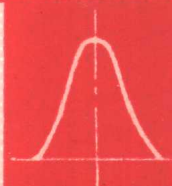
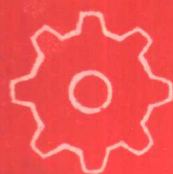


计量技术丛书

温度计量技术

陕西机械学院 林霁栋 编



机械工业出版社

计量技术丛书.

温度计量技术

陕西机械学院 林霁栋 编



机械工业出版社

内 容 简 介

该书主要包括：温度计量的发展概况；温标；电阻温度计；热电偶温度计；辐射温度计；其他有关温度计及传感器；超高温超低温测量；温度计的选择等。每章后列有习题，书末列有附录和习题答案。

该书可作为计量专业的中专班、大专班以及本科、函授班学生教材，亦可供中等以上文化程度的计量技术与计量管理人员参考。

计量技术丛书

(第六分册)

温度计量技术

陕西机械学院 林霖栋 编

责任编辑：黄克勤

封面设计：田淑文

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

通县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092¹/₁₆·印张7¹/₄·字数168千字

1988年9月北京第一版·1988年9月北京第一次印刷

印数 00,001—8000·定价：2.50元

*

ISBN7-111-00842-1/TB·49

“计量技术”丛书编委会

主 编：柏永新

副主编：唐家驹 童 竞

编 委：（按姓氏笔划为序）：

冯炳华	任金铭	刘毓兰
许开君	许泽鹏	李 信
李大成	李斌之	李福利
陈素明	林霁栋	杨国珍
杨致忠	赵瑞生	赵念念
柏永新	高宗海	郭桂珊
夏道智	唐家驹	童 竞
傅庭和	穆志坚	

序 言

我国社会主义四个现代化建设事业的蓬勃发展,要求加快现代化计量科学技术的发展。同时,计量科学技术的进步又有力地促进我国各行业、企业进行的技术改造,使它们尽快地转到现代化技术和现代化管理的基础上来。因此,为了满足各行业、各部门对具有现代计量科学知识的人才的需要,加速人才培养,并提高现有企事业单位计量测试人员的技术水平,我们在陕西机械学院领导的鼓励和支持下,组织我院精密仪器工程系和自动控制系具有丰富教学实践经验的二十名教师,并聘请了陕西省计量局具有丰富工作经验的工程师编写了这套“计量技术”丛书。考虑到计量科学是一门基础性的应用科学,涉及的专业学科有十大类一百四十多项,其内容十分丰富,丛书不可能面面俱到,全面论述。按多数计量测试工作的实际需要,我们编写的丛书比较全面地论述了计量测试中所遇到的机械学,光学,电学和误差理论与数据处理等方面的基础知识,并对长度、温度、力学、电磁和理化等五个方面计量的各种原理、方法和应用技术进行了系统地阐述。这套丛书共包括以下九个分册:

1. 计量机械基础(第一分册)
2. 计量光学基础(第二分册)
3. 计量电学基础(第三分册)
4. 测量数据处理(第四分册)
5. 长度计量技术(第五分册)
6. 温度计量技术(第六分册)
7. 力学计量技术(第七分册)
8. 电磁计量技术(第八分册)
9. 理化计量技术(第九分册)

这套丛书是针对具有中等以上文化程度的在职计量技术和管理人员而编写的,可作为他们的自学和函授教材或有关培训班教材,也可作为大专院校有关专业的教材或参考书。

由于我们水平有限,丛书可能存在不少缺点和错误,我们衷心欢迎广大读者批评指正。

“计量技术”丛书编委会

1987.7

前 言

温度计量技术随着生产和科学技术的发展而发展,而且在很多领域内往往是关键问题。例如在半导体生产中单晶体的培育,单晶片的激光退火温度的测量,新超导材料转变点温度的测定以及生物工程单细胞的温度测量等都是关键的温度计量技术问题。

现在测温对象非常广泛,从微生物到天体,测温时间从几十年的长期温度监测到皮秒级超短瞬间的温度测量,温度范围从 $20\mu\text{K}$ 的超低温到热核反应,精度已达 0.1mK 。这就是20世纪80年代国际上温度计量技术的现状和水平。

