

HEAT METER

热量表

HEAT METER

主编 纪建英 张务铎 朱 江
主审 王树铎 谷祖康 邱 萍

 中国质检出版社

热 量 表

主编 纪建英 张务铎 朱 江

主审 王树铎 谷祖康 邱 萍

中国质检出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

热量表/纪建英, 张务铎, 朱江主编. —北京: 中国质检出版社, 2013. 4
ISBN 978-7-5026-3798-9

I. ①热… II. ①纪…②张…③朱… III. ①热工仪表 IV. ①TH810.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 050492 号

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100013)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010)64275323 发行中心: (010)51780235

读者服务部: (010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 17.75 字数 416 千字

2013 年 4 月第一版 2013 年 4 月第一次印刷

*

定价 68.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

编 委 会

主编 纪建英 张务铎 朱 江 (山东省计量科学研究院)

主审 王树铎 (中国科学院物理研究所)

谷祖康 (山东省计量科学研究院)

邱 萍 (中国计量科学研究院)

编委 林振强 曹瑞基 (山东省计量科学研究院)

王树铎 (中国科学院物理研究所)

赵玉敏·张永良 (山东省计量科学研究院)

金志军 邱 萍 (中国计量科学研究院)

杜广生 (山东大学能源与动力工程学院)

张立谦 杨有涛 (北京市计量检测科学研究院)

许文达 (国家蒸汽流量计量烟台检定站)

陈 杰 (淄博市计量测试所)

宋述古 (青岛市计量测试检定所)

吕亚林 (济南市计量检定所)

序 言

随着供热改革的深入，热量表得到了广泛的应用，它在供热计量方面发挥了不可替代的作用。因此，了解热量表的设计、制造、安装、使用、检测相关的细节就成为供热计量行业的需要。十余年来，热量表生产企业、供热企业、从事热计量的检测人员、研究人员都期待有一本完整的关于热量表的手册问世。因此，当山东省计量科学研究院的同行们给我看这本书的目录的时候，我倍感欣慰，因为全书覆盖了热量表的方方面面，内容完整，相信该书一定能够对与供热计量相关的各方人士有所助益。编写组的同事们付出了辛勤、付出了时间，坚持不懈地工作，完成了这本大家期待已久的书，体现了计量工作者的敬业精神，我向他们表示最衷心的祝贺！

由于这是第一本关于热量表的完整的书籍，其难度可想而知。特别是目前热量表伴随着技术发展、认识提高，行业技术提升速度仍然很快，如近年来超声热量表以迅猛之势替代机械表，长期稳定性的考核方式也在讨论中，这些都引起了新一轮的技术研讨。因此希望编者能够在本书出版后，通过不断完善和修订来提升本书的水平，并跟上技术发展。

期待我国的热计量行业健康发展，也期待本书为热计量的发展做出贡献！

王 池

2013年3月17日

编者的话

我国热计量改革之火已燃烧了十几年，尽管期间经历过波折，目前却是越燃越旺，这充分证明它是符合我国国情的，是不可阻挡的时代潮流。全国当前的供热计量改革状态为：国家政策引导、地方政府推动、供热企业接受、用户受益的良好局面，有效地促进了节能减排工作的深入发展。

山东省计量科学研究院是国内最早进行热计量标准装置和热计量器具研制的技术机构，早在20世纪90年代中期即派技术人员到欧洲学习，2002年研制出国内第一台热量表标准装置，获得山东省科技进步二等奖，由此带动了山东省热量表行业的发展与繁荣。截至2012年年底，山东省热量表生产企业达到70余家，接近国内总数的三分之一。

