



新世纪高等学校规划教材·物理学系列

热 学

管 靖 熊 刚 杨晓荣◎编

REXUE



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

非外借



新世纪高等学校规划教材·物理学系列

热 学

管 靖 熊 刚 杨晓荣◎编

RE



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

热学 /管靖,熊刚,杨晓荣编. — 2版. — 北京:北京师范大学出版社, 2017.4

新世纪高等学校规划教材·物理学系列

ISBN 978-7-303-22099-1

I. ①热… II. ①管…②熊… ③杨… III. ①热学—高等学校—教材 IV. ①O551

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 028009 号

营销中心电话	010-62978190 62979006
北师大出版社科技与经管分社	www.jswsbook.com
电子信箱	jswsbook@163.com

出版发行:北京师范大学出版社 www.bnup.com

北京市海淀区新街口外大街 19 号

邮政编码:100875

印刷:三河市东兴印刷有限公司

经销:全国新华书店

开本:730 mm×980 mm 1/16

印张:12.5

字数:250 千字

版次:2017 年 4 月第 2 版

印次:2017 年 4 月第 2 次印刷

定价:25.00 元

策划编辑:范林 刘凤娟 责任编辑:范林 刘凤娟

美术编辑:刘超 装帧设计:刘超

责任校对:李茵 责任印制:赵非非

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话:010-62978190

北京读者服务部电话:010-62979006-8021

外埠邮购电话:010-62978190

本书如有印装质量问题,请与出版部联系调换。

印制管理部电话:010-62979006-8006

前言

热学一般是物理系本科生的第二门专业基础课，在力学之后讲授。由于学生的中学基础知识所限和课程内容的特点，学生学习热学时常感觉内容庞杂、系统性差，学习中所遇到的困难较力学大得多。加之近年来因注重综合素质教育，普通物理课程的教学时间减少，特别是对于师范生的培养，原有教材或显得较为陈旧，或显得内容过多、难度过大，不完全适合教学需要。

本书是北京师范大学等院校多年热学教学经验的总结，是一本体现时代特点、简明的热学教材。适用于普通师范院校物理系的热学课程，也适合一般综合性大学物理系少学时热学课程使用。大体上适合于2~3学分课程使用。本书设置了部分阅读(如6.1节)和选学内容，用加*号的楷体字与必学内容的宋体字区分。

用统计的方法，对宏观现象、宏观规律做出微观解释，寻求物理现象、物理规律的微观机制，是热学课程最有特色、最重要的思想方法。本书以热学宏观规律为主线，作为宏观现象、宏观规律的微观解释，对照讨论分子动理论的相关内容，希望如此可以增强课程整体的系统性，并使统计的方法和注重探求机制的思想得以加强。

理论联系实际一直是物理课程必须面对的重要问题，我们认为强化物理模型的建立是解决这个问题的关键。用理想模型在较为极端、但较简单的情况下研究问题是物理学的风格。物理学一般不研究特别复杂的工程问题，而更关注物理机制的探求。物理学崇尚简约，研究最基础、最基本的自然规律。比如对于热机，物理学最关注的是最基础、最简单的

卡诺热机；为联系实际，一般讨论内燃机的循环过程，但依然是在极简单的、准静态的、模型化的情况下的讨论；对实际热机更精确的研究是热力学研究的领域。

本书在热力学定律和热机的讨论中保持热量符号规则的统一，对卡诺热机做了延伸讨论，对内燃机的讨论强化了讨论中建立模型的过程，以解决理论联系实际的问题。本书适当强化了热力学第二定律，特别是熵增加原理和热力学第二定律的统计解释的讨论，既与热学的发展相适应，也符合师范生培养要求。

作者长期在北京师范大学、中国人民大学、西藏大学讲授热学课程，考虑了不同状况学生的实际情况，并经历了反复的教学实践，所以本教材有较好的、广泛的教学适用性。

作者虽有长期的教学经验，但要使教材既简明，又能体现时代特点，还要有广泛的教学适用性绝非易事，教材难免有欠妥之处，敬请读者指正。

作 者

目 录

第 1 章 导论 /1

1.1	热学的研究对象和研究方法	1
1.2	热力学平衡态	2
1.3	热力学第零定律 温度	5
1.4	理想气体的状态方程	11
1.5	统计规律性的基本概念	15
1.6	理想气体压强和温度的微观解释	22
1.7	分子力与范德瓦耳斯方程	29
	习 题	35

