

温度测量基础

凌善康 李湜然 编著
中国标准出版社

温度测量基础

凌善康 李湜然 编著

中国标准出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

温度测量基础/凌善康 李湜然编著. —北京: 中国标准出版社, 1997

ISBN 7-5066-1392-1

I. 温… II. ①凌…②李… III. 温度测量-基础理论 IV. TB942

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 06625 号

中国标准出版社出版

北京复兴门外三里河北街16号

邮政编码:100645

电 话:68522112

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

版权专有 不得翻印

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 $\frac{7}{8}$ 字数 398 千字

1998 年 1 月第一版 1998 年 1 月第一次印刷

*

印数 1—1 500 定价 33.00 元

前 言

本书对 0.5K 到 3 000K 范围内的各种常用测温仪器的工作原理、使用方法、量值分度、计量传递和误差分析作了综合性的阐述。这段温区和相应的仪表,因涉及到广泛的科研领域和普遍的工业应用,故本书将会受到有关科技人员和高等院校师生的关注。

随着科学技术的日新月异,温度仪表在高精密度、高自动化测量方面,取得了惊人的进展。这些进步反过来又促进了科学进步和工业产品质量的迅速提高。

近 10 年来,国际温度界出现了两件大事:即 1989 年国际计量委员会(CIPM)通过了“1990 年国际温标(ITS 90)”,并宣布从 1990 年 1 月 1 日起生效,以代替“1968 年国际实用温标(1975 年修订版)(IPTS-68'75)”和“1976 年 0.5K 到 30K 暂行温标(EPT 76)”。从 1990 年起,一切温度测量都以 ITS 90 为准。新温标的实现,使全世界的温度测量的准确度提高到一个新水平,使温度测量值更接近于热力学温度值。其二,国际电工委员会(IEC)和国际标准化组织(ISO)于 1995 年颁布了基于 ITS 90 的各种热电偶分度表(IEC 584)和工业热电阻分度表(IEC 751)。这对全世界工程企业界,都是至关重要的,本书中详细地作了说明,并

列出了这些新表格。采用这些新分度表,对有关企业执行 ISO 9000 系列,是不可缺少的,否则它们的质量体系将是不健全的,或者是不合格的。

本书共分七章,包括温度与温标、原级测温、国际温标的实现及量值传递、电阻温度计、热电测温法、辐射测量温度方法、玻璃液体温度计及两部分国际最新的标准分度表。

大家知道,温度测量是一个重要的科技领域。因为温度作为一个基本物理量,与许多物质有着十分密切的关系。举例说吧,有文献报道:如果在金属冶炼过程中,热工状况(主要是温度和流量)能得到准确地控制,则能源消耗能降低 17%,劳动生产率提高 18%,可增产金属达 15%(即每 10t 金属可增产 1.5t),效益十分可观。测温的重要性可见一斑。我们希望本书对各方面有所裨益。

最后,借此机会,作者应对中国标准出版社社长陈宽基先生和复旦大学物理系戴乐山教授给予的鼓励和支持,表示衷心的感谢!

目 次

第一章 温度与温标	1
第一节 历史的纵观	1
第二节 温度	7
第三节 温标	21
第四节 温度的测量	41
第二章 原级测温	53
第一节 气体温度计	53
第二节 声学温度计	81
第三节 介电常数和折射率测温技术	102
第四节 噪声测温技术	112
第五节 磁测温技术	122
第六节 核定向温度计	134
第三章 国际温标的实现和量值的传递	144
第一节 固定点和物质的相	144
第二节 液(固)-汽平衡 蒸汽压温度计	151
第三节 固-液相变 凝固(熔)点	172
第四节 三相点	197
第五节 二级相变点	212
第六节 恒温装置	218
第四章 电阻温度计	242
第一节 概论	242
第二节 纯金属电阻温度计	255
第三节 合金电阻温度计	278
第四节 半导体电阻温度计	284
第五章 热电测温法	317
第一节 引言	317
第二节 热电现象	318
第三节 理想热电回路的基本定则	322