但是，在宏大的事业和行业面前，国内还没有一本关于热量表原理、技术以及相关法规等内容全面的专业书籍，对行业向更高层次发展带来了不便。山东省计量科学研究院的技术人员集数年工作之积累，潜心研究，编著了这本《热量表》，以期对供热计量改革有所推动，对热量表产品及装置的生产与管理有所引领。本书在编著过程中得到了中国计量科学研究院王池老师、中国科学院物理研究所王树铎老师等国内很多专家、领导以及中国质检出版社的帮助与支持，在此表示深深感谢！领导和专家们对这本书的重视与期盼以及对供热计量改革这一国家工程的事业心与责任感令我们深深感动，也增强了我们编著好这本书的信心与责任。

由于编写时间仓促，编写水平所限，书中错误和不足之处在所难免，敬请同行们海涵并提出宝贵意见。

编者

2013年3月1日于济南

目 录

第一章 热量计算的理论基础	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 温度与温标	(3)
第三节 焓与热量	(15)
第四节 管内流动基本知识	(25)
第二章 热量表概述	(31)
第一节 热量表的组成及工作原理	(31)
第二节 热量表的分类	(36)
第三节 热量表系列划分	(39)
第四节 热量表的标识	(41)
第五节 热量表测量结果不确定度评定	(43)
第三章 流量传感器	(54)
第一节 机械式	(54)
第二节 超声波式	(65)
第三节 电磁式	(78)
第四节 其他型式	(84)
第四章 温度传感器	(90)
第一节 基本原理	(90)
第二节 温度传感器准确度的测试与计算	(94)
第三节 使用中的问题	(96)
第五章 计算器	(98)
第一节 概述	(98)
第二节 电子模块及检测流程	(99)
第三节 计算器准确度的测试与计算	(104)
第六章 热量表接口及通讯协议	(106)
第一节 热量表光电接口	(106)
第二节 热量表接口通讯协议	(109)

第七章 热量表抄表系统	(114)
第一节 概述	(114)
第二节 远程集中抄表系统总体结构	(117)
第三节 集中抄表通讯技术	(121)
第四节 远程抄表通讯技术	(132)
第五节 远程集中抄表系统应用案例	(136)
第八章 热量表的检定	(140)
第一节 热量表的检定	(140)
第二节 热量表检定中的相关问题	(147)
第三节 国产与进口热量表的比较	(149)
第四节 热量表计量标准技术报告实例	(151)
第九章 热量表的型式评价	(158)
第一节 热量表的型式评价	(158)
第二节 热量表耐久性试验及其问题	(171)
第三节 热量表委托检验及监督抽查	(175)
第四节 热量表制造计量器具许可考核必备条件	(179)
第十章 热量表的生产工艺	(183)
第一节 电路板的生产工艺	(183)
第二节 基座的生产工艺	(185)
第三节 组装	(186)
第四节 检测校准	(188)
第五节 张贴铭牌	(189)
第十一章 热量表的安装及常见故障	(191)
第一节 热量表的选型	(191)
第二节 热量表的安装	(192)
第三节 热量表常见故障	(199)
第四节 应用举例及数据分析	(200)
第十二章 热量表标准装置	(207)
第一节 热量表标准装置技术要求	(207)
第二节 热量表标准装置	(214)
第三节 热量表标准装置的检定或校准	(223)
第四节 热量表标准装置不确定度评定	(232)
第五节 太阳能在大口径热量表标准装置中的应用	(242)

第十三章 其他热计量方法	(248)
第一节 流量温度法	(248)
第二节 通断时间面积法	(250)
第三节 热分配表	(254)
附录 A 水的密度和焓值表	(258)
附录 B 热系数表	(262)
参考文献	(270)