第 2 章 平衡态理想气体分子运动的统计分布 /39

2.1	麦克斯韦速率分布律	39
2.2	麦克斯韦速度分布律	44
2.3	气体分子的碰壁数率及应用	48
2.4	玻尔兹曼分布律	54
	习 题	57

第 3 章 热力学第一定律 /60

3.1	热力学第一定律	60
3.2	准静态过程和其中的体积功	64
3.3	理想气体的热容量 内能与焓 ...	67
3.4	理想气体内能及摩尔热容的微观理论	70

3.5	热力学第一定律对理想气体准静态过程的应用	75
3.6	循环过程和卡诺循环	79
* 3.7	有关卡诺热机的讨论	83
3.8	实用热机与制冷技术的物理原理	86
习 题		91

第4章 热力学第二定律 /95

4.1	热力学第二定律的语言表述	95
4.2	热力学第二定律的实质	97
4.3	卡诺定理与热力学温标	101
4.4	熵	104
4.5	熵增加原理	113
4.6	热力学第二定律的统计意义	118
* 4.7	信息熵简介	126
* 4.8	自由能与吉布斯函数	128
* 4.9	拓展与评述	130
习 题		134

第5章 输运现象与分子动理论的近平衡态理论 /138

5.1	近平衡态气体输运现象的宏观规律	138
5.2	气体分子的平均碰撞频率和平均自由程	144
5.3	近平衡态气体输运过程的初级微观理论	149
5.4	极端稀薄的气体中的输运过程	152
* 5.5	自组织现象	154
习 题		157

第6章 物态与相变 /160

* 6.1	物态与固体	160
* 6.2	液体的微观结构和液体性质	162
6.3	液体的表面现象	166
6.4	相变	173
6.5	汽液相变	175
6.6	固液与固气相变 三相图	184
6.7	一级相变和二级相变	188
习 题		190

参考书目 /193

第1章 导论

1.1 热学的研究对象和研究方法

物体的冷热程度用温度来标志,当温度发生变化时,物体的很多性质也随之变化,例如物体的热膨胀、物态变化等.这些与温度有关的物理性质的变化称之为**热现象**.热现象是构成宏观物质系统的大量微观粒子热运动的集体表现.**热运动**是构成宏观物质系统的大量微观粒子的永不停息的无规则运动,是由大量微观粒子构成的宏观物质系统的一种基本运动形式.物理学中研究热现象的分支就是**热学**.

热学的研究对象是由大量微观粒子组成的发生着热现象的宏观物质系统,称为**热力学系统**(简称**系统**),系统可以是气体、液体、固体、电子气体等,构成系统的微观粒子可以是分子、原子、带电粒子等.与系统相互作用着的周围环境称为**系统的外界**(简称**外界**).

要研究系统的性质和变化规律,首先要解决对系统状态的描述问题.在热学中对系统状态的描述有两种方法:宏观描述和微观描述.

对一个系统从整体上加以描述的方法叫**宏观描述**,这时表征系统状态的物理量叫**宏观量**.宏观量是可以直接测量的,是反映大量粒子的集体特征的物理量,如描述气体整体特征时所用的物质的量、压强、体积、温度等都是宏观量.

任何宏观物体都由大量的、不连续的微观粒子组成.粒子都以不同形式做永不停息的无规则热运动,它们之间还存在着或强或弱的相互作用力.所以也可以用每个粒子的位置和动量(或速度)来描述系统的状态.这种通过对微观粒子运动状态的说明来描述系统状态的方法叫**微观描述**.描述单个微观粒子运动状态的物理量叫**微观量**,如粒子的质量、位置、速度、动量、动能、势能等都是微观量.微观量一般是不能直接测量的.