第四节	热电极的不均匀性	324
第五节	参考铂电极	326
第六节	热电偶材料	328
第七节	热电偶的检定	347
第六章	辐射测温法	356
第一节	引言	356
第二节	若干基本参量	357
第三节	黑体辐射定律	362
第四节	黑体空腔和钨带灯	369
第五节	辐射温度计	378
第七章	玻璃液体温度计	396
第一节	引言	396
第二节	玻璃液体温度计的结构和原理	396
第三节	玻璃液体温度计的误差源	399
第四节	特殊用液体温度计	407
第五节	检定玻璃液体温度计用的恒温槽	409
第六节	液体温度计的检定	417
第七节	结论	423
附录一	名称缩写表	424
附录二	热电偶参考函数	426

第一章 温度与温标

1962年,在华盛顿附近的小镇中,聚集了许多世界著名的测温专家,参加每十年召开一次的以《温度及其在科学和工业中的测量和控制》为题的讨论会。一名记者在开幕聚餐会上提出,请科学家用一两句话让门外汉明白,温度究竟是什么。温度,无论作为名词还是作为术语,都是人们所熟悉的。但是面对这个问题,全场沉寂良久。不是科学家们谦虚,也不是他们反应迟钝,确因满足记者的要求实属非易。因为真正明白温度是什么,必须涉及许多理论问题。为此我们首先沿着历史的足迹,粗略地探索人类对热现象(包括温度的测量和控制在内)的认识过程;然后从各个不同的角度讨论温度的含义;介绍赋予温度以数值的方法。最后说明现代的温度测量,如何实现准确和统一。

第一节 历史的纵观

在浩瀚的历史长河中,人类在征服自然,求得自身的生存和发展的斗争中,不可避免的面对着许多热现象。在不断的利用和控制热的过程中,才逐步建立起象今天的热力学和统计物理那样宏伟的科学殿堂。

历史悠久的中国,在13世纪以前,科学技术曾处于其他国家望尘莫及的地位。考古发现。早在170万年以前,中国元谋人就留下了使用火的遗迹,这是迄今所发现的最早用火的记录。我国最早的古诗集《诗经》(写于公元前1066~481年)中,就有这样的诗句:“二之日(十一月),凿冰冲冲,三之日(一月),纳于凌阴(冰窖)”。这是记叙当时在冬天储藏天然冰,以备夏天使用。其中还有“北风其凉”,“诞置之寒冰”一类的诗句,“凉”和“寒”明显表现出对冷热程度的区分。而在《易经》(公元前11世纪前后)、《山海经》(公元前11世纪到公元前2世纪)中也不乏例证。《礼记》(公元前50年)中有更系统的记录,“凉风至,白露降”,“寒热不节,民多疟疾”,记载了温度的高低,冷热的变化和自然现象与人民

健康的关系。生于公元 27~约 97 年的古代著名科学家王充,在《论衡·寒温篇》中,对热辐射提出精辟的看法。他用“气”来解释“近水则寒,近火则温”,认为“气之所加,远近有差”,“远之则微”,说明了热传递与距离有关。在《论衡·说日篇》中,表明他对物态随温度变化的认识,“云雾雨之征也,夏则为露,冬则为霜。温则为雨,寒则为雪。雨露冻凝者,皆由地发,不从天降”。在《感应篇》中,同时还精辟地分析了热量的量的概念。“依一尺之冰,置庖厨中,终夜不能寒也,何则?微小之感,不能动大巨也……寒不累时则霜不降,温不兼日则冰不释”。

公元前 256~251 年,李冰父子在都江堰的工程中有“积薪烧之”之举,利用热胀冷缩开山劈岭。还据记载,公元 220 年前后,有利用燃气推动观赏灯或信号灯(孔明灯,走马灯等)等的转动,这是利用了冷热空气的对流和 1550 年出现于欧洲的烤肉自转器的原理相同。