第一章 热量计算的理论基础

第一节 概 述

一、历史回顾

早在远古时代，人类在与自然界争取生存环境的斗争中就学会了使用火，这是人类开始利用热能的第一步。18世纪以前，人们对热的本质和温度的概念只是一些不成熟的想法，甚至连“温度”与“热量”都难区分开来。历史上，测温技术和量热技术的逐步建立使热学走上了定量的实验科学轨道。测温技术是热学实验的基础，在16世纪和17世纪之交，伽利略（Galileo Galilei, 1564—1642）根据空气受热膨胀的道理制造了第一支温度计，定性地表示了温度。斐迪南 II（Grossherzog Ferdinand II）于1654年用酒精装在玻璃管里制造了第一支封闭式温度计。只有在1714年华氏（D. Fahrenheit, 1686—1736）和1742年摄氏（A. Celsius, 1704—1744）各自选定了温标以后，温度测量才有了被公认的标准，并发展了量热技术。量热技术在初期只有混合法一种，热量是根据水的温度改变而测定的。为了解释当时的实验结果，热被认为是一种没有质量的流质（“热质”），能从温度高的物体流向温度低的物体，但在传递过程中热质总量不变，物体的温度是物体储存“热质”多少的表示。热量的单位“卡”，其实就是“热质”（caloric）音译“卡路里”的简称。

与热质说相对立的，热是一种运动的表现形式。培根（Francis Bacon, 1561—1626）强调理论必须根据实验事实，他根据摩擦发热、双方温度都升高的现象，认为热是物质微小粒子的运动。伦福德（Count Rumford, 1753—1814）的实验直接反驳了热质说，他在1798年发表了一篇论文，说明制造枪炮所切下的碎屑温度升得很高。由此他推断，热是一种运动，而不是热质。1799年戴维（Humphry Davy, 1778—1829）的实验支持了热是一种运动的说法。他把两块冰相互摩擦，使它们完全熔化，并且称量熔化前后冰和水的重量，发现冰的熔解热不是由什么物质供给的，而是摩擦运动结果。但是他们两个人的工作还不足以使科学界放弃热质说。直到焦耳（James Prescott Joule, 1818—1889）在1850年前用多种实验方法反复测定了“热功当量”，确定了热是能量的一种形式。从1840年起他用电的热效应，1842年以后又用机械功转化成热的方法，来测量热功当量。他先后用了二十多年的时间，多种多样的方法，所得到的结果都是一致的。到1850年焦耳的实验结果已经使科学界公认能量守恒定律是自然界的普遍规律。能量守恒定律（即热力学第一定律）的确定，为不能制造出永动机作了最后的判决。之后，电量热法被大量使用，量热技术的精度大大提高，过去采用的“卡”也就逐渐被电能的单位“焦耳”所代替。继热力学第一定律的建立，克劳修斯在1850年、开尔文在1851年各自表述了热力学第二

定律。开尔文根据卡诺定理制定“热力学温标”，提出了“能量贬值原理”。克劳修斯也根据卡诺定理引出了当时被称为“转换当量”、后来（1865年）被改称为“熵”的热力学函数。热力学第一定律和第二定律的建立，奠定了热力学理论的基础。找到了反映物质的各种热力学性质的函数，发展了热力学函数之间的数学关系式。

热力学第一定律和第二定律建立后，人们也还没有给出有关温度的严格定义。直到1868年，麦克斯韦（James Clerk Maxwell, 1831—1879）定义了一个物体的温度是根据它与其他物体达到热平衡而表现出的热性能。他补充说，当两个物体互相热接触时，一个物体失去热量，另一个物体得到热量，失去热量的物体的温度高于得到热量的物体的温度。他进而谈及：两个物体的温度分别与第三个物体的温度相等，则这两个物体的温度彼此也必然相等。这个规律后来被称为热力学第零定律。热力学第一定律、第二定律、第零定律的建立，为温度、热量的测量奠定了科学的基础。

二、目前现状

1. 热计量改革在国家城市能源中的重要性

我国北方地区冬季供热采暖每年消耗煤炭1.5亿吨标煤，大大高于同等气候条件下发达国家水平，浪费严重。因此，我国自开展城镇供热体制改革工作以来，就将如何稳步推行供热计量作为城镇供热体制改革的重要内容之一。各地政府也将供热计量改革作为推进本地区节能减排的重点工作。

