯(Celsius)用水银温度计建立了所谓摄氏温标，在他的温标中把冰点定为 100°C ，水的沸点定为 0°C ，二固定点之间均分为 100 格，每格称为摄氏 1 度，二固定点以外的温度，同样按比例外推。由于习惯上把较热的物体定为较高的温度，所以后来由他的助手将固定点数值改过来，定义冰的熔点为 0° ，水的沸点为 100° ，摄氏温度以符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。这就是在相当长时间内被各国广泛采用的摄氏温标。

上述华氏温标和摄氏温标都是经验温标，有一定局限性和任意性。它们都是根据一种特定物质，如：酒精或水银的体积随温度作线性变化来定义温度的，由于温度计材料和测温物质的限制，使用的温度范围较小。且用不同物质如水银或者酒精分别制成温度计，以同样的方法标定 0°C 和 100°C ，并作同样的 100 等分，用这两支温度计去测量同一个温度(0°C ， 100°C 除外)时，它们所指示的温度值不完全一样。甚至同样是水银，只是一支温度计的水银多于另一支温度计的水银，测量同一温度时指示值也不可能完全一样。这就说明这样来标定的温度还与工作物质有关，这对准确地测量温度带来困难。为此，必须建立更科学的温标，用此温标标定的温度与测温物质本身的性质无关。

二、热力学温标

建立在热力学第二定律基础上的热力学温标是令人满意的科学温标。此温标是 1848 年开尔文(Kelvin)首先提出,所以有时也称开尔文温标。

根据卡诺定理,工作于两个一定温度之间的一切可逆卡诺热机的效率与工作物质的性质无关,只与两个热源的温度有关。现在设有温度为 θ_1 、 θ_2 的两个恒温热源,其中 θ_1 、 θ_2 可以是任何温标所确定的温度。一个理想的可逆热机工作于 θ_1 、 θ_2 之间,它在 θ_1 处吸热 Q_1 ,向 θ_2 处放热 Q_2 ,其效率 $\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$,只与两个温度有关,与工作物质的性质和吸收热量及做功多少无关,即可逆机的效率仅是温度的函数。因此有:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = F(\theta_2, \theta_1), \quad (1-1)$$

在上式中, $F(\theta_2, \theta_1)$ 是 θ_1 、 θ_2 的普适函数,它与工作物质的性质及热量 Q_1 和 Q_2 的大小无关。

可以证明(略) $\frac{Q_2}{Q_1} = F(\theta_2, \theta_1) = \frac{f(\theta_2)}{f(\theta_1)}$, 其中 f 为另一普适函数,这个函数的形式与经验温标 θ 的选择有关,但与工作物质性质及 Q 的大小无关。

开尔文选择 $f(\theta) = T$, 从而确定了热力学温标 $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$, 如果再考虑水三相点热力学温度 $T_3 = 273.16\text{K}$, 此温标方程可改写为 $T = T_3 \frac{Q}{Q_3}$, 从而得到现在的热力学温标的插补公式。

热力学温标是建立在热力学基本定律基础上的最科学的理想温标。此温标的三个要素可以这样来理解: 温标的标准仪器即为卡诺热机; 水的三相点是温标定义的固定点; 温标插

补公式是 $T = T_3 \frac{Q}{Q_3}$ 。

若以水的沸点(1个大气压时)作100度,以冰的熔点作0度,这样导出的热力学温标称为百分度热力学温标。以符号 t 表示,单位 $^{\circ}\text{C}$ 。以后又改称为摄氏热力学温标。如果把 -273.15°C 当作零度,这样的热力学温标称为绝对热力学温标。用符号 T 表示,单位 K 。现在通常将绝对热力学温标简称为热力学温标。由于热力学温标能对所有各种范围内的温度给出明确的意义,又与任何测温物质无关,所以它被国际计量大会采纳作为最基本的温标。

热力学温标是一种纯理论性的温标,因为实际上不存在无摩擦的理想热机,也不存在进行得非常慢的可逆过程。因此,直接用实验方法来实现热力学温标是困难的,必须另找途径。为此,人们设想用理想气体为测温物质,同样采用水三相点 $T = 273.16\text{K}$ 为定义固定点,以理想气体的状态方程式 $PV = RT$ 建立温度内插公式,从而建立理想气体温标,并以理想气体温度计来复现热力学温标。