在我国四个现代化的任务中属于温度计量的许多课题已提到日程。如果我们不积极地去学习和研究这些问题,在温度计量技术方面势将难于达到国际先进水平。陕西机械学院精密仪器系于1983年提出了扩大计量技术专业面的计划,增加了热学、力学、电磁学和理化计量等课程,实践证明扩大计量技术专业面在满足国家对新型计量人才的需要、为专业人材培养打下宽厚的理论基础并增加他们的工作适应能力以及综合解决问题的能力等方面,无疑是正确的和有利的。

编者曾于1983年编写了一本温度计量讲义,当时因时间仓促,来不及收集国际上的新材料,加上当时我国还没有正式采用IEC标准,因此,在旧讲义中许多新技术新知识没有编入。四年来收集了许多资料,对一些理论问题经过独立地推导提出了编者的观点和证明方法,增加了叙述的完整性以弥补过去的不足。本书是根据编者过去的讲稿并参考了国外一些论文和专著而编写的。在编写过程中得到我校名誉教授日本松代正三先生和日本千野公司落合昭弘先生在资料上的大力支援,我校柏永新教授和唐家驹副教授提出了宝贵意见,编者对他们深表谢意。由于水平有限,谬误之处请读者诸君批评指正。

编 者

1987年10月

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 温度与温度计量	1
§ 1-2 对温度测量的现代要求	2
§ 1-3 温度计量学的发展简史	3
第二章 温 标	6
§ 2-1 热力学温标	6
§ 2-2 国际实用温标 IPTS-68	9
§ 2-3 温度量值传递和跟踪能力	12
第三章 玻璃液体温度计	14
§ 3-1 结构及测量原理	14
§ 3-2 特殊温度计	16
§ 3-3 玻璃液体温度计的误差分析	16
第四章 电阻温度计	21
§ 4-1 概述	21
§ 4-2 电阻温度计的测量电阻	23
§ 4-3 半导体测温传感器	26
§ 4-4 测量电阻的基本方法	28
§ 4-5 电阻温度计的电路	29
第五章 热电偶温度计	34
§ 5-1 概述	34
§ 5-2 热电偶原理和热电势	34
§ 5-3 通用热电偶	39
§ 5-4 特殊热电偶	42
§ 5-5 铠装热电偶	44
§ 5-6 保护管、补偿导线和基准接点	45
§ 5-7 热电偶的误差分析	47
§ 5-8 热电偶的检定	50
第六章 辐射温度计	52
§ 6-1 概述	52
§ 6-2 温度辐射的理论基础	54
§ 6-3 光高温计	57
§ 6-4 色温度计	60
§ 6-5 全辐射温度计	63
§ 6-6 辐射率的研讨	66
§ 6-7 红外线测温	71

第七章 其他温度计及传感器	74
§ 7-1 气体温度计	74
§ 7-2 超声波及水晶温度计	77
§ 7-3 热噪声温度计	80
§ 7-4 利用核四极共振现象的温度计	82
§ 7-5 半导体温度计	85
§ 7-6 面声波温度计	87
§ 7-7 光导纤维温度计	89
§ 7-8 固体膨胀差温度计	93
§ 7-9 塞格尔熔锥	94
§ 7-10 测温涂料	95
第八章 超高温、超低温测量	98
§ 8-1 超高温、超低温测量的意义	98
§ 8-2 超高温测量	98
§ 8-3 超低温测量	100
第九章 温度计的选择	103
§ 9-1 各种温度计的特征及选择方法	103
§ 9-2 辐射温度计的选择法	104
附录一 K热电偶(镍铬-镍铝)的分度表(部分摘录, 基准接点为 0°C)	106
附录二 习题参考答案	106
参考文献	108

第一章 绪 论

§1-1 温度与温度计量

一种新建筑材料的热特性、一种新合金的熔点、LSI的温度分布、单晶体的凝固点、超导材料的转变点、地热的利用、森林火灾的报警、火山活动的预测以及反映人体健康状态的指标之一的体温变化等事例中，我们要求获得的主要信息量就是温度。