实践证明，实施供热计量改革是完成建筑节能任务最直接、最有效的措施，必须立即把城镇供热体制改革工作重点转移到供热计量改革上来，开展供热计量改革示范城市工作，通过试点取得经验，用先进典型引路，指导各地全面推进供热计量改革，把节能减排的任务落实到实处。

随着人民生活水平的日益提高，用户对用热个性化和提高舒适性的要求越来越迫切。在传统供热系统中，用户处于被动状态，室内温度由供热单位进行控制，不能满足用户的不同需要。实施供热计量就可以满足用户根据自身要求，利用室内温度控制装置（如暖气温控阀）在一定温度范围内自主调节所需室温，达到降低耗热量的目的。

2. 各类法律法规、技术规范的逐步完善为热计量改革提供了有力的法律依据和技术保障

供热计量的目的应是实现节能减排，推进城镇供热体制改革，在保证供热质量、改革收费制度的同时，实现节能降耗，并最终体现在供热单位降低生产成本和用户节省热费支出上。

《中华人民共和国节约能源法》第三十八条规定：国家采取措施，对实行集中供热的建筑分步骤实行供热分户计量、按照用热量收费的制度。新建建筑或者对既有建筑进行节能改造，应当按照规定安装用热计量装置、室内温度调控装置和供热系统调控装置。

《山东省计量条例》等从加强组织领导、强化监督管理、落实技术规定等方面提出了具体要求。

《供热计量技术规程》将分户热计量从计量结算的角度，分为两种方法：一种是采用楼栋热量表进行楼栋计量再按户分摊；另一种是采用用户用热量表按户计量直接结算。各城市应根据实际情况，因地制宜地选择供热计量方式。

3. 存在的主要问题

(1) 供热计量的目的是节能

热源处即供热单位要能够体现出节能收益。因为实施供热计量，供热单位节能收益不明显，同时又要根据用户计量节能进行退费，造成供热单位对供热计量产生抵触。造成这种状况的根本原因是系统节能性差。因此，系统节能是行为节能和计量供热的基础，只有加强系统节能的改造力度，供热单位才能降低能耗，提高经济效益，热用户才能从热费中得到节能收益。

(2) 供热计量需对既有的供热系统进行改造

实行分户计量后，对于热源、管网、换热站及户内供热系统等都提出新的要求。如果分户计量大面积铺开，需要对供热系统进行改造。一旦实现供热分户计量，用户随时调节会不断打破热网平衡，这对供暖企业的技术、管理升级都会带来挑战。供热运行方式需由过去的定流量调节变为根据用户需求进行调节。为了满足用户的需求，供热单位还需进行设备变频改造，并增加供热系统的自动控制与调节功能。

4. 热量表发展的机遇与挑战

目前热量表生产厂家的技术情况是，具有自主开发能力的企业约占全部生产厂家的10%，大多数企业采取技术协作方式。

全国每年热量表产值超过10亿元，大量资金进入热量表行业，目前现状是大口径热量表进口表占较大份额，国产热量表质量需进一步改进，提高产品质量。共同维护市场，推进供热计量向前发展，是科研单位与生产企业的共同责任。

第二节 温度与温标

一、平衡态与状态参量

1. 平衡态

热力学研究的是由大量分子、原子组成的物体的运动形式，其最重要的状态参量是温度，而温度的概念和测量，都是以系统的平衡态为基础，所以首先研究平衡态。

假设有一封闭容器，用隔板分成A和B两部分，A部储有气体，B部为真空(图1-1)，当把隔板抽去后，A部的气体就会向B部运动。在这个过程中，气体内各种的状况是不均匀的，而且随时间改变，一直到最后达到各处均匀一致的状态为止。在这以后，如果没有外界影响，则容器中的气体将始终保持这一状态，不再发生宏观变化。