三、理想气体温标

通过长期的研究,人们发现,理想气体温度计可以用来复现热力学温标。下面着重讨论如何用定容气体温度计(在气体体积保持不变条件下,用气体的压强作为测温标志)建立理想气体温标。

设用 $T(P)$ 表示定容气体温度计与待测系统达到热平衡时的温度值,用 P 表示这时用温度计测得并经修正的气体压强值。规定 $T(P)$ 与 P 成正比,即令

$$T(P) = \alpha P, \quad (1-2)$$

式中的 α 是比例系数,它需要根据选定的固定点来确定。

国际上已把冰、水与水蒸汽三者平衡共存点,即水的三相点规定为标准定点。水的三相点的热力学温度是 273.16 K , 热力学温度的单位“开尔文”等于水的三相点热力学温度的 $\frac{1}{273.16}^{\circ}$ 。

设用 P_{tr} 表示气体在三相点时的压强, 则代入(1-2)式可得

$$273.16\text{ K} = aP_{tr},$$

即

$$a = \frac{273.16\text{ K}}{P_{tr}}^{\circ}$$

由此, 可得

$$T(P) = 273.16\text{ K} \frac{P}{P_{tr}}, \quad (1-3)$$

利用(1-3)式可由测得气体的压强 p 来确定待测温度 $T(P)$ 。

图 1-1 给出几种不同气体的定容气体温度计测量 1 个大气压下水的沸点的温度, 得到温度值 T 随气体压强 P_{tr} 变化情况。

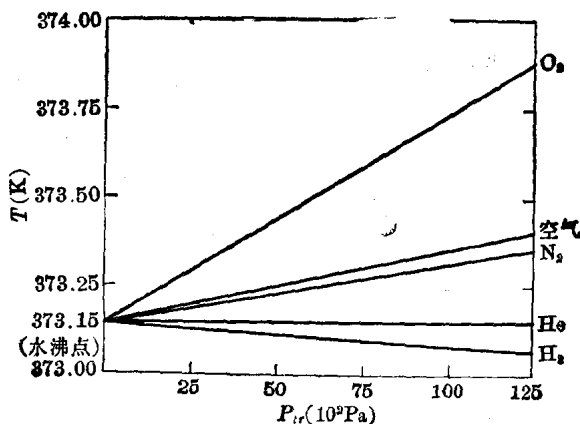


图 1-1

由图 1-1 中可以看出,当压强小于 12500 Pa 时,用几种不同气体制作的定容气体温度计所测得的温度差别很小,氢与氧差别最大,也只有 0.8 K。气体的压强 P_{tr} 越低,即测温泡内的气体越稀薄,不同气体定容温标差别越小;当压强 P_{tr} 趋于零时,各种气体定容温标差别完全消失,给出相同的温度值 373.15 K。由此得出的温度数值只与气体的普遍性质有关(因为都要外推至压强为零),而与任何特定的气体无关,这就是所谓的理想气体温标。即

$$T = 273.16 \lim_{P_{tr} \rightarrow 0} \frac{P}{P_{tr}}, \quad (1-4)$$

(1-4)式所定义的定容气体温度计为标准温度计。

理想气体温标与热力学温标一样,都与工作物质无关。热力学温标只是一种理想温标,理想气体温标由于在它所能确定的温度范围内几乎等于热力学温标,所以它使热力学温标取得了现实意义。在温度计量工作中,在很大的温度范围内,都是用理想气体温度计来测量物体的热力学温度的。当然由于气体性质限制,理想气体温标对极低的温度(氮气的液化点 1 K 以下)和高温(1000°C 是上限)还是不适用的。

