

大学物理学

第二册

(美) F·W·SEARS 等著
郭泰运 等译

人民教育出版社

大学物理学

第二册

[美] F. W. Sears 等著

郭泰运 等译

人民教育出版社

内 容 提 要

本书根据美国 Addison-Wesley Publishing Company 出版的 F. W. Sears, M. W. Zemansky 和 H. D. Young 合著《大学物理学》(University Physics) 1976 年第五版 1978 年第四次印刷本译出。译本分四册出版。第一册为力学, 第二册为热学和声学, 第三册为电磁学, 第四册为光学和原子物理学。

本书可作理工科大学物理教学参考书。

本册由西北大学物理系郭泰运、刘聚成等翻译。译稿经哈尔滨工业大学洪晶校订。

本书责任编辑: 汤发宇。

高等学校教学参考书

大 学 物 理 学

第 二 册

[美] F. W. Sears 等著

郭泰运等译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 8 字数 191,000

1979年6月第1版 1979年11月第1次印刷

印数 000,001—215,000

书号 13012·0339 定价 0.59 元

第二册目录

热学和声学

第十五章 温度和膨胀1	17-5 斯忒藩定律56
15-1 温度的概念1	17-6 理想辐射体58
15-2 温度计5	习题60
15-3 温标的建立7	第十八章 物质的热性质65
15-4 摄氏、兰氏和华氏温标11	18-1 状态方程65
15-5 固体和液体的膨胀12	18-2 理想气体65
15-6 热应力16	18-3 理想气体的 pVT 曲面71
习题17	18-4 实际物质的 pVT 曲面73
第十六章 热和热测量22	18-5 临界点和三相点78
16-1 热传递22	18-6 溶质对凝固点和沸点的影 响84
16-2 热量24	18-7 湿度85
16-3 热容26	18-8 云室和气泡室88
16-4 热容的测量28	习题89
16-5 热容的实验值30	第十九章 热力学定律93
16-6 相变33	19-1 热力学中的能和功93
16-7 例题37	19-2 体积变化时作功94
习题39	19-3 体积变化中的热量96
第十七章 热的传递45	19-4 热力学第一定律98
17-1 传导45	19-5 绝热过程99
17-2 球体或柱体中的径向热流49	19-6 等容过程100
17-3 对流50	19-7 等温过程100
17-4 辐射54	19-8 等压过程101
	19-9 节流过程102

19-10	热力学第一定律的微分形式	103
19-11	理想气体的内能	104
19-12	理想气体的热容	105
19-13	理想气体的绝热过程	108
19-14	热机	111
19-15	汽油机	114
19-16	狄塞耳机	116
19-17	蒸汽机	117
19-18	热力学第二定律	118
19-19	致冷机	119
19-20	卡诺循环	121
19-21	开尔文温标	123
19-22	绝对零度	126
19-23	熵	126
19-24	熵增加原理	128
19-25	能量转换	130
	习题	132

第二十章 物质的分子性质

	质	138
20-1	物质的分子理论	138
20-2	阿伏伽德罗数	141
20-3	物质的性质	144
20-4	理想气体分子运动论	145
20-5	气体的摩尔热容	150
20-6	分子速率的测量	152
20-7	晶体	153
20-8	晶体的热容	156
	习题	159

第二十一章 行波

21-1	引言	162
21-2	周期波	163
21-3	行波的数学表式	166

21-4	横波的速率	169
21-5	纵波的速率	172
21-6	纵波的绝热特性	174
21-7	水波	178
	习题	180

第二十二章 振动物体

22-1	弦的边界条件	185
22-2	弦上的驻波	188
22-3	两端固定的弦的振动	190
22-4	共振	192
22-5	纵波的干涉	194
22-6	纵驻波	195
22-7	风琴管的振动	198
22-8	杆和板的振动	199
	习题	201

第二十三章 声学现象

23-1	声波	204
23-2	声强	206
23-3	声强级和响度	208
23-4	音品和音调	211
23-5	音程和音阶	213
23-6	活塞辐射	214
23-7	声学现象的应用	219
23-8	拍	220
23-9	多普勒效应	222
	习题	227

单数习题答案

索引

国际单位制

物理恒量

单位换算因子

第十五章 温度和膨胀

15-1 温度的概念

为了描述力学系统的平衡状态和研究刚体、流体的运动, 只需长度、质量和时间三个基本的无法定义的量. 力学中所有其他重要的物理量, 都可用这三个基本量来表示. 然而, 现在我们要涉及的却是一系列所谓热效应或热现象, 这些现象基本上不属力学方面的性质. 为了描述热效应或热现象, 还需要第四个基本量, 这就是温度.