那么，什么是温度呢？

人类开始凭感觉知道冷暖和一年四季有寒暑的变化。后来观察到物体的长度、液体和气体的容积和人的冷暖感觉一块变化。在中国，三千多年前根据颜色判断金属的温度高低的方法一直流传到今天。（公元前1122年西周周公旦所著「周礼」一书中有文字记载）。在取得定量的温度量值之前的很长的历史时期内，只是凭感觉定性地知道冷暖寒暑而已。

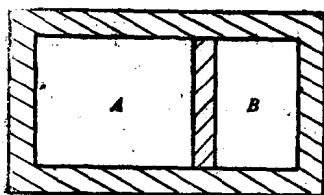


图1-1 热平衡

自从热力学发展以后温度的科学定义才有可能。要了解什么是温度，首先必须掌握热平衡这个概念。如图1-1所示，用绝热壁将A、B全部包围起来，AB之间用透热壁将AB分开。开始时假如A比B热，然后A开始变冷，B开始变热，当达到某个状态时不再发生变化达到平衡状态，这种平衡状态我们叫热平衡。

根据经验和实验，如果A和C呈热平衡，B和C呈热平衡，则A和B也呈热平衡状态。那么，A和B处于热平衡状态用一个什么参数来表示呢？如果我们引用参数 θ 来表示热平衡，那么我们可以用热平衡等于 θ 来表示。即A和B处于热平衡状态都等于 θ 。这个 θ 就是温度。上述有关热平衡的论述在热力学中叫热力学第零定律（即温度存在定律）。当然 θ 可以等于任何值，可以适当地选择温度计从温度计的刻度上读出 θ 值。这样我们将“表征热平衡物体之间的共同的热平衡状态的物理量”叫做温度。或者说温度是表征物体冷热程度在热平衡状态时的物理量。实质上它反映了物体内部分子运动的平均动能的大小。物体愈热温度愈高，它的分子运动的平均动能就愈大。

上面介绍了温度的含义。那么什么是温度测量和温度计量？两者有什么区别？这实质上是测量与计量的区别问题。

首先说明什么是测量，所谓测量是指某个量和基准量进行比较用数值量表示的操作。所谓计量是指研究和实现取得事物的量或进一步把它做为控制手段，研究和实现如何处理测量方法和测量装置并保证量值统一准确可靠等的一系列工作。显然，计量所包括的内容更加广泛。温度计量即研究制定和实施温度标准、测温方法、测温装置以及如何将热变为温度量值或做为控制信号，保证温度量值统一准确可靠，满足各种工程温度计量的需要。

当我们要求知道某物体的冷热程度，只是定性地知道它是冷或是热这是很不够的，我们

要求定量地知道它的冷暖程度，这就需要温度计量技术。

一般讲，当我们测量某一个量时，单凭人的感官直接感受到那个量值几乎是没有的。这种说法听起来似乎难以理解，因为人们在取得事物量值过程好像是很简单的，但实际上它包含着各种过程。例如我们要知道水热不热，先用眼睛看看是否冒汽，如眼睛判断不太热，一般用手试试定性地感觉热不热，如果要定量地知道就需要用譬如水银温度计去量一量，看看水银柱的高低。这时我们看到的不是温度而是水银柱的高度。在水银柱旁有表示温度高低的标尺，标尺上面有刻度，这个刻度表示水银柱长短与温度高低的关系。这样，我们在测量时是将一个量变为另外的一个量进行的，温度传感器（一次变换器）的输入是热而输出对水银温度计来说是水银柱的长度。在温度测量中，首先遇到的问题是温度单位，即所谓的1K或1°C是根据什么确定的？即温度标准问题，因为没有标准就没有统一的依据，无法进行比较也就无法定量的测量并取得量值。其次是测量方法和测量装置如何实现，包括测量原理、测量装置的机理、结构和性能等。

§ 1-2 对温度测量的现代要求

在古代，冶炼业者和医生对温度很关心，在农业上古代耕种者同样关心气温。自18世纪热机发展以后对温度的重视逐渐扩大和加强。以后在化工、金属热加工、消除热障碍等方面对温度测量和控制的要求越来越多。到了20世纪温度计量已扩展至更多的领域。