宏观描述和微观描述是同一类物理现象的两种描述方法,它们之间必定有一定的内在联系.因为宏观物质系统是由大量微观粒子构成的,物质的宏观性质是大量微观粒子性质的集体表现,所以宏观量总与相应微观量的统计平均值相联系,可以通过统计的方法计算出来.统计的方法是物理学的一个重要方法,而且其重要性和应用范围不只局限于物理学范畴之内.

由于研究方法的不同, 热学分为宏观理论与微观理论. 热学的宏观理论叫做热力学. 热力学不涉及物质的微观结构, 采用宏观描述, 以实验总结出来的热力学基本定律为基础, 通过逻辑推理来研究宏观系统热现象的规律, 具有普遍性和可靠性. 热力学随 18 世纪工业革命发展, 基本理论主要形成于 19 世纪上半叶, 焦耳、卡诺、克劳修斯、开尔文(W. 汤姆孙)、普利高津等作出了重要贡献. 热学的微观理论叫统计物理学, 它从物质的微观结构出发, 依据每个粒子遵循的力学规律, 用统计的方法探求系统宏观热现象的微观机制. 统计物理学从 19 世纪由克劳修斯、麦克斯韦等对气体分子动理论的研究开始, 后经玻尔兹曼、吉布斯等在经典力学的基础上建立了经典统计物理学. 20 世纪量子力学建立以后, 在量子力学的基础上, 爱因斯坦、狄拉克、玻色、费米等建立了量子统计物理学. 统计物理学从物质的微观结构出发, 对宏观热现象和热力学规律做出微观解释, 揭示了热现象的本质, 使人们对自然界的认识深入了一大步.

本课程主要讨论热力学的基本概念和规律; 对于统计物理学主要讨论其中的分子动理论部分, 并对统计物理学的基本出发点和工作模式作初步介绍; 同时也探讨一些物质的热学性质.

本课程基本以宏观热力学规律为主线, 同时对照讨论分子动理论中与宏观现象和规律的微观解释的相关内容, 希望如此可增强本课程内容的整体性和系统性.

1.2 热力学平衡态

1.2.1 平衡态

构成系统的大量微观粒子总体所表现出的状态称为系统的宏观状态, 系统的宏观状态中一种特殊而有重要意义的情况是平衡态.

经验表明, 系统在不受外界影响的条件下, 经过足够长的时间, 总可达到一个稳定的、不再有任何宏观变化的状态. 例如一根金属杆, 原来各处温度不均匀, 若没有外界影响, 经过一定的时间后, 必将达到一个各处温度均匀的状态; 如果继续没有外界影响, 则保持这一状态不变. 又如在一个密封容器内装入一些水, 水将蒸发形成水蒸气, 经一定时间, 水蒸气饱和而蒸发现象终止, 形成水、气共存状态, 此时水和水蒸气的密度、压强、温度均不再变化; 若无外界影响, 则系统保持这一状态不变. 由众多的类似现象, 总结而得出了平衡

态的概念：在没有外界影响的条件下，系统的宏观性质不随时间变化的状态称为平衡态。

没有外界影响是指：系统和外界之间没有任何宏观的物质或能量交换。在没有物质交换的情况下，没有外界影响是指系统和外界之间既不做功、也不传递热量。

没有外界影响这个条件是重要的，不能简单地把系统不随时间变化的状态叫平衡态。

例如，取一根金属杆，使其一端与沸水接触，另一端与冰水混合物接触。沸水和冰水混合物的温度维持不变，经过足够长的时间后，杆上各点都有确定的温度，不再随时间变化。由于此时金属杆热端不断地由外界吸收热量，其冷端不断地向外界放出热量，有外界影响，所以这根金属杆不是处于平衡态。在这个例子中，金属杆中有热流(热量流)从沸水端流向冰水混合物端，经过足够长的时间后，热流达到一个稳定不变的数值，金属杆上的温度分布也达到稳定状态，热流即由外界影响所致。