更有的记载,表明古代人对温度的粗略估计和测量。如《吕氏春秋》(公元前 239 年)中提及,人们根据水瓶中的水开始结冰,知道天气冷了,鱼和龟会躲藏起来。《淮南子》(公元前 120 年)中说:观察瓶中的结冰状态(融化或冻结),可以断定天气的冷热。这表明,当时已有意识的通过冰和水的转化,判断气温的升降趋势。在生产活动中,人们也早就开始测量温度。《考工记》(公元前 5 世纪)中生动地记载了冶金工业中测量温度的方法:“凡铸金之状,金与锡黑浊之气竭,黄白次之,黄白之气竭,青白次之,青白之气竭,青气次之,然后可以铸也。”这表明当时的工匠已经可以通过火焰的颜色判定熔炉中所熔化的金属温度,其原理同现代的辐射测温法相同。

写于公元前 300 年的我国最早的医书《黄帝内经》是我国人民对人类医学的卓越贡献之一。书中谈到,古代的中国人,很早就知道健康人的体温是恒定的,其中写道:人手腕的温度升高是发烧的症状。战国时期的著名医生扁鹊(公元前 360~310 年)创立了四诊法:望、闻、问、切。其中切就包括医生用手接触患者的身体,用比较法探测患者体温的高低。这种测温方法在古代也用于手工业和农业。由贾思勰写的一本农业书籍《齐民要术》(公元前六世纪)中就记载着:利用微生物发酵加工豆类、酿酒及制奶酪时,就通过手摸以估计发酵物体的温度。

以上的例子,只是说明古代生活在华夏大地上的人们,认识和利用热现象之点滴实例。中华民族的科学成就曾经灿烂辉煌,我们的先人在世界科技史上写下了夺目的篇章。英国人李约翰为我国古代科学技术所吸引,把他的一生用来研究中国科学技术史,他高度评价了中国古代科学技术光辉成就。作为炎黄子孙自应以我们祖先辉煌的业绩而自豪,并应奋进不息。

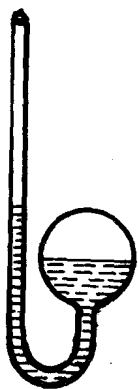
除此之外,世界上其他文明古国在这一领域也为人类的进步作了大量贡献。

在欧洲大陆,公元130~200年时,著名的古罗马医学家 Galen 按希腊哲学家亚里士多德(Aristotle)的概念设计他的温度计,以沸腾的水和相等量的冰组成中间标准,中间温度两边各分四度热和四度冷,其用途已无据可查。此后一千多年,伯尔尼的 Hasler 建立一支温标,把 Galen 的中间温度定为零,并设计了一个纬度标尺,假定赤道地区的居民有第四度热,而极地的居民具有第四度冷。利用这个标尺,可根据患者的居住地配药。

直到1592年,被称为现代科学之父、意大利现代力学和实验物理学创始人,伽利略(Galileo),利用空气热胀冷缩的特性,制成了第一个空气测温器,但由于没有建立温标和其他因素,不能给温度以定量的测量。1632年,让·雷(Jean Rey)利用液体代替空气制成开式的玻璃温度计。1641年,Ferdinand 首创一个密封的并带有等份间隔的酒精玻璃温度计。当时玻璃吹制技术十分高超,制造的温度计精致,但仍然没有对建立有价值的普适温标予以注意。其后,玻意耳(Boyle)于1662年、马略特(Mariotte)于1679年各自独立地研究了气体的性质,创立了玻意耳-马略特定律。玻意耳和牛顿(Newton)也曾研究过温度计。玻意耳在1665年,发表《热的力学原理》的论文中,已确信一切物体的熔点都是常数。因此牛顿把雪的熔点作为自己的亚麻子油温度计的 0° ,而把人体的温度作为另一个固定点 12° 。胡克(Hooke)于1664年,惠更斯(Huygens)于1665年相继用不同方法建立温标。俄国科学家罗蒙诺索夫(Ломоносов)也独立的研制了一个在冰点和水沸点之间分150等份的温标,称罗蒙诺索夫温标。伽勒在1693年发表的文章中,断定水的沸点