从测量对象的种类看，可以说是多种多样，包括气体、液体、固体、等离子体和生物体等，空间范围从微生物到地球或天体这样广大的空间范围。

从时间范围看从10年以上的长期温度监测到纳秒（nano second, 10^{-9} s）或皮秒（pico-second, 10^{-12} s）级的温度测量。

从温度范围看从20K的超低温起到热核反应堆 10^8 K止，跨越一亿度这样大的温度范围。

在测量精度方面的要求，现在最精密的测量在室温附近 0.1×10^{-3} K是完全可以达到的，相对精度高于 10^{-6} 。

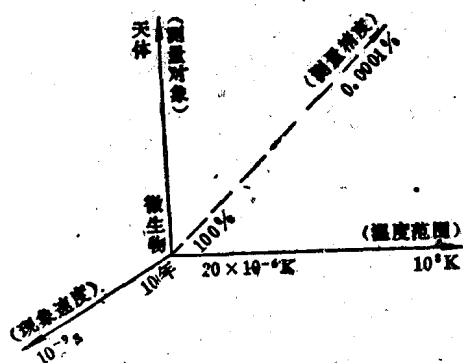


图1-2 赋予温度计量特点的诸因素

科学研究、各行生产事业以及人民生活等现代社会中需要各种水平的温度计量。尤其是技术开发的要求对温度计量的要求就更加紧迫。笔者根据见闻资料试举几个例子以供参考。

在半导体工业中培育单晶（俗称拉单晶）或单晶片表面氧化处理是非常关键的工序。例如晶种从液相慢慢向上提拉培育大单晶。结晶的生长是在该物质的凝固点，要得到优质大单晶在提拉时要很慢才行，因此必须精密测量和控制固相液相界面附近的温度。

在硅片（Silicon Wafer）表面氧化过程中必须精确控制氧化膜的厚度。为此，热处理

温度必须测量控制在 $1000 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围内。半导体材料需要在洁净的环境中进行处理,因此测温手段希望用非接触方式。因为单晶内掺入一些杂质,因此结晶表面层产生了应力,必须进行退火以便使其成为优质单晶。为此,必须用脉冲激光(pulse laser)对表面层进行瞬间加热,使其达到熔点以上温度,然后使其在急冷过程中进行外延生长(Epitaxy)。这项技术叫做激光退火(Laser anneal),加热冷却速度大约在10ns内进行。测量时间比10ns还要小。

在轧钢车间中钢板压延大约以几十米每秒的速度在流动。如果能准确及时地测出流动钢板的温度,则不仅可以提高产品质量和生产率而且可以节能。在热处理工序中钢的相变温度在 $700 \sim 800^\circ\text{C}$ 范围内,温度的时间控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 内进行。

在发电站尤其是核电站和火电站,测温不仅是项重要工作参数,而且往往是安全保险工作中的重要一环。例如核电站在核反应堆中的超高温电子或离子放出的电磁波(光、X线)或粒子,根据放出的电磁波或粒子的信息来推定温度。此外,温度计受核反应堆中放出的中子的辐射,如何解决温度计的耐久性问题,目前看还都是比较困难的课题。

在环保科学中温度信息是很重要的。这个领域的温度测量的特点是对象广泛。例如从气象卫星或高空飞机上观测地表面的温度分布或海面的温度分布。研究如何利用地热或火山活动,必须测出地下的温度分布。此外如森林火灾监测及预报,以上这些均属二维温度分布图测绘的问题。

此外,还有微小物体的测温问题。集成电路(IC)或大规模集成电路(LSI)的发热问题关系到集成度的界限问题,要求测出电路板的温度分布图,根据温度分布图改善并提高集成度。

如上所述测温对象是多种多样的,它们分别在图1-2中占据着各自的领域。对应每个领域,必须选择适当的测温方法和温度传感器。但是,现有的温度计量技术只能解决图1-2的坐标系中一部分领域内的测温问题,还有很多领域现在还不能测量,为了解决这些问题,首先研究开发新的温度传感器是非常必要的。温度计今后的开发目标大体如下述五个方面。

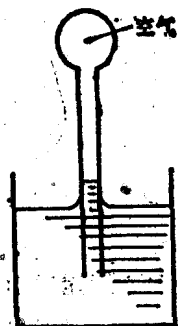
- ① 微小体积的测温。
- ② 广泛范围的二维温度分布。
- ③ 高分辨率。
- ④ 高速、超高速响应特性。
- ⑤ 高可靠性——其中包括稳定性、复现性、互换性(国内和国际)、精密度(标准、校正、跟踪)。