通常的冷、热感觉, 用冷的、凉的、温的、暖的、热的等一类形容词来描述. 当我们触摸物体时, 利用冷热感觉推知这物体具有一种性质, 即所谓温度, 这种性质决定了触摸物体时感觉的冷热程度. 感觉越热, 温度就越高. 这种通过触摸物体来判定物体温度高低的作法, 与用手举起物体来确定其重量, 或用脚踢物体来估计其质量, 在“定性科学”中起着同样的作用. 为了定量地确定物体的质量, 首先必须通过定量的操作得到质量的概念, 例如, 测定一已知的力 F 使物体获得的加速度 a , 再求出 F 对 a 之比, 即得质量 m . 同理, 要定量地确定温度, 也需要一套操作, 涉及一些能够客观测量的量, 而不是依赖我们的冷热感觉. 至于如何进行, 将在以下各节来说明.

在精确地、定量地讨论温度的概念之前, 我们就注意到, 在许多简单系统中, 有一个表征系统状态的量, 随着系统的冷热程度而变化. 例如, 细玻璃管下端玻璃泡中的水银或酒精之类的液体是一个简单的系统(如图 15-1(a)所示), 表征此系统状态的重要量, 是

从任选某固定点量起的液柱长度 L 。另一简单系统，是定体容器中的气体(如图 15-1(b)所示)，在这个例子里，作为状态坐标的变量是压力，是随气体冷热而变的。第三个例子是导线的电阻，也是随冷热而变的。

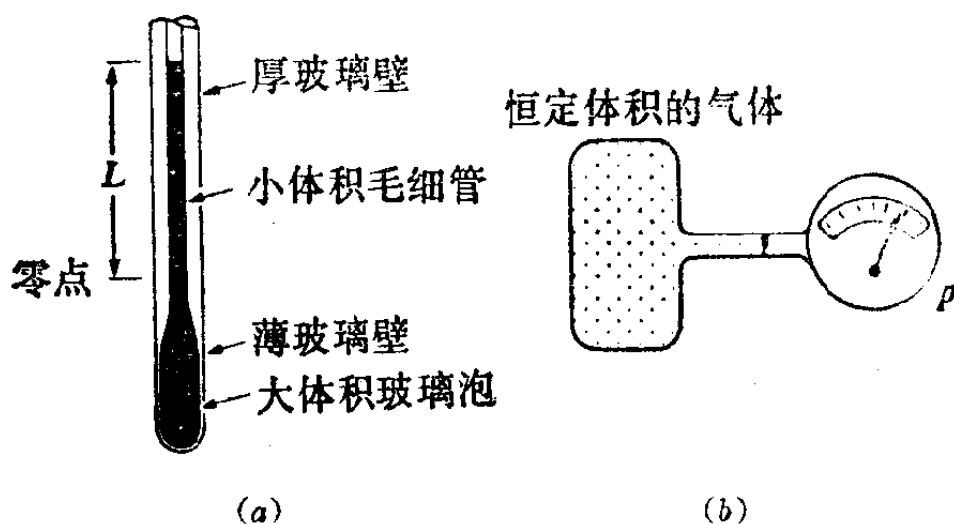


图 15-1 (a)用 L 值说明其状态的系统。(b)用 p 值表示其状态的系统。

令 A 代表具有状态坐标 L 的液体-毛细管系统， B 代表具有状态坐标 p 的恒定体积的气体。若令 A 和 B 接触，一般说，两者的状态坐标都会改变。但把 A 和 B 分开时，改变则较慢；用不同材料(如木材、石膏、毛毡、石棉等)作成的厚壁将 A 和 B 隔开时，各自的状态坐标 L 和 p 几乎是互相无关的。从这些观察可引出一一般性的结论：假设有一种称为“绝热壁”的理想间壁，用来将两个系统隔开，则两个系统的状态坐标可在很大的数值范围内各自独立地变化。绝热壁是理想化的壁，不可能完全实现，只是一种近似。在图 15-2 (a)中，由画有斜线的厚荫影区表示绝热壁。

先令系统 A 和 B 作真正接触，或用一薄金属隔板将 A 和 B 隔开，这时它们的状态坐标可能变化，也可能不变化。能使一系统的状态坐标影响另一系统的状态坐标的壁，称为透热壁。薄铜片就是一个“透热壁”。在图 15-2(b)中，由画有斜线的薄荫影区表示透热壁。最后总会到达 A 和 B 的状态坐标不再发生变化的时候。当