再如，把一个通电的电阻器置于水中，如果水的温度保持不变，经过足够长的时间后，电阻器上各点都有确定的温度，不再随时间变化。因为在这个例子中，不断有电流(电子流)通过电阻器，也不断有热流由电阻器流向水，对电阻器这个系统有外界影响，所以电阻器不能达到平衡态。

系统处于平衡态时，虽然宏观状态不随时间变化，但从微观角度看，组成系统的微观粒子仍处于不停的热运动之中，只不过是大量微观粒子运动的总体效果不随时间改变而已。例如，密封容器内的水和水蒸气共存而达到平衡态时，从宏观上看，其压强、密度、温度等是不变化的；但仍不停地有水分子由液态变成气态，同时也有水分子不停地由气态变成液态，只不过是单位时间内进出水蒸气的分子数平均相等而已。因此，把这种动态平衡叫热动平衡。

这里讨论的平衡态是热力学宏观态。没有外界影响是指系统和外界之间没有任何宏观的物质或能量交换，或说没有物质或能量的宏观流(如前面提到的电子流或热流)。处于平衡态的系统的一部分也处于平衡态，例如密封容器内的水和水蒸气共存而达到平衡态时，其中，水作为系统也处于平衡态；虽然水(系统)与水蒸气(外界)之间有水分子的交换，但没有宏观的物质流。

系统处于稳定的外场(如重力场、静电场和稳恒磁场等)中，也可以处于平衡态。例如在重力场中的气体，经过足够长的时间后，尽管气体密度和压强因高度而有所不同，但不再随时间变化，这时重力场对气体已经没有影响(既不做功也不传热)，气体处于平衡态。通常在高度差不大的情况下气体处于平衡

态时,可以忽略重力场的作用,认为气体的密度和压强是均匀分布的.

平衡态是一个理想的概念,也是一种理想模型.在现实中并不存在完全不受外界影响,且宏观状态绝对不变的系统.

1.2.2 热力学平衡

现在,在力学之后学习热学,一般不考虑系统的整体运动(例如气体随其容器的平动和转动),认为系统整体上处于相对静止状态.

在没有外场的情况下,系统处于平衡态必须同时满足如下三个平衡条件:

(1)力学平衡条件 在通常的没有外场的情况下,压强差会产生粒子流(宏观流).力学平衡表现为系统内压强均匀分布.

(2)热学平衡条件 热流是由于温度差产生的,所以可以把温度处处相等作为热平衡建立的标准.在没有外场的情况下,热学平衡表现为系统内温度均匀分布.

(3)化学平衡条件 通常在没有外场的情况下,系统即使已经达到了力学和热学平衡条件,系统内各处化学组分分布不均匀也会导致扩散,从而也形成粒子流.例如密封容器内充有氧气和氮气,如果左侧氧气较多、右侧氮气较多,即使压强和温度分布均匀,氧气仍然会向右侧扩散,氮气仍然会向左侧扩散.虽然这种粒子流没有因压强不均匀而产生的粒子流直观,但也是宏观流.通常在没有外场的情况下,化学平衡表现为系统内化学组分均匀分布.

上述三个条件中的任何一个被破坏,系统内就会存在粒子流或热流,系统就不是处于平衡态.可见,可以通过考察系统内是否存在粒子流或热流来判断系统是否处于平衡态.

1.2.3 状态参量

现在讨论如何描述系统的平衡态.系统处于平衡态时,在系统物理性质均匀的条件下,系统的宏观性质可用一些确定的宏观参量来描述,这种描述系统状态的宏观参量称为状态参量.例如对一定质量的化学纯气体,在无外场的条件下处于平衡态时,系统是均匀的,一般可用压强(p)、体积(V)和温度(T)三个状态参量来描述系统的宏观状态.