§ 1-3 温度计量学的发展简史

温度计量学是总结研究温度计量的一门学科。这个学科包括温标、测温原理、测温方法和手段等内容。同时也包括温度量值的处理和做为控制信号的应用以及各种新温度传感器的研究。它是随着热力学、温标、温度计和温度传感器的发展而形成的一门学科。

世界上第一支温度计是1597年意大利的伽里略(G. Galileo)发明的,其原理如图1-3所示。一个充满空气的玻璃管将开口朝下插在水杯内,玻璃管的顶部是球状的,当球部及玻璃管周围环境温度升高时,管内空气膨胀使管部水柱下降,以此来判别冷暖。

世界上最早发明而且有重要意义的温度计是1641年意大利的Ferdinand II发明的封口式的玻璃酒精温度计。这种温度计较伽里略的所谓温度计要进步得多，这是因为它是密封式的与大气压力无直接关系，而且有刻度（50度），但因当时没有温标，所以这50度是没有科学依据的，但它具有温度计的雏形。它因为没有温标为依据而被淘汰。



下面介绍有实用价值而且在历史上起过重要作用，甚至在今天仍在继续使用，在温度计量学发展史上占有一定地位的各种温标。

1) 1714年德国的华林海特 (G. D. Fahrenheit) 不仅制造出水银温度计，而且第一次提出他自己的温标，后来人们叫做华氏温标。图1-3 伽里略的温度计把冰水加盐的混合液体的温度做为 0° ，把人体的温度做为 100° ，以这两个点为标准。后来改为水的冰点为 32°F ，水的沸点为 212°F ，形成了华氏温标。

2) 1730年法国的列奥缪尔 (R. eavmur) 提出：将水的冰点做为 $0^\circ\text{R}'$ ，将水的沸点做为 $80^\circ\text{R}'$ ，创立了列氏温标。

3) 1742年瑞典的摄尔秀斯 (A. Celsius) 把水的沸点定为 0° ，水的冰点定为 100° 。后来Strömer将他的温标倒过来，水的冰点定为 0°C ，水的沸点定为 100°C ，建立了摄氏温标。

4) 1848年英国的开尔文 (L. Kelvin, 本名William Thomson) 提出热力学温标，根据热力学定律中卡诺原理做为热力学温标的理论依据。热力学温标与特定的物质性质无关，以水的三相点为基准，因此具有稳定性、唯一性、复现性和客观性。前面讲的华氏、列氏和摄氏温标都与特定物质的性质有关。热力学温度也叫绝对温度，单位为“开尔文”，简称“开”以符号K表示。