状态坐标的一切变化都停止时，两个系统的共同状态，称为热平衡态。

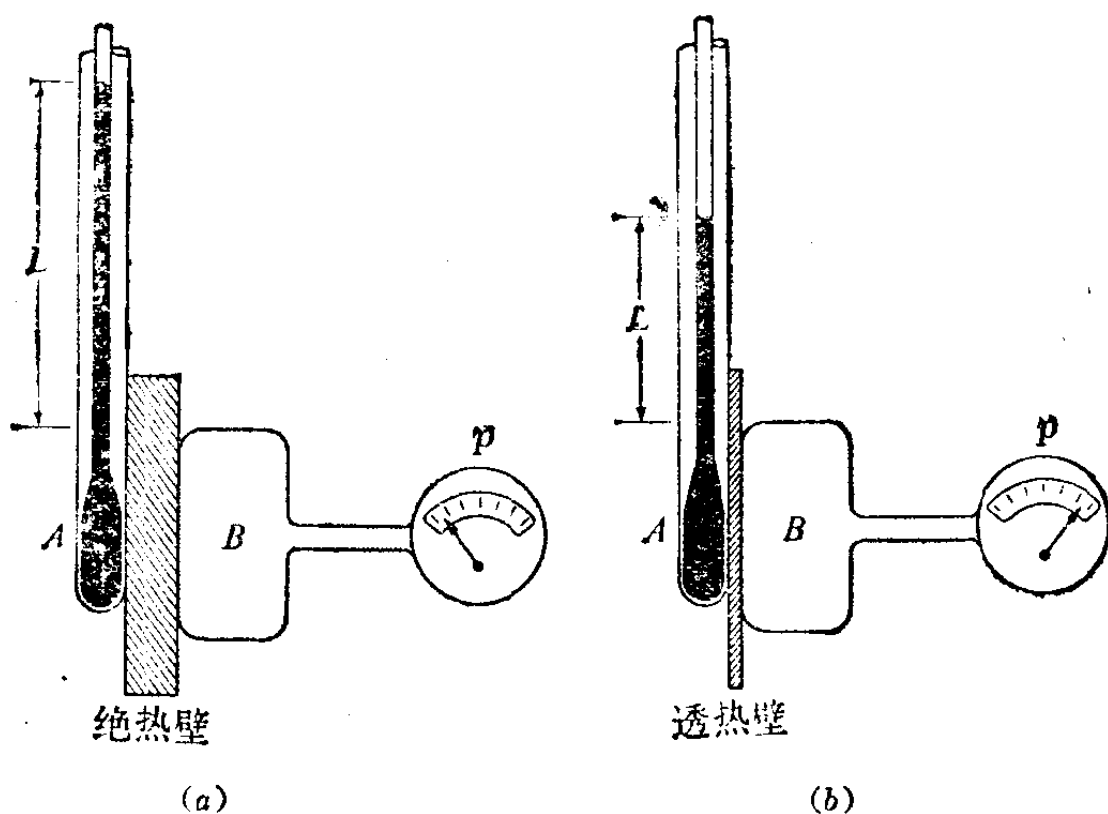


图 15-2 系统 A——液柱，系统 B——恒定体积的气体。(a) A, B 由绝热壁隔开, p 和 L 无关; (b) A, B 由透热壁隔开, p 和 L 有关。

设想用绝热壁使彼此隔开的 A、B 两系统，分别经透热壁与第三系统 C 接触，再用绝热壁把整个系统包围起来，如图 15-3(a) 所示。实验表明，A、B 两系统分别将与第三系统达到热平衡，其后若

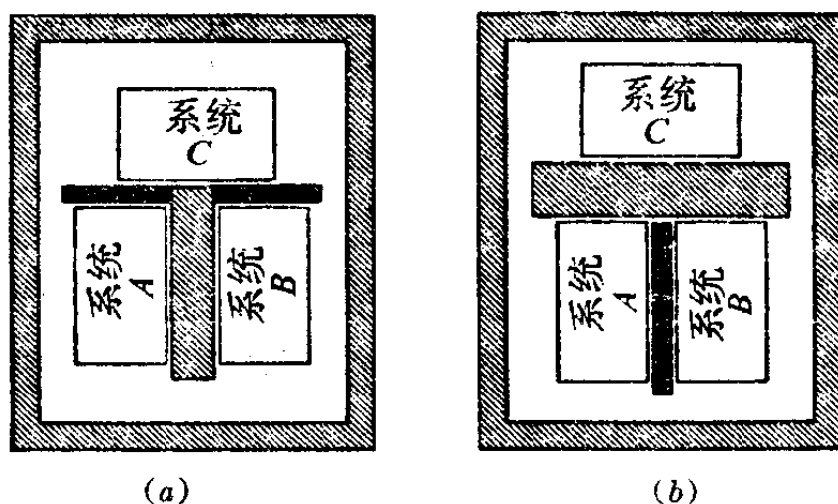


图 15-3 热力学第零定律。(a) 若 A、B 各自与 C 处于热平衡，那么，(b) A、B 相互处于热平衡。

将 A 、 B 之间的绝热壁换成透热壁, A 、 B 两系统也不会再发生变化(图15-3b)。如果不让 A 、 B 两系统与 C 系统同时到达热平衡, 而是首先使 A 、 C 间达到平衡, 其次 B 、 C 间达到平衡(系统 C 的状态在两种情形中保持一样); 最后, 当 A 、 B 经透热壁相通时, 就会发现 A 、 B 两系统处于热平衡。我们用“两系统处于热平衡”的说法来表示, 它们是处在这么一种状态: 如果这两系统是通过透热壁相连的, 那么它们的组合系统将处于热平衡。