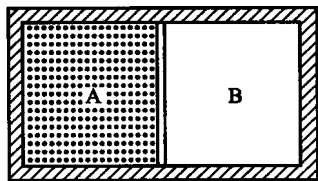


图1-1 气体平衡态示意图

又如，当两个冷热程度不同的物体互相接触时，热的物体变冷，冷的物体变热，直到最后两物体达到各处冷热程度均匀一致的状态为止，这时如果没有外界影响，则两物体将始终保持这一状态，不再发生宏观变化。

再如，将水装在开口的容器中，则水将不断蒸发。但如果把水装进容器封闭(图1-2)，

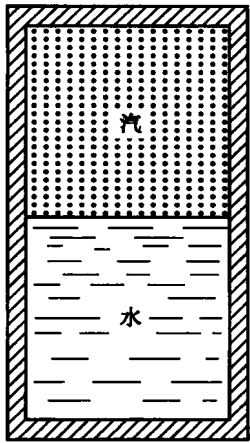


图 1-2 水汽平衡态示意图

则经过一段时间，蒸发现象将停止，即水和蒸汽达到饱和状态。这时如果没有外界影响，也不再发生宏观变化。

类似的现象还可举出许多，从这类现象中可以总结出一条结论，即处在没有外界影响条件下的热力学系统，经过一定时间后，将达到一个确定的状态，而不再有任何宏观变化，这种在不受外界影响的条件下，宏观性质不随时间变化的状态叫做平衡态。这里所说的没有外界影响，是指外界对系统既不作功又不传热。如果系统通过做功或传热的方式与外界交换能量，则它就不可能达到并保持在平衡态。

当然，在实际中并不存在完全不受外界影响，而且宏观性质绝对保持不变的系统，所以平衡态只是一个理想的概念，它是在一定条件下对实际情况的概括和抽象。以后将看到，在许多实际问题中，可以把实际状态近似地当作平衡态来处理。

应当指出，平衡态是指系统的宏观性质不随时间变化，从微观方面看，在平衡态下，组成系统的分子仍在不停地运动着，只不过分子运动的平均效果不随时间改变，而这种平均效果的不变在宏观上就表现为系统达到了平衡态。因此，热力学中的平衡是动的平衡，通常特别把这种平衡叫做热动平衡。

2. 状态参量

经验告诉我们，系统处在平衡态时具有一些可以用确定的物理量来表征的属性。这样，我们就可以选择其中几个量作为描述系统状态的变数，称之为状态参量。对于一个热力学系统，如果它处于平衡态，它的首要状态参量为温度。除此之外，描述一个系统，尚需下面几种状态参量。

假设我们所研究的系统是储存在气缸中的一定质量的化学纯的气体。如果使气体的压强保持恒定，并对气体加热，则可发现气体的体积将膨胀。反之，若加热时使气体体积保持不变，则气体的压强就会增大。由此可见，气体的体积和压强是可以独立改变的，所以需要这两个参量才能完全描述系统的状态。这两个参量属于两种不同的类型，体积是几何参量，压强是力学参量。同样，对于液体和各向同性固体，也可以用体积和压强来描述它们的状态。

假设我们所研究的是混合气体（例如氧和氮的混合物），则要对系统的状态作完全的描述，除了上述的体积和压强外，还需要用到反映系统化学成分的参量。这是因为在一定的体积和压强下，各种化学组分的含量不同，系统仍处在不同的状态。每种组分的含量可用它的质量或物质的量来表示。这些量表征系统的化学成分，是化学参量。

当有电磁现象出现时，除了上述参量外，还必须加上一些电磁参量，才能对系统的状态描述完全。例如，在研究电场中电介质的性质时，还需用电场强度和电极化强度来描述它的电状态；对于磁场中的磁介质，可用磁感应强度和磁化强度来描述它的磁状态。