$$1\text{K} = \frac{\text{水的三相点的热力学温度}}{273.16} \quad (1-1)$$

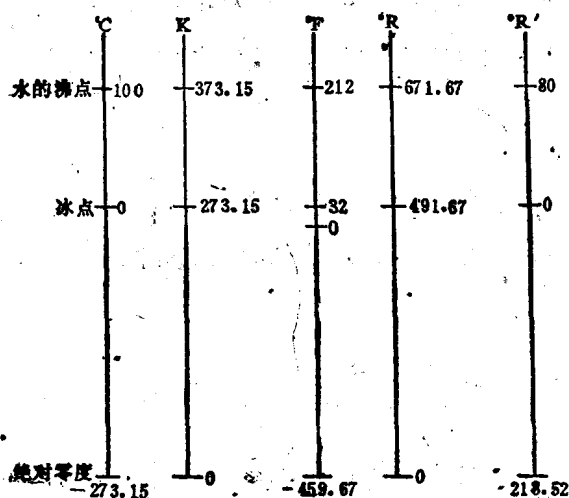


图1-4 各种温标的坐标图

水的三相点的热力学温度为 273.16K 即 0.01°C 。因此，摄氏 0°C 相当于 273.15K 。摄氏温标与热力学温标的数值关系式为：

$$T_K = 273.15 + t_C \quad (1-2)$$

式中的 T_K 表示绝对温度，单位为K； t_C 表示摄氏温度，单位为摄氏度（ $^\circ\text{C}$ ）。

例、若 $t_C = 37^\circ\text{C}$ ，问绝对温度等于多少K。

$$\text{解：} T_K = (273.15 + 37) \text{K} = 310.15 \text{K}$$

5) 兰金 (Rankin) 温度：用绝对温标表示华氏温标叫兰金温度以 $^\circ\text{R}$ 表示。华氏温度换算成兰金温度其数值可用下式表示。

$$T_R = 459.67 + t_F \quad (1-3)$$

式中的 T_R 为兰金温度，单位为 $^\circ\text{R}$ ； t_F 为华氏温度，单位为 $^\circ\text{F}$ 。

6) 各温标间数值的换算公式如下：

① 华氏温度换算成摄氏温度：

$$t_c = \frac{5}{9} (t_F - 32) \quad (1-4)$$

② 摄氏温度换算成华氏温度:

$$t_F = \frac{9}{5} t_c + 32 \quad (1-5)$$

③ 兰金温度与绝对温度互换:

$$T_K = \frac{5}{9} T_R, \quad T_R = \frac{9}{5} T_K \quad (1-6)$$

④ 列氏温度与摄氏温度互换:

$$t_c = \frac{5}{4} t_{R'}, \quad t_{R'} = \frac{4}{5} t_c \quad (1-7)$$

t_c ——表示摄氏温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$

t_F ——表示华氏温度, 单位 $^{\circ}\text{F}$

$t_{R'}$ ——表示列氏温度, 单位 $^{\circ}\text{R}'$

T_R ——表示兰金温度, 单位 $^{\circ}\text{R}$

T_K ——表示绝对温度, 单位K

习 题 一

1. 试解释下列名词:

① 温度; ② 计量; ③ 热平衡; ④ 兰金温度。

2. 试证明 $T_K = \frac{5}{9} T_R$

3. 试将列氏温度 $t_{R'}$ (单位为 $^{\circ}\text{R}'$) 换算成: 摄氏温度 t_c 、华氏温度 t_F 、兰金温度 T_R 、绝对温度 T_K , 试求出它们的换算公式。

4. 试求 -273.15°C 等于多少列氏度 ($^{\circ}\text{R}'$)?

第二章 温 标

§ 2-1 热 力 学 温 标

所谓温标就是为了定量地表示物体的温度，根据标准温度（定义定点）、标准温度计和内插公式所确定的温度计的标度。

在§1-3中我们简要地介绍了华氏温标、列氏温标、摄氏温标、兰金温标和热力学温标。前面四种温标都与特定物质（即盐冰水、水、人体等）的性质有关，在稳定性、唯一性、复现性和客观性这四个方面都存在问题。因此必须找出一种温标，它与特定物质性质无关，而且符合做为温标条件（即稳定性、唯一性、复现性和客观性）的四个方面的要求。

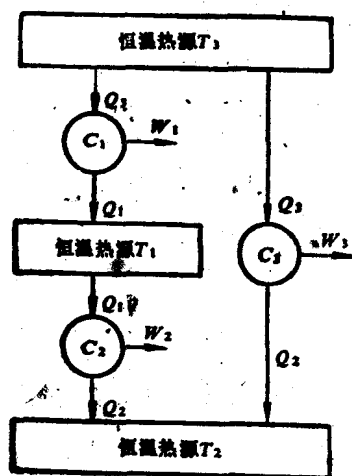


图2-1 卡诺可逆热机

从理论上解决温标的首先是劳尔德·开尔文。在1848年他根据热力学理论中的卡诺定理创出热力学温标。不过当时他不叫劳·开尔文而是叫他的本名威廉姆·汤姆逊 (William Thomson)。因此后来都把这个纯理论的热力学温标叫汤姆逊提案。