这些实验事实还可简明叙述如下: 与第三个系统处于热平衡的两个系统, 它们彼此也处于热平衡。按否勒(R. H. Fowler)的提法, 我们把这个假设称为热力学第零定律。乍一看来, 第零定律似乎是明显的, 其实不然, 它的真实性必须用实验来验证。

A 、 B 两系统通过透热壁接触时, 可能形成热平衡, 也可能不形成热平衡。人们就有理由要问: “究竟是 A 、 B 的什么性质决定其是否形成热平衡呢?”这就导致我们推论出一个称为温度的新性质的存在。一系统的温度, 就是决定该系统是否与其他系统处于热平衡的性质。当两个或更多个系统处于热平衡时, 就说它们具有相同的温度。

处于热平衡的所有各系统的温度, 可用一个数字来表示。温标的确立, 不过是采取一套规则给出温度的数值而已。一旦确立了温标, 两系统间热平衡的条件就是它们具有相同的温度。两系统的温度不同时, 我们就可确信这两系统不处于热平衡。

物质的温度直接与它的分子能量有关; 随着温度的升高, 分子运动就加剧。温度和微观机械能的关系将在第二十章中详细讨论。然而应该知道, 不用考虑分子就可确定温度。确实, 温度本来就是宏观概念, 对于单个分子是没有意义的, 仅在考虑大量分子的平均能量时, 温度才可能和分子运动有关。

15-2 温 度 计

在确定温标时,最简单的作法是选取如上所述的系统,对这系统的每一个状态坐标值,任意规定一个温度数值.于是就定量地确定了这个系统的温度,以及与这个系统处于热平衡的一切系统的温度.

图 15-1(a)的系统是最早的温度计之一,然而现在所使用的系统则是各种各样的.温度计的重要特性包括灵敏度(很小的温度变化引起状态坐标显著的变化)、状态坐标测量的准确度和可复现性.通常要求的另一特性是温度计与其他系统达到热平衡的速率.能最好地满足这些要求的温度计,将在以下几节来叙述.

广泛用于科学研究和工程实验室的温度计,是温差电偶.由两种不同金属或合金 A 和 B 形成一个结,如图 15-4 中所示“测试结”.测试结通常埋在待测温度的物质中.因为测试结的尺寸小,质量小,因此它能随温度迅速变化,并能很快地到达平衡.参考结由两个结构成:即 A 和铜形成一个结, B 和铜形成的另一个结.这两个结保持某恒定温度,叫做参考温度.此温度计的状态坐标是

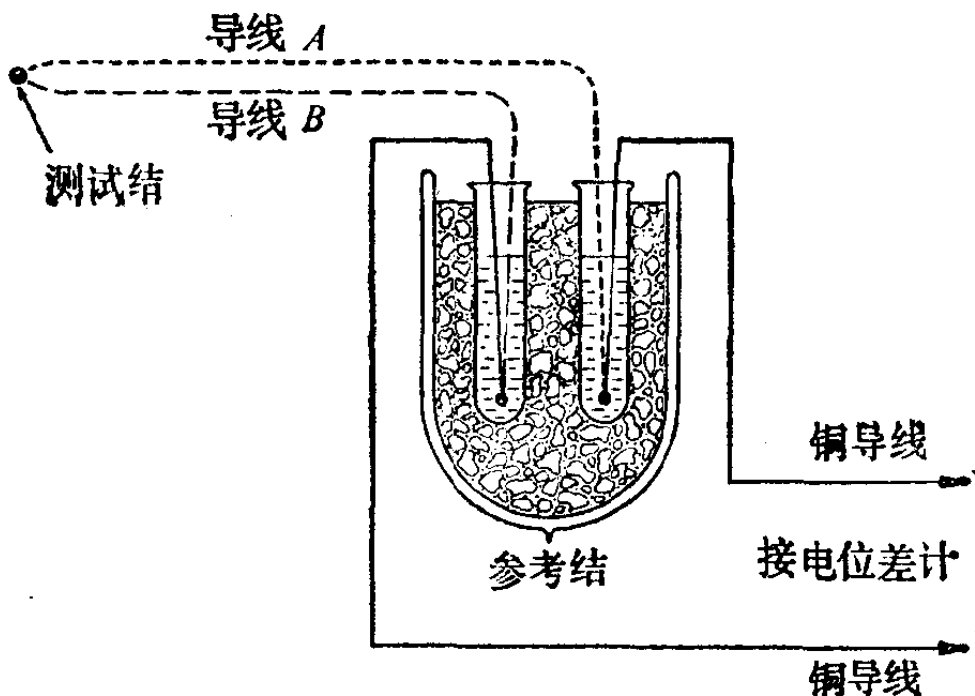


图 15-4 标明测试结和参考结的温差电偶.