实验表明,一个系统的各个状态参量之间一般均存在着一定的内在联系,所有的状态参量并不都是独立参量.通常只要选取一组独立的状态参量就可以完全确定平衡态的性质,系统的其他宏观物理量则可以看成是这一组独立参量的函数,并称之为态函数.例如对于化学纯、无外场条件下处于平衡态的气体

系统,三个状态参量(p , V , T)中只有两个是独立的,如选取 p 和 V 为独立参量,则温度 T 便可看成是 p 和 V 的函数,并称 T 为态函数。

对于复杂的系统则需要引入更多的状态参量来描述系统的宏观状态。例如对混合气体,则需要用物质的量 ν (单位为 mol) 来描述其中各种化学组分的数量。对处于电磁场内的带电粒子系统,则需用电场强度和磁感应强度来描述系统的电磁状态。

1.2.4 局域平衡

对处于平衡态的非均匀系统,如重力场中的气体,由于各处物理性质不同,所以从整体上描述系统性质的状态参量就失去了意义。对这种情况可以采用微元法,把系统从空间上分成足够多个小部分,每一个小部分称为一个子系统;使每一个子系统的宏观性质可以看成是均匀的,即使得每一个子系统都处于局域平衡状态。这样,对每一个子系统,描述平衡态的状态参量均有意义,所以可以用随空间变化的状态参量描述系统的状态。

这种方法还可以推广到对非平衡态的描述中去,当系统处于非平衡态时,各部分的物理性质可能不均匀,并可能随时间发生变化。依然可以采用微元法,把系统从空间上分为足够多个子系统,把时间也分成足够多个小间隔;使每一个子系统的宏观性质可以看成是均匀的,且在任一瞬时附近的短暂时间间隔内可认为其宏观性质不变,即使得每一个子系统在任意瞬时都处于局域平衡状态。如果局域平衡假设可以成立,则对每个子系统描述平衡态的状态参量均有意义,可以用随空间和时间变化的状态参量来描述系统处于非平衡态时的状态。

1.3 热力学第零定律 温度

温度是最基本的热学参量之一。通俗地说,温度是表示物体冷热程度的物理量。原始的温度概念源于生活,冷热感觉靠身体的触摸。如果从定量测量出发,可以给温度一个操作型定义:温度就是某温度计的读数。

伽利略发明的没有刻度的验温计是温度计的雏形,如图 1-1 所示。之后温度计日趋完善,并建立了若干种温标,其中 18 世纪初建立的摄氏与华氏温标沿用至今。19 世纪中至 20 世纪初,热力学理论基本建成,但温度的科学概念的建立却直至 20 世纪 30 年代,在福勒



图 1-1

提出热力学第零定律的基础上才得以完成.

1.3.1 热力学第零定律 温度

将两个系统用一个位置固定的壁隔开,使两个系统之间不发生物质的交换和力的相互作用.当两个系统通过壁互相接触时,若两个系统的状态可以独立地改变而彼此互不影响,则此壁称为**绝热壁**,图 1-2 表示系统 A 和系统 B 用绝热壁隔开,图中用双实线间加斜线表示绝热壁.非绝热的壁称为**透热壁**,图 1-3 表示系统 A 和系统 B 用透热壁隔开,图中用单实线表示透热壁.两个系统通过透热壁相互接触称为**热接触**.

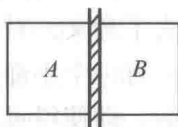


图 1-2

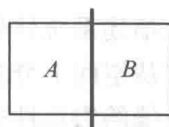


图 1-3

设有两个系统原来各自处于平衡态,现使它们发生热接触.实验表明,一般两个系统发生热接触后各自的状态都会发生变化,若无外界影响,经过一定时间后,两个系统的状态不再发生变化,这说明这两个系统整体上达到平衡态,此时称两系统达到**热平衡**.由于达到热平衡的两个系统脱离热接触,在无外界影响的条件下,各自状态均保持不变,故可知处于热平衡的两个系统各自均处于平衡态.

若有 A、B、C 三个系统,在没有外界影响的条件下,若将系统 A 和系统 B 用绝热壁隔开,并使它们同时与系统 C 发生热接触,如图 1-4 所示.经过一定时间后,系统 A 和系统 C,系统 B 和系统 C 均达到热平衡.此时若将系统 A 和系统 B 用绝热壁同时与系统 C 隔开,再使系统 A 和系统 B 发生热接触,如图 1-5 所示,则可以发现系统 A 和系统 B 的状态不再发生变化,表明系统 A 和系统 B 也相互处于热平衡.这个实验事实说明:如果两个系统同时与第三个系统处于热平衡,则这两个系统也必处于热平衡.这个结论说明了热平衡具有可传递性,称为**热平衡定律**或**热力学第零定律**.