不变。雷纳尔金 1694 年提出设想,把水的冰点和沸点作为温度计刻度的固定点。这时的温度测量有一个问题,不同构造的温度计测量同一温度会给出不同的数值,即使是同一构造的温度计,由于技术上的困难,测量同一温度,仍不能得到相同的结果。

历史进入 18 世纪初,阿蒙顿(Amontons)改进了伽利略的气体测温器,注意到空气的压强可以作为温度的量度。1702 和 1703 年,《巴黎学报》记载了阿蒙顿的温度计(见图 1-1)。用两个液面的高度差来度量储气器中气体的压强,而压强随温度的变化而变化,所以通过压强差可以测量温度的变化。同时,他还把水沸点和熔点作为两个固定点。因为当时不知道水沸点取决于大气的压强,所以温度计不够准确。但阿蒙顿的研究为后来的物理学家和化学家盖·吕萨克(Gaylussac)和道耳顿(Dalton)对气体性质的研究作出了先例。



华伦海特(Fahrenheit),这个气象仪器的制造者,掌握吹制玻璃的技术。他受阿蒙顿工作的激励,1709 年曾用酒精作为测温物质做温度计,1714 年改用水银,第一个制造了可靠的水银温度计。1724 年,在他的论文中说明了他用三个固定点:即冰和盐水混合物的温度定为 0° ,人体血液的温度定为 96° ,他们

图 1-1 阿蒙顿的气体温度计示意图 之间分为 96 等份,第三个固定点为冰水混合物,定为 32° 。而在 1724 年以后,又把水的沸点定为 212° 作为第四个固定点,这样首先建立了可靠的温标。华伦海特的贡献还不止于此,他在阿蒙顿的启发下,作了一系列实验,发现每一种液体都和水一样,有一个固定的沸点,也注意到沸点随大气的变化而变化,这些发现为进一步研究奠定了基础。

此外,法国的列缪尔(Réaumur)设计了另一种温度计。他不满意阿蒙顿的气体温度计,但又大不熟悉华伦海特的温度计。他认为水银的膨

胀系数较小,所以没有采用水银作为测温物质,而是选用了酒精加 1/5 水。他发现这种液体在结冰温度和沸点温度之间,体积从 1 000 个单位膨胀到 1 080 个单位,因此他把冰点和沸点之间分为 80 等份,这就是列氏温标。瑞典的天文学家摄尔修斯(Celsius)1742 年定水的沸点为 0° ,把水的熔点定为 100° 。后来他的合作者 Strömer 把两个固定点颠倒过来,定水沸点为 100° ,冰的熔点为 0° ,成为摄氏温标,也称百分度温标。

当时温标的种类很多,据统计,在 1740 年有十三种,而在 1779 年有十九种之多。但现在留下来的只有三种:在英国和美国流行使用华氏温标,在德国列氏温标占优势,而法国却使用摄氏温标。

从 18 世纪开始,测温学沿着分别由阿蒙顿和华伦海特所开创的道路向前发展,一条是由气体温度计为起点的热力学测温技术,另一条则是由水银温度计为起点的实用测温技术。如果说阿蒙顿设计了有价值的气体温度计,成为绝对测温的先驱。那么就可以说,华伦海特的工作开创了实用测温的先河。我国著名的物理学家王竹溪也说过,华伦海特的工作使热学走上了实验科学的道路。

直到 18 世纪前半期,人们对温度计测量的是什么物理量尚含混不清,通常认为被测量的是热量。人们对温度也认识不清,甚至把温度同热量混为一谈。在 18 世纪的一些著作里,可以找到证明。例如,常有“失去多少度热”,或说某物体“具有多少度热”的字样。1762 年,布莱克(J. Black)从他著名的冰融化实验得出结论,在冰的熔解中,需要一些不能为温度计察觉的热量,他用术语“潜热”表示这个热量。以后他又作了不同物体混合后的热量分配实验,从而再清楚不过的把“热量”和“温度”这两个概念区分开来。1798 年伦福德(Rumford)从研究金属的摩擦发热,得到这样的结论:热能够持续不断产生,就非是一种运动不可。这一结论把“热”同“功”联系起来,由此引起人们对热和功的研究,从而产生一系列热力学定律。