一电学量,叫做电动势,可用电位计来测量.常用的温差电偶是以纯铂和铂铑合金(90%铂加10%铑)作测试结.也常用铜和康铜合金.

电阻温度计是另一种电温度计,它由一根很细的电阻丝构成,为保护起见,常把这电阻丝封在薄壁银管中.由温度计元件引出的铜线,连接到测量电阻的仪器如惠斯通电桥上.因为测量电阻可达很高的精确度,所以电阻温度计是测量温度的最精密仪器之一.在很低的温度范围,铂丝线圈可用一个小的碳圆柱体或一小片锗单晶来代替.

为了测量高于温差电偶和电阻温度计量程的温度,常用光测高温计.如图15-5所示,主要由望远镜 T 构成.在望远镜的镜筒里

装上红色玻璃滤光片 F 和小电灯泡 L .当高温计对准炉子时,观察者通过望远镜看到炉子光亮本底上的暗灯丝.灯丝与电池组 B 及可变电阻器 R 相连.转动可变电阻器旋钮,可以逐渐增加灯

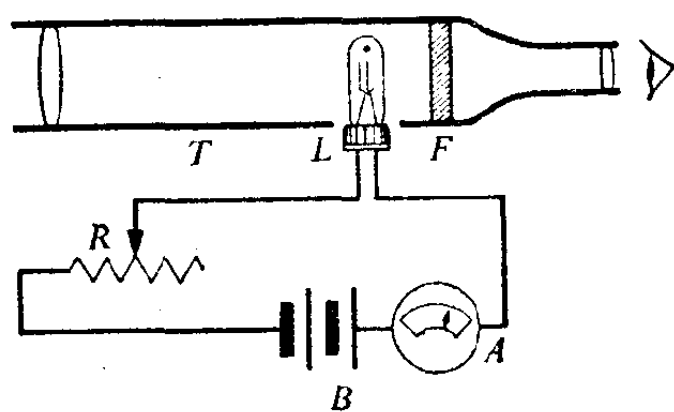


图15-5 光测高温计的原理.

丝电流,从而逐渐提高灯丝的亮度,直到灯丝的亮度与本底亮度正好匹配为止.事先在不同的已知温度下对仪器进行定标,就可从电路中安培计 A 的标度直接读出待测的温度.因为该仪器没有任何部分需要与热体接触,所以光测高温计可以用来测量金属熔点以上的非常高的温度.

在所有各状态坐标(即测温性质)中,定体气体的压力是最好的一个,它的灵敏度、测量的准确度和可复现性都很好.图15-6是定体气体温度计的示意图.玻璃泡 C 装有气体,通常为氦气,它的压力可由开管水银压力计测得.温度升高时,气体就膨胀,迫使 B