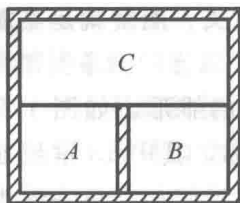


图 1-4

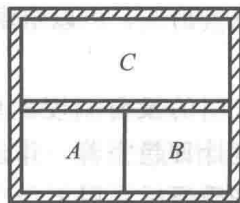


图 1-5

热力学第零定律说明处于热平衡的所有系统应具有某一个共同的宏观性质，物理学中把表征这一个个性的物理量称为温度。即温度是决定系统是否与其他系统处于热平衡的物理量，一切相互处于热平衡的系统都具有相同的温度。

由于相互处于热平衡的系统具有相同的温度，这就为用温度计测量系统温度提供了依据。让热容量足够小的温度计与待测系统热接触而达到热平衡后，温度计所指示的温度即为待测系统的温度。

1.3.2 温标

热力学第零定律指出了温度概念的物理本质，但是这样的定义是定性的，完全的温度定义还要包括温度的数值表示法。温度的数值表示法称为温标。

建立一种经验温标需要包括三个要素：

- (1) 选择某种物质(称之为测温物质)的某一个随温度变化的属性(称之为测温属性)来标志温度；
- (2) 选取温度的固定点(如怎样叫 0 度，怎样叫 100 度等)；
- (3) 规定测温属性随温度的变化规律(为使分度均匀，一般规定成线性关系)。

下面结合常用的水银温度计说明历史上的摄氏温标是如何建立的。水银温度计以汞为测温物质，以汞柱高(即汞的体积)为测温属性。历史上的摄氏温标的固定点，选冰点为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (纯水和冰在标准大气压下平衡共存时的温度)，沸点为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (纯水与水蒸气在标准大气压下平衡共存时的温度)。规定温度与汞柱高成线性关系，以 h_0 和 h_{100} 分别表示 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的汞柱高， h 为温度 t 时的汞柱高，则

$$t = 100 \times \frac{h - h_0}{h_{100} - h_0} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

实际上，任何一种物质的任何一个属性，只要它随温度的改变而发生单调的、显著的变化，都可以选来标志温度，制作各种不同的摄氏温度计。例如，可选氢气为测温物质，保持其体积不变，以压强为测温属性，制作氢气等体温度计；也可选二氧化碳为测温物质，保持其压强不变，以体积为测温属性，制作二氧化碳等压温度计；或可选铂为测温物质，以其电阻为测温属性，制作铂电阻温度计；还可选铂-铂铑热电偶为测温物质，以其温差电动势为测温属性，制作铂-铂铑热电偶温度计；等等。

用各种不同的摄氏温度计去测量同一个系统的同一个平衡态的温度时，所

得结果不完全相同. 图 1-6 画出了用上述几种摄氏温度计在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间做实验得到的结果, 图中横坐标 t 为氢气等体温度计的读数, 纵坐标 Δt 为其他温度计读数与氢气等体温度计读数之差. 可见, 用不同测温物质或用同一测温物质的不同测温属性建立的摄氏温标, 除冰点与沸点按规定相同以外, 其他温度并不严格一致(一般 Δt 的数量级为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近最大). 这是因为不同测温物质或同一测温物质的不同测温属性随温度的变化关系是不同的, 如果规定了某一物质的某个属性与温度成线性关系而建立温标, 则其他测温属性一般就不再与温度成严格的线性关系了.