1824 年以后,先后有十几位科学家,在不同的地点,用各种不同的途径,各自独立地提出热力学第一定律。迈尔(Mayle)在 1824 年的论文中,用“不能无中生有”和“原因等于结果”的哲学原理表达了他对物理

和化学过程中的守恒思想。焦耳(Joule)用大量的实验为这个定律的建立打下坚实的基础。亥姆霍兹(Helmholtz)通过对动物的生理作用的定量研究,证明了能量的守恒。1853年汤姆逊(Thomson,后来的开尔文(Kelvin)爵士)给热力学定律以数学表述。值得指出的是,法国工程师卡诺(Carnot)曾在1832年死之前,就独立的发现热功转化的定律,但他的文章是在他死后,于1878年由他弟弟发表。

热力学第二定律的发现与热机效率的研究有关。卡诺于1824年在一篇论文中阐述了后来被称为卡诺定理的发现。直到50年代,物理学家克劳修斯(Clausius)和开尔文从功能转换的观点分析了卡诺定理的意义,以不同的表述总结出热力学第二定律。1848年根据卡诺定理,开尔文建立了热力学温标,这是计温学中一个重要的里程碑。克劳修斯和开尔文不仅建立了热力学第二定律,而且对这一普遍原理在具体实验中的应用也非常注意,曾研究过压强对熔点的影响,饱和蒸汽压同温度的关系,温差电现象等。

1871年, Siemens 发现铂电阻温度计的测温原理,制造了第一支铂电阻温度计。1887年,卡伦达(Callendar)从事一系列电阻温度关系式的研究,得到了著名的卡伦达公式,并改进了铂电阻温度计的工艺和研制了测温电桥。后来,铂电阻温度计成为国际温标的内插仪器,一直沿用到今天。勒夏忒列(Le chatelier)于1885年使用热电偶测温。

1912年,能斯特(Nernst)用两个已经得到的热力学定律解决热化学问题,讨论极低温时总能量和自由能的关系,从而补充一个低温现象的定律,称之为热力学第三定律。后来,否勒(Fowler)于1949年又把有关热平衡的现象归结为热力学第零定律。这四个定律是构成热力学的基石。它们可以简单的作如下的表述:第零定律——制造温度计是可能的;第一定律——能量是守恒的;第二定律——不是全部热量都可以转化为功;第三定律——我们永远不能到达那个最低温度。

几乎与热力学发展的同时,根据分子运动解释物质的宏观性质的统计物理学也发展起来。克劳修斯、玻尔兹曼(Boltzmann)和麦克斯韦(Maxwell)是分子运动论的主要奠基者,1902年,吉布斯(Gibbs)把克劳修斯和玻尔兹曼创立的统计理论推广和发展成为系统的理论。1900

年,普朗克(Planck)创立了量子论,1924年,玻色(Bose)-爱因斯坦(Einstein)发现了第一种量子统计;1926年,由费米(Fermi)-狄拉克(Dirac)发现了另一种量子统计。并在同年建立了量子力学。与此相应的,统计力学也分为两个部分:一个是经典统计物理,另一个是量子统计物理。随着科学理论的发展,逐步揭示出真理的奥秘,人们才一点一点地科学地完整地认识了温度概念的底蕴。可以说,温度的概念是在热力学和统计物理的基础上建立起来的,在此之前不可能认清它的真谛。

第二节 温 度

我们给冷热程度以数值的表示称为温度。温度虽然可以凭人的感官感觉,但人的感觉受各种因素的影响,如果你去摸同样温度的铁和泡沫塑料,你会感到铁是凉的而泡沫塑料是温的,这是感觉欺骗了你。分别从北极和赤道同时来到北京的人,会对北京的气温有不同的评价,北极的来人会认为北京很热,而赤道的来人会给出截然相反的结论。所以,人的感觉不能作为温度的尺度,甚至让人们作出错误的判断。