管内的水银下降，A管内的水银上升。用橡皮管D使A、B两管和水银存储器R连通。升高R，可使B管中的水银面回到参考记号E。这样就保证气体具有恒定的体积。

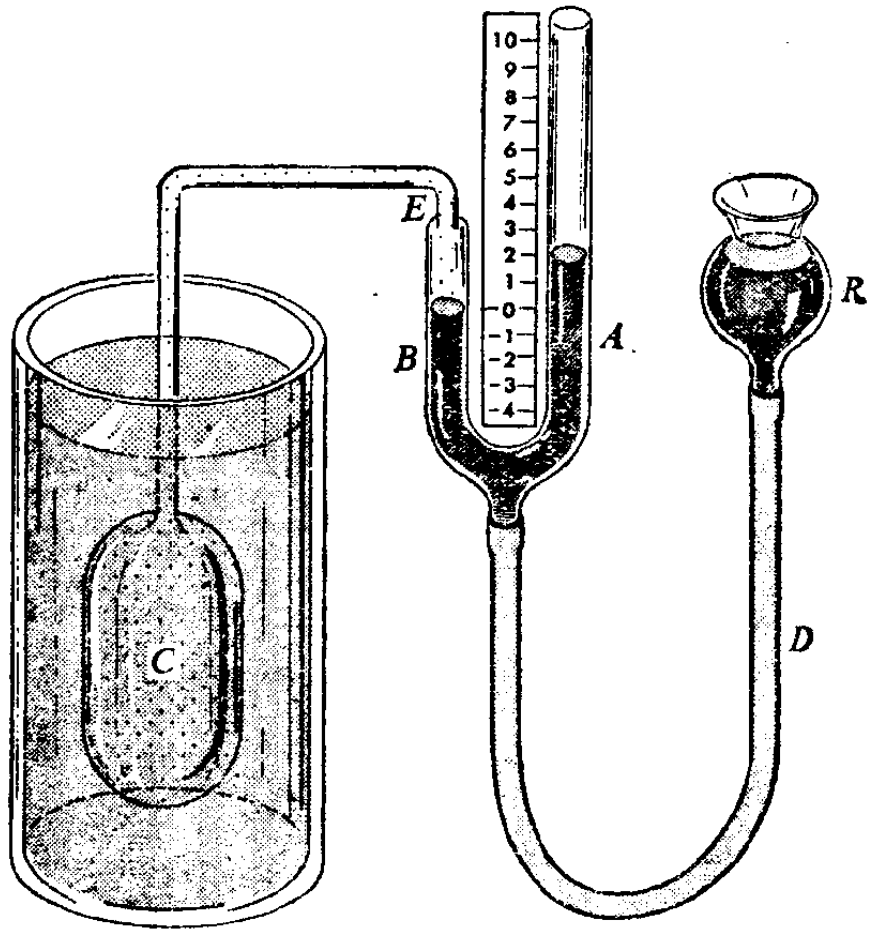


图 15-6 定容气体温度计。

气体温度计主要用于标准局和某些大学研究实验室中。气体温度计通常又大又笨，而且达到热平衡也较迟缓。

15-3 温标的建立

如果上节所述的任一温度计的状态坐标或测温性质保持不变，那么就可用来指示一恒定温度。用这种方法，我们发现：在恒定压力下，由同一物质的固态和液态组成的系统，只能在一定温度下保持相平衡（即液态和固态共存，没有液态变为固态，也没有固态变为液态）。同理，压力恒定时，液态和它的蒸汽也只能在一定的温度下保持相平衡。

在标准大气压下，同一物质的固态和液态共存的相平衡温度，叫做正常熔点，简写为 NMP。在标准大气压下，液态及其蒸汽共存的相平衡温度，叫做正常沸点，简写为 NBP。

在标准大气压下，固态及其蒸汽之间的相平衡，有时是可能的。这时的温度叫做正常升华点，简写为 NSP。

三相——固态、液态和汽态——共存的平衡态也是可能的，但只能在一个确定的压力和温度下才能实现，即通常所说的三相点，简写为 TP。水的三相点的压力为 4.58 毫米水银柱高。

可以选取任何物质的 NMP、NBP、NSP 或 TP 作为建立温标的标准参考点。这样选取的任一温度叫做定点。现代计温学中所用的标准定点是水三相点，该点的公认^①数字是

273.16 K

读作 273.16 开尔文^②。

为了获得三相点，将高纯度的水放入如图 15-7 所示的容器内蒸馏。把全部空气抽走后，将容器密封起来。在容器中间的阱内放置的冷凝剂，使容器内部绕阱形成一层冰。用温度计泡代替冷凝剂时，与内阱贴近的一薄层冰就熔化了，只要固、液和汽三相共存于平衡态，那么系统就处于三相点。

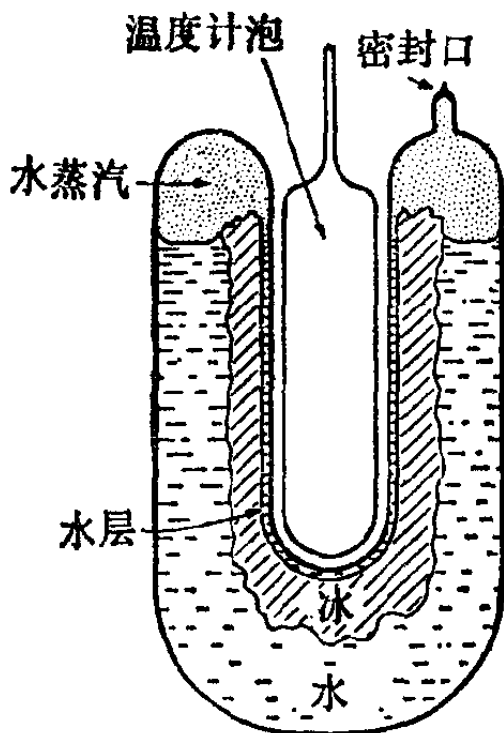


图 15-7 阱内放有温度计泡的三相点管，与内阱贴近的一层薄冰融化成水。

① 借助气体定律公式的外推，“绝对零度”定为 -273.16°C 。因为开尔文温标和摄氏温标的一度有相同的大小，所以开尔文温标上水的三相点为 273.16 K。

② 1967 年 10 月 13 日第 13 届国际度量衡会议上，温度单位的名称，由开氏度（代号： $^{\circ}\text{K}$ ）改为开尔文（国际代号：K，中文代号：开）。现在的温度单位开尔文，是水三相点的热力学温度的 $\frac{1}{273.16}$ 。