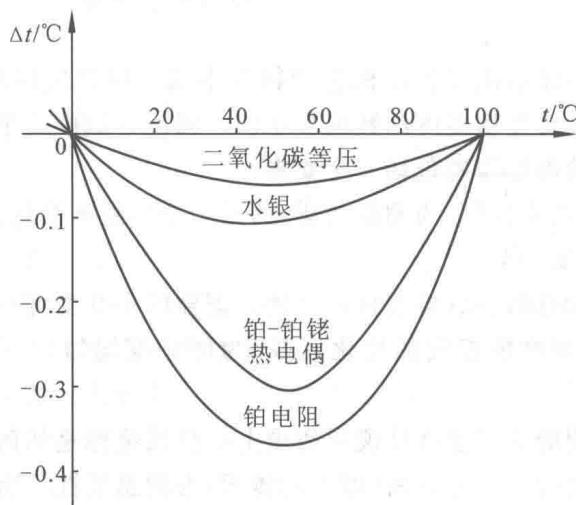


图 1-6

像摄氏温标这类以某种物质的某种属性为基础建立的温标称为**经验温标**, 经验温标与测温物质和测温属性的选取有关.

1.3.3 理想气体温标

与测温物质和测温属性的选取有关是经验温标的重大缺陷, 为使温度的测量统一, 需要建立统一的温标, 在计量工作中采用理想气体温标为标准温标. 理想气体温标用气体温度计来实现.

气体温度计有两种, 一种是气体等体温度计, 即保持测温气体的体积不变, 以测温气体的压强为测温属性, 图 1-7 是气体等体温度计的示意图. 测温泡 B 内储有一定质量的气体, 经毛细管与水银压强计的左臂 M 相连. 测量时, 使测温泡 B 与待测系统热接触, 上下移动压强计的右臂 M' , 使左臂中的水银面在不同温度下始终固定在同一位置 O 处, 以保持气体的体积不变. 待测温

度不同, 气体的压强不同, 这个压强可由压强计两臂水银面的高度差 h 和右臂上方的大气压强求得。

另一种气体温度计是气体等压温度计, 即保持测温气体的压强不变, 以测温气体的体积为测温属性。气体等压温度计的结构和测量操作都要复杂得多, 除在高温范围外也较少使用, 故不在这里具体介绍。

前面已经提到, 利用气体等体温度计和气体等压温度计都可以建立摄氏温标。现在讨论如何建立理想气体温标。以气体等体温度计为例, 用 $T(p)$ 表示气体压强为 p 时的温度, 规定 $T(p)$ 与 p 成正比, 即 $T(p) = \alpha p$, 比例系数 α 根据选定的固定点来确定。由于冰点和沸点要求在标准大气压下, 难以精确实现, 于是 1954 年国际上规定以一个固定点, 即水的三相点来建立温标, 并规定其温度为 273.16 K (开)。水的三相点是纯水与冰和水蒸气平衡共存的状态, 其压强 $p = 661.3 \text{ Pa}$ 是唯一确定的。设 p_{tr} 为测温气体在水的三相点时的压强, 则 $273.16 \text{ K} = \alpha p_{\text{tr}}$, $\alpha = 273.16 \text{ K} / p_{\text{tr}}$ 得以确定, 于是可得气体等体温标为

$$T(p) = 273.16 \frac{p}{p_{\text{tr}}} \text{ K} \quad (1.1)$$

气体等压温度计依然以水的三相点为固定点, 用 $T(V)$ 表示测温气体体积为 V 时的温度, V_{tr} 为测温气体在水的三相点时的体积, 可得气体等压温标为

$$T(V) = 273.16 \frac{V}{V_{\text{tr}}} \text{ K} \quad (1.2)$$

气体等体温标和气体等压温标也是经验温标, 实验表明, 当气体温度计内装有不同气体时, 其气体等体温度计和气体等压温度计均除按规定在水的三相点有相同的读数外, 对其他温度的读数也存在微小差别, 而且, 这些微小差别在温度计所用气体趋于极度稀薄时逐渐趋于消失。