一、温度的宏观概念

1. 热力学的有关知识

热力学中所研究的对象是热力学系统,这是人为地分割出来作为热力学分析的宏观对象。热力学系统主要可以分为三种类型:孤立系统是与外界没有任何作用的系统;封闭系统是指与外界没有任何物质交换,但可有能量交换的系统;开放系统是与外界既可交换物质,又可交换能量的系统。

物质能够存在于稳定的、不随时间变化的宏观状态之中,此状态称为平衡态。平衡态是这样一种状态,在其中,过去的历史全部被遗忘,一切宏观量不再随时间变化。但是,组成系统的粒子始终在作不断的无规则的运动。将两个最初隔离的系统通过一个共同的壁相互接触,如果这个共同的壁能够传热,它就称之为透热壁,那么这两个系统最后会共同达到一个新的热平衡态。如果共同壁不传热,称为绝热壁,则每个系统各自保持其原来的状态不变。实验证明,当几个系统发生热接触,作为

一个整体达到平衡后,如果再把它们分开,并不改变每个系统本身的热平衡的状态。这表明,热接触只是为热平衡的建立创造条件。

处于热平衡的系统有一个惊人的特征,虽然它们包括着极大数目的作随机运动的自由度($\sim 10^{23}$),然而只用几个参量就可以描述它的热力学状态,这些参量称之为状态参量(或变量)或热力学参量(或变量)。一般地讲,用来确定系统热力学状态的参量有许多,但只有少数几个为独立的。如果选定一组独立的参量,它们就可以定义一个热状态,其他的参量都是它们的函数。当我们改变系统的热力学状态时,状态参量必须与所取的路径无关,否则状态参量将包含这个系统的历史信息,这与平衡态的定义不符。

描述平衡态系统状态参量之间的函数关系式称为状态方程。它减少了描述系统状态所需要的独立自由度的数目,通常是将系统的热状态变量 T 和力学变量联系起来的。方程中,包含大量有关系统热力学行为的知识。

状态参量可以分为广延量和强度量或内涵量。当系统的大小(在空间延伸的范围和自由度的数目)改变时,广延量的数值必然变化,而强度量则不变。一个强度量经常和一个广延量同时出现,因为它们在热力学功的表达式中,分别对应于广义力和广义位移。如 N (粒子数)和 μ (每个粒子的化学势)、 V (体积)和 p (压强)、 S (熵)和 T (温度)、 M (磁化强度)和 H (磁场强度)、 P (极化强度)和 E (电场强度)等。

通过大量观测得到如下结论:任何两个分别同第三个热平衡的热力学系统,相互间也必处于热平衡。这个结论因为命名于热力学第一、第二和第三定律之后,但又是这三个定律的基础。所以被称为热力学第零定律。这个定律反映出,处于同一热平衡状态的所有热力学系统都具有一个共同的宏观性质。

2. 温度的热力学概念

1907年,希腊数学家卡拉西奥道里(Carathpody)以热力学第零定律为基础提出如下定理:互为热平衡的热力学系统,具有一个数值相等的状态函数(即平衡态状态参量的函数),这个状态函数称为温度。

两个互为热平衡的物体,可用一个状态方程表述。现假定物体 A

的态变数为 x_1, \dots, x_n , 物体 B 的态变数为 y_1, \dots, y_m , 则 A 与 B 的平衡条件将是

$$P(x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m) = 0 \quad (1-1)$$

又假定物体 C 的态变数为 z_1, \dots, z_k , 那么 A 与 C 和 B 与 C 的热平衡条件分别为

$$Q(x_1, \dots, x_n; z_1, \dots, z_k) = 0 \quad (1-2)$$

$$R(y_1, \dots, y_m; z_1, \dots, z_k) = 0 \quad (1-3)$$

根据热力学第零定律, A 分别与 B 和 C 平衡时, 则 B 与 C 必定平衡。那么可将(1-1)和(1-2)两式中的 x_1, \dots, x_n 消去, 可得到(1-3)式。