现在,我们来开始建立温标.首先用字母 X 表示前述的任一测温性质:如温差电偶的电动势 \mathcal{E} ,电阻丝的电阻 R ,定体气体的压力 p 等等.我们规定,两个温度之比和两个对应的 X 值之比相同.于是,若具有测温性质 X 的一温度计与某系统处于热平衡,并记下值 X ;随后,让它再与另一系统处于热平衡,并记下值 X_3 ,那么,这两系统温度的比值就可表示为

$$\boxed{\frac{T(X)}{T(X_3)} = \frac{X}{X_3}} \quad (15-1)$$

此时若令下标 3 代表标准定点,即水的三相点,则 $T(X_3) = 273.16$ K. 所以

$$T(X) = 273.16 \text{ K} \left(\frac{X}{X_3} \right) \quad (15-2)$$

例 假设一个气体温度计,在水的三相点时压力为 15.0×10^4 Pa,在水的正常沸点时压力为 20.5×10^4 Pa.问水的正常沸点的温度是多少?

由式(15-2)得

$$T_B = 273.16 \text{ K} \frac{20.5 \times 10^4 \text{ Pa}}{15.0 \times 10^4 \text{ Pa}} = 373 \text{ K}$$

在温度测量中剩下的问题是,当用各种温度计测量同一温度时,所得结果并不总是一致的.我们发现,用气体温度计测量的结果最一致;对于任何气体来说,所测得的结果随着压力不同而有一些差异,但是我们发现,在压力越来越小的极限情况下,一切气体温度计在同一温度下,趋近于同一的读数,而和气体的性质无关.因此,通常的作法是用定体气体温度计(在极低压力的极限情况下)来定义温标,然后利用这个装置,通过它的温标来校准其他温度计.

为了测量低温，必须使用在低温时不会液化的气体。若用低压的氦气，则气体温度计测量的最低温度约为 1 K。至此，温度 $T=0$ 仍然没有确定。在第十九章中，我们将讨论开尔文温标，该温标和任何特定物质的性质无关。可以证明，在气体温度计适用的温度范围内，气体温度计的温标与开尔文温标是一样的。于是在气体温度的后面可写上 K。

在第十九章，还将指出，绝对零度在开氏温标上是怎样定义的。在那以前，“绝对零度”一词无任何意义。通常所谓“在温度 $T=0$ 时，一切分子活动都会停止”这种说法是完全错误的。当统计力学中必须将温度与分子活动性联系起来时，就会看到，经典统计力学需要用量子力学来修正。作这个修正后，物质的分子在绝对零度时，就具有一定数值的动能，叫做零点能量。

热血动物的体温，受精巧的温度控制系统制约而保持恒定，其变化不会超过摄氏十分之几度。动物下丘脑中的化学平衡条件是感受血液温度的测温性质，下丘脑能激活适当的温度控制机构。最重要的温度控制机构是靠近身体表面血管的膨胀或收缩，以及汗腺的激活或灭活。前者是为了增加或减少由传导而引起的体热的损失；后者则是为了增加或减少蒸发引起的降温。

表 15-1 定点温度

基 本 定 点	T, K	$t, ^\circ C$	$T_R, ^\circ R$	$t_F, ^\circ F$
标准：水三相点	273.16	0.01	491.688	32.018
氧的正常沸点	90.18	-182.97	162.32	-297.35
冰和含饱和量空气的水的平衡(冰点)	273.15	0.00	491.67	32.00
水的正常沸点(水汽化点)	373.15	100.00	671.67	212.00
锌的正常熔点	692.66	419.51	1246.78	787.11
铋的正常熔点	903.65	630.50	1626.57	1166.90
银的正常熔点	1233.95	960.80	2221.11	1761.44
金的正常熔点	1336.15	1063.00	2405.07	1945.40