一、汤姆逊提案

这个纯理论热力学温标是根据卡诺定理推出来的。因此这里从卡诺定理讲起。

卡诺定理：以理想气体为工质，工作于两恒定热源之间的可逆卡诺循环热机的效率只与两热源的温度有关，而与工质种类无关，而且所有可逆热机效率相等。

1、可逆热机 C_2

由热源 T_1 吸热 Q_1 作功 W_2 ，向热源 T_2 放热 Q_2 其效率为：

$$\eta = \frac{W_2}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

根据卡诺循环（等温绝热）由 $dQ = TdS$ 得：

$$Q_1 = T_1(S_1 - S_2), -Q_2 = T_2(S_2 - S_1), \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \text{代上入式}$$

$$\eta = \frac{W_2}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

所以 $\frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \eta = f(T_1, T_2)$ (2-1)

2、可逆热机 C_1

由热源 T_3 吸热 Q_3 做功 W_1 , 向热源 T_1 放热 Q_1 , 其效率为:

$$\eta = \frac{W_1}{Q_3} = \frac{Q_3 - Q_1}{Q_3} = 1 - \frac{Q_1}{Q_3} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

所以 $\frac{Q_1}{Q_3} = 1 - \eta = f(T_3, T_1)$ (2-2)

3、可逆热机 C_2

由热源 T_3 吸热 Q_3 做功 W_2 , 向热源 T_2 放热 Q_2 , 其效率为:

$$\eta = \frac{W_2}{Q_3} = \frac{Q_3 - Q_2}{Q_3} = 1 - \frac{Q_2}{Q_3} = 1 - \frac{T_2}{T_3}$$

所以 $\frac{Q_2}{Q_3} = 1 - \eta = f(T_3, T_2)$ (2-3)

由于式 (2-1) $\times$ (2-2) 等于 (2-3), 即 $\frac{Q_2}{Q_1} \times \frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_2}{Q_3}$

也即 $f(T_1, T_2) \cdot f(T_3, T_1) = f(T_3, T_2)$

$$f(T_1, T_2) = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{f(T_3, T_2)}{f(T_3, T_1)}$$

若 T_3 为任意一定的温度 (例如标准温度), T_1, T_2 为变量, 则上式可写为

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\psi(T_2)}{\psi(T_1)} \quad (2-4)$$

由式 (2-4) 和卡诺定理我们可得出如下结论:

① 温度只与热有关而与测温介质 (这里是工质) 无关。这就和前面讲的经验温标中的人体体温盐冰水等有本质不同。因此汤姆逊首先解决了与特定物质的性质无关的问题。这就使温标具有客观性。

② 根据卡诺定理, 若两热源的温度一定, 则工作于两热源间的可逆热机效率相等。因此在理论上不会受人体体温的不同或盐冰水由于成份不同而造成不一致性, 从而使温标具有唯一性和稳定性。

但是这个汤姆逊提案 (纯理论的热力学温标) 根本不能实用, 没有复现性。以后又经开尔文等人几经研究找出一种办法, 尽可能和热力学温标一致又能复现的温标, 即热力学温标或开尔文温标。

二、热力学温标

汤姆逊根据热力学卡诺定理提出了纯理论的热力学温标。而卡诺定理所用的工质是理想气体。所谓理想气体是完全遵守波义耳 (Boyle) 和查理斯 (Charles) 定理的假想气体。

波义耳定理: 当 $T = \text{一定}$ 时, $pV = \text{常数}$

查理斯定理: $p = \text{一定时}$, $V = V_0 (1 + \alpha t) = \alpha \theta$ (t 与 θ 指摄氏度)

开尔文用极稀薄的气体近似地代替理想气体。这个办法很成功。这是因为焦耳—汤姆逊效应早已证明: 气体的内能变化只与温度有关, 这里包括理想气体和极稀薄的气体, 当温度一定时, 内能变化为零。

另一方面用波义耳—查理斯定律可以证明稀薄气体做的温度计同样符合气体状态方程。

设稀薄气体的压强与容积的乘积为 θ (θ 是稀薄气体为工质所构成的温标) 即

$$pV = \theta \quad (2-5)$$

又设 $\theta = \theta(T)$ (T 是绝对温度)。若 E 为气体的内能, p 为压强, T 为绝对温度, 由热力学Maxwell方程:

$$\left(\frac{\partial E}{\partial V} \right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V - p \quad (2-6)$$

因稀薄气体同样符合焦耳—汤姆逊效应, 因此当温度一定时内能变化为零, 即式(2-6)左边等于零, 即

$$\left(\frac{\partial E}{\partial V} \right)_T = \left(\frac{\partial E}{\partial V} \right)_T = 0$$