应当注意: 在 $1, 2, \dots, n$ 数字中, 定会有一个数字 i , 使 $\partial P/\partial x_i \neq 0$, $\partial Q/\partial x_i \neq 0$ 同时成立。不然 P (或 Q) 中包括的 x_i 就不会在 Q (或 P) 中出现, 从而不可能从 P 和 Q 中消去 x_i , 因此, B 和 C 的平衡就不可能与 A 和 B 及 A 和 C 的平衡发生关系, 这是和热力学第零定律相违背, 因此可以令

$$\partial P/\partial x_i \neq 0, \quad \partial Q/\partial x_i \neq 0$$

并可根式(1-1)和(1-2)解得

$$x_i = P'(y_1, \dots, y_m; x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \quad (1-4)$$

$$x_i = Q'(z_1, \dots, z_k; x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \quad (1-5)$$

因此有

$$\begin{aligned} P'(y_1, \dots, y_m; x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \\ = Q'(z_1, \dots, z_k; x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (1-6)$$

(1-6)式应当相当于(1-3)式, 因此, 其中不应包括 $x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n$, 这只有在 P' 和 Q' 为下面的形式时才有可能。

$$\begin{aligned} P' = H(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) b(y_1, \dots, y_m) \\ + L(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$\begin{aligned} Q' = H(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) c(z_1, \dots, z_k) \\ + L(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (1-8)$$

$$\text{令} \quad a(x_1, \dots, x_n) = \frac{x_i - L(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)}{H(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \quad (1-9)$$

由式(1-9)和(1-5), (1-6), (1-7), (1-8), 可有

$$a(x_1, \dots, x_n) = b(y_1, \dots, y_m) = c(z_1, \dots, z_k) = \theta \quad (1-10)$$

θ 是某一温标的温度。式(1-10)说明, A、B 和 C 三个处于热平衡的物体, 都具有一个数值相同的状态参量, 这个状态参量就被称为温度。我们应该注意到: θ 并未完全确定, 因为 θ 还可以用下式表示

$$\Theta(\theta) = \Theta(a(x_1, \dots, x_n)) = \Theta(b(y_1, \dots, y_m)) = \Theta(c(z_1, \dots, z_k)) \quad (1-11)$$

其中 Θ 是任一函数。数学上函数的不确定性, 表现在物理上就是温标选择的任意性, 只有在温标确定之后, 温度 Θ 才能确定。

这样, 可以概括的说: 温度是决定一系统是否与其他系统处于热力学平衡的宏观性质, 它的特征就在于一切互为热平衡的热力学系统都具有相同的温度。温度是系统间是否处于平衡的标志。

二、温度的微观概念

1. 分子动力学的温度概念

统计物理所研究的对象是大量的物质粒子(如原子、分子和电子等)或场量(如辐射场等)所组成的体系, 其目的是根据分子的运动来解释所观测到的物质宏观热学性质。方法是对分子的微观量求平均值。所以, 统计物理的中心任务是计算热力学系统的微观量对一切可能的微观状态的统计平均值, 并以这种平均值作为热力学系统的宏观量来解释它的性质。在给定的宏观条件下, 系统可能的微观状态是大量的, 各种可能的微观状态都会有一定的机会出出现, 即存在着某种微观状态的几率分布函数。函数具体形式与宏观条件有关, 且必须是正的单值函数, 当系统处于平衡时, 分布函数不随时间变化。

麦克斯韦和玻尔兹曼分别于 1859 和 1869 年, 从理论上确定了热平衡系统中的分子速度和能量分布的统计规律。结果指出, 在热平衡系统中, 当系统分子数 N 不变, 那么在速度空间 v 和 $v+dv$ 之间的分子数 ΔN 的比率为

$$\frac{\Delta N}{N} = 4\pi \left(\frac{m\beta}{2\pi} \right)^{3/2} \exp(-mv^2\beta/2) v^2 dv \quad (1-12)$$

式中, β 是特征参量, 它决定了系统的分子速度和能量的分布, 它同温度有关, 温标可以任意选择; 如果选择热力学温度 T , 则有 $\beta = 1/kT$, k