15-4 摄氏、兰氏和华氏温标^①

摄氏温标(以前在英、美叫做百分温标),采用的一度大小,和开氏温标的一度大小相同,只是零点不同.结果,水的三相点的摄氏温度为摄氏 0.01 度,简写为 0.01°C . 因此,若用 t 表示摄氏温度,则

$$t = T - 273.15 \text{ K} \quad (15-3)$$

由此,在标准大气压下,水蒸汽凝结的摄氏温度 t_s 为

$$t_s = T_s - 273.15 \text{ K}$$

已知 T_s 是 373.15 K , 所以

$$t_s = 373.15^{\circ} - 273.15^{\circ}, \text{ 即 } t_s = 100.00^{\circ}\text{C}$$

在英、美的工程界和日常生活中,通常还使用另外两个温标.兰氏温度 T_R (写为 $^{\circ}\text{R}$) 按以下关系与开氏温度 T 成正比.

$$T_R = \frac{9}{5}T \quad (15-4)$$

华氏温标 t_F (写为 $^{\circ}\text{F}$) 的一度和兰氏温标的一度相同,而零点按以下关系规定:

$$t_F = T_R - 459.67^{\circ}\text{R} \quad (15-5)$$

将式(15-3)及式(15-4)代入式(15-5),得到

$$t_F = \frac{9}{5}t + 32^{\circ}\text{F}, \quad (15-6)$$

由式(15-6),推知冰点($t=0^{\circ}\text{C}$)的华氏温度是 32°F , 水沸点($t=100^{\circ}\text{C}$)的温度是 212°F . 冰点和水沸点间的 100 摄氏度或开氏度,相当于 180 华氏度或兰氏度,如图 15-8 所示,图中将四种温标作了比较.

^① 分别以 Anders Celsius(1701—1744), William John MacQuorn Rankine(1820—1872), Gabriel Fahrenheit(1686—1736)而命名的.

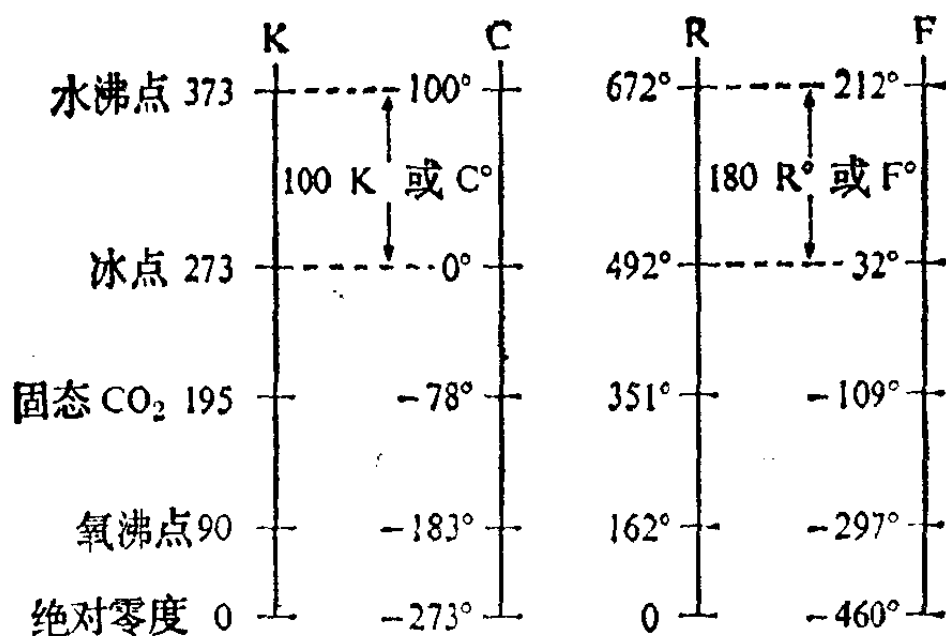


图 15-8 开氏、摄氏、兰氏及华氏温标间的关系。所列的数值是将各温度值的小数部分四舍五入后的整数。

用气体温度计准确测量沸点或熔点，需要非常细心的实验操作。幸而，对许多可以获得高纯度的物质，已经完成了这项工作。表 15-1 列出了其中一些测量结果。利用这些基本定点温度，就可以校准其他温度计。

假设，一杯水的温度从 20°C 升高到 30°C ，经过 10 摄氏度的温度间隔。需要区分这个温度间隔和摄氏零上 10 度的实际温度。因此，在讲到实际温度时，我们用“摄氏 10 度”或“ 10°C ”；而用“10 摄氏度”或“ 10C ”来表示温度间隔。这样，就可说在摄氏 20°C 和摄氏 30°C 之间有 10 摄氏度的温度间隔。

15-5 固体和液体的膨胀

除了少数例外情形，如果物体的外压力保持不变，所有物体的体积都随温度的升高而增大。设温度改变一微小量 dT (或 dt ，因开氏度和摄氏度有同样大小的温度间隔) 时，固体和液体的体积产生微小改变量 dV 。于是，物体的体胀系数 β 就定义为物体体积的