例如, 用几个不同的气体等体温度计测量水的沸点温度。温度计内分别装入氢气、氦气、氮气、空气、氧气, 用逐渐抽出温度计内气体的办法改变温度计在水的三相点时的压强 p_{tr} 。对一定的 p_{tr} , 测得水的沸点压强为 p_s , 依 (1.1) 式可求出相应的温度 $T(p_s)$ 。把这几个温度计的测量结果画成 $T(p_s) - p_{\text{tr}}$ 曲线, 并外推到 $p_{\text{tr}} \rightarrow 0$, 如图 1-8 所示。可见, 这几种不同的温度计的测量值的微小差别随着压强 p_{tr} 的减小而减小, 并趋近于零。

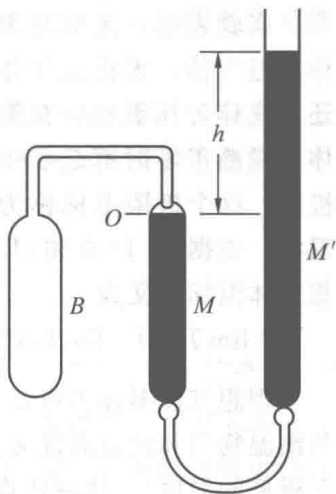


图 1-7

实验表明, 无论使用什么气体作测温气体, 无论是气体等体温标还是气体等压温标, 在温度计内气体压强趋于零时都趋于一个共同的极限, 这个极限温标称为**理想气体温标**. 根据(1.1)式和(1.2)式, 理想气体温标定义为

$$T = \lim_{p_{\text{tr}} \rightarrow 0} T(p) = \lim_{p \rightarrow 0} T(V) \quad (1.3)$$

理想气体温标不再是经验温标, 与测温物质和测温属性无关. 但理想气体温标毕竟还依赖于气体的共同属性, 对极低的温度(气体液化点为下限)和高温(1 000 °C 为上限)不能适用. 用液化温度最低的氦作测温物质, 理想气体温标所能测量的最低温度为 1 K, 在理想气体温标中低于 1 K 的温度是没有意义的.

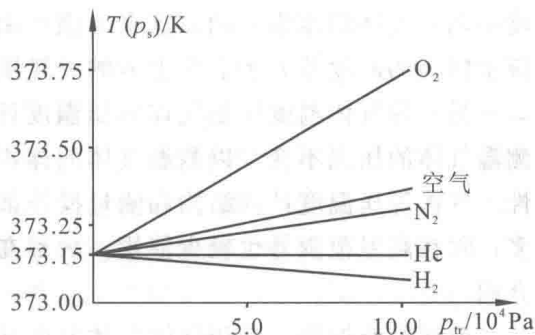


图 1-8

1.3.4 热力学温标

热力学温标是在热力学第二定律的基础上建立起来的, 它完全不依赖于测温物质和测温属性, 没有使用温度范围的限制. 国际上规定热力学温标为基本温标. 热力学温标又称**绝对温标**或**开尔文温标**, 用 T 表示. 热力学温标所确定的温度叫**热力学温度**或**绝对温度**, 单位为 K(开), K 是国际单位制中的基本单位之一. 在热力学温标中规定水的三相点的温度为 273.16 K, 热力学温标中的 **0 K** 称为**绝对零度**.

可以证明, 在理想气体温标所能确定的温度范围内, 理想气体温标与热力学温标完全一致, 故二者的符号和单位均以 T 和 K 表示.

为统一热力学温标和摄氏温标, 国际计量大会于 1960 年对摄氏温标做了新的定义, 规定摄氏温标由热力学温标导出, 摄氏温标仍用 t 表示, 定义为

$$t = T - 273.15 \quad (1.4)$$

热力学温度 273.15 K 为摄氏温标的零点, 摄氏温度的单位仍用 °C. 热力学温标的分度与摄氏温标分度相同, 即热力学温度相差 1 K 时, 摄氏温度也相差 1 °C.

现在定义的摄氏温标与前面讨论过的历史上的摄氏温标有根本的区别. 现行摄氏温标以热力学温标为基础, 已不再是经验温标.

由于制作实现热力学温标的标准气体温度计技术上较为困难, 测量操作复杂, 且测温范围受到限制. 为统一温度计量, 自 1927 年起国际上多次制定协