四、国际实用温标

热力学温标是与工作物质无关的理想温标,但属纯理论性的温标,不能直接实现。气体温标可以通过对它与理想气体的偏差进行修正,使之符合热力学温标。但由于气体温度计结构复杂,使用时要进行各种修正,在实际工作中用它来复现热力学温标很不方便,因此在本世纪初,国际上趋向于找出一种在使用上可以方便些,能够用计算公式来表示的温标,以统一各国之间的温度计。显然,选择的原则应该是:1. 尽可能与热力学温标一致。2. 复现的精度高。各国都能以很高

的准确度复现同样的标准,以保证温度量值的统一。3. 使用方便。经过一段时期的研究,1927年第七届国际计量大会决定采用以六个固定点为基础的国际温标,称为1927年国际温标(ITS-27)。这六个固定点是:氧沸点、冰熔点、水沸点、硫沸点、银凝固点和金凝固点。ITS-27温标还包括一些插补公式及公式中的常数确定。

但随着长期的实践,人们逐渐地发现ITS-27存在着许多不足之处,如以冰熔点作为基本固定点,不够科学。由于大气中水蒸汽含量及冰与水的比例多少都对冰熔点有影响,复现精度差些。另外有的插补公式不够好等等。因此,在1948年第九届国际计量大会对ITS-27作了九处重大的修改,决定以水的三相点作为基本参考点,以代替冰熔点,使其具有更高的复现性。并定名为1948年国际温标:ITS-48。

1960年又对ITS-48进行了六处修改,而将1948年国际温标改名为1948年国际实用温标: IPTS-48。这一温标一直沿用到1968年。

随着科学技术的发展,在温标研究方面又取得了许多进展,气体温度计的测量精度也不断提高。从而发现IPTS-48与热力学温标之间仍存在不少差异。如金的凝固点,按照IPTS-48是 1063°C ,而由现在的气体温度计测量为 1064.43°C ,差了 1.43°C ,对于基准来说,这个差值就相当可观了,必须予以更正。其他基准点也有类似的情况。同时,IPTS-48的插补公式也必须作一些修改,才能使定义固定点间的温度尽可能和热力学温度更加接近。同时,IPTS-48的温度下限是氧沸点(-182.93°C 即 90.18 K),而近年来,低温技术有了很大的发展,应用也日益广泛。如平衡氢固态、液态、气态的平衡(平衡氢三相点)温度为 13.81 K (即 -259.34°C),比氧沸点低得多。

现代工业生产和科学实验广泛采用的是 1968 年国际实用温标 (IPTS-68)。这是 1968 年 10 月国际计量委员会对 1948 年国际实用温标 (1960 年修正版) 作了重要修改而建立的。在 1968 年国际实用温标中, 国际实用开尔文温度和国际实用摄氏温度是分别用符号 T_{68} 和 t_{68} 来表示。它们之间的关系是:

$$t_{68} = T_{68} - 273.15, \quad (1-5)$$

T_{68} 单位采用开尔文(符号 K),

t_{68} 单位为摄氏度(符号 $^{\circ}\text{C}$)。

摄氏温标现已废弃不用。现在用的摄氏度是指国际实用摄氏度而言, 与旧摄氏度意义不相同。旧摄氏度是以水银为测温物质来实现的, 它没有排除工作物质特性的影响, 而现在用的摄氏度则是以热力学温标为基础, 并用气体温度计来复现的。摄氏温度单位的名称或符号必须作为一个整体使用, 不得拆开。例如: 摄氏温度单位摄氏度表示的量值应写成并读成“20 摄氏度”, 不得写成并读成“摄氏 20 度”。

下面表 1-1(a) 列出了 1968 年国际实用温标定义的固定点。

表 1-1(b) 列出其他的一些固定点。

IPTS-68 温标规定四个温区及各温区的标准器:

- | | |
|--|-------------------|
| (1) 13.81~273.15 K
(-259.34~0 $^{\circ}\text{C}$) | } 以铂电阻温度计为标准器 |
| (2) 273.15~903.89 K
(0~630.74 $^{\circ}\text{C}$) | |
| (3) 903.89~1337.58 K
(630.74~1064.43 $^{\circ}\text{C}$) | 以铂铑(10%)-铂热电偶为标准器 |
| (4) 1337.58 K 以上
(1064.43 $^{\circ}\text{C}$ 以上) | 以光学高温计为标准器 |