因此

$$T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V = p \quad (2-7)$$

由式(2-5)对 T 取导数

$$\frac{d\theta}{dT} = V \left(\frac{dp}{dT} \right)_V, \quad \left(\frac{dp}{dT} \right)_V = \frac{1}{V} \frac{d\theta}{dT} \quad (2-8)$$

将式(2-8)代入式(2-7)得:

$$\frac{T d\theta}{dT} = pV = \theta, \quad \frac{d\theta}{\theta} = \frac{dT}{T} \quad (2-9)$$

将上式积分, 其数值为 $\lg \theta = \lg T + C$

$$\text{即 } \lg \frac{\theta}{T} = C, \quad \frac{\theta}{T} = A$$

所以

$$\theta = AT$$

由式(2-5)

$$pV = AT \quad (2-10)$$

式(2-10)证明稀薄气体仍然遵循波义耳—查理斯定律, 因此可以代替理想气体。

上面只证明了用稀薄气体代替理想气体, 但两种工质的热力学温标是否一致还要加以证明。

设稀薄气体当压强一定时, 按查理斯定律容积 V 与温度 θ 的关系为:

$$\begin{aligned} V &= \alpha \theta \\ dV &= \alpha d\theta \end{aligned} \quad (2-11)$$

又知1mol的理想气体的状态方程为:

$$PV = RT$$

当 $P = \text{一定时}$, 则 $PdV = RdT$

$$(2-12)$$

将式(2-11)代入式(2-12)并整理之得:

$$dT = \frac{p\alpha}{R} d\theta \quad (2-13)$$

将式(2-13)积分得:

$$T = \frac{p\alpha}{R} \theta + C \quad (2-14)$$

式中 C 为积分常数。式(2-14)将稀薄气体的温度 θ 与理想气体的温度 T 联系起来并确定了它们之间的关系。

设压强 $P = 101325 \text{ Pa}$ (一个标准大气压), $\alpha = 273.15^{-1} \text{ K}^{-1}$, 气体常数 R 中, 若将压强 $P = 101325 \text{ Pa}$ 代入则:

$$R = \frac{101325 \text{ Pa} \times 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}}{273.15 \text{ K}} = 8.30928 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

式(2-14)中 θ 的系数是1 mol气体在一个标准大气压的情况下:

$$\text{故 } \frac{P \times \alpha}{R} = \frac{101325 \text{ Pa} \times 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1} \times 273.15^{-1} \text{ K}^{-1}}{8.30928 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}} = 1$$

因此式(2-14)可写为:

$$T = \theta + C \quad (2-15)$$

上式说明: 稀薄气体的温标 θ 与理想气体的热力学温标 T 是一致的, 它们之间只差一个常数 C 。当 $\theta = 0$ 时, $T = T_0 = C$, 即 $C = T_0$ 。

T_0 的确定: 焦耳—汤姆逊最早用细孔栓法求得: $\frac{100\text{K} + T_0}{T_0} = 1.365$ $T_0 = 273.7 \text{ K}$

最新的实验结果表明:

$$\frac{100\text{K} + T_0}{T_0} = 1.3660992 \approx 1.3661$$

$\therefore$

$$T_0 = 273.15 \text{ K}$$

三、实现热力学温标的方法

气体温度计、超声波温度计、热噪声温度计及光学高温计等都可用来实现热力学温标。关于这些温度计的原理、结构、优缺点等将于本书第七章内介绍。

§ 2-2 国际实用温标 IPTS-68

在第十三次国际度量衡会议上, 根据热力学温标采用了1968年国际实用温标 (International Practical Temperature Scale-1968), 简称 IPTS-68。我国于1973年元旦起正式采用, 目前我国现行标准是 IPTS-68 (1975年修订版)。

由热力学温度过渡到实用温度主要有两个原因。第一, 用一次温度计 (如气体、超声波、热噪声等温度计) 虽然可以高精度地测出热力学温度, 但操作非常复杂很不实用; 第二, 由于一次温度计准确度虽高, 可精密度和复现性很差。而二次温度计 (以玻璃水银温度