总之，在一般情况下，需用温度参量几何参量、力学参量、化学参量和电磁参量等参量来描述热力学系统的平衡态。究竟用哪几个参量才能对系统的状态描述完全，是由系统本身的性质决定的。

二、温度

人们在日常生活和工作中，经常会遇到许许多多冷与热的现象。凭借我们的感觉器官，可以分辨出物体的冷和热。比如，众所周知的天气谚语：热在三伏、冷在三九；靠近火炉，会使你感到“烤得很”，进了冷库则会感到“冻得很”；汽车运行了一段时间，发动机要发热，停驶以后发动机又逐渐“冷”下来。但是，光凭人们的感觉是不够准确的，甚至得出错误结论。例如，在恒温室的电测工作台上，放置着一块铝板和一块绝缘橡皮，当我们用手分别触及它们时，由于铝板比绝缘橡皮的导热性能好，常常会使我们错误地感觉到铝板比绝缘橡皮“冷”。

怎样才能科学地、定量地表示出物体的冷热程度呢？这就要借助于“温度”这个物理量。按照人们的习惯，在确定温度数值的时候，使较热状态具有较高的温度数值，较冷状态具有较低的温度数值。所以，温度是描述物体冷热程度的物理量。

温度概念的建立以及温度的测量，都是以热平衡现象为基础的。两个冷热程度不同的物体，当它们互相接触以后就会产生热量交换，使原有的平衡状态受到破坏，较热的物体逐渐变冷些，较冷的物体逐渐变热些，经过一段时间以后，就不再发生热量交换，两个物体处于同样的冷热状态。即称为处于热平衡状态。

如果两个物体分别和第三个物体处于相同的热平衡状态，则将这两个物体互相接触时也必然处于同样的热平衡状态。这个实验事实就称为热力学第零定律。由热力学第零定律可知，处于同一个热平衡状态的物体必定拥有某个共同的物理性质，而温度就是表征这种物理特性的一个量。所以，处于同一热平衡状态的物体具有相同的温度。这是温度最基本的性质。在比较每个物体温度的时候，不必让它们互相接触，只要将一个被选做“标准”的物体分别与每个物体接触就行了。这个被选做标准的物体就是测量物体温度的温度计，这就是使用温度计测量温度的原理。

上述的温度定义仅仅是定性的，还是不完全的，完全的定义还应当包括温度的数值表示方法。温度这个物理量还有一个特性，那就是温度本身具有的标志性。两个受热状态不同的物体，它们只能被标志成温度的高低不同，而不能说某物体的温度是另一物体温度的几倍，换句话说，两个物体温度的数值是不能相加的，否则是毫无意义的。

温度是一个重要的物理量，国际单位制（简称 SI）规定了 7 个基本单位，温度就是其中之一。

热力学温度的单位是开尔文（K）。1K 等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

目前，国际上通用的温标是国际温标（符号 ITS），它能在各国得到复现，从而将温度量值逐级传递，直到各种测温仪表。

三、温标

为了定量表示物体的冷热程度，必须用数值将温度表示出来。用数值表示温度的方法称为温度标尺，简称温标。

1. 温标的必备条件

建立任何一种温标都必须具备以下 3 个条件。

(1) 测温仪器

确定测温仪器的实质是确定测温质和测温量。测温仪器利用某种物质的物理性质(如热膨胀、热电阻等)随温度的改变而变化的特性进行温度测量。这种被用来测定温度的物质称为测温质,用来测定温度的物理量称为测温量。例如,利用水银体积随温度的变化来测定温度的水银温度计和利用铂丝电阻值随温度变化来测定温度的热电阻等,其中水银和铂丝就是测温质,而热膨胀和热电阻则是测温量。

(2) 固定温度点

任何物质都是由分子组成的,在不同条件下通常都可以呈现为固体、液体、气体三种不同状态,称为物质的三“态”或三“相”。在一定条件下物质的三相可以互相转化,或是维持在两相或三相共存的平衡状态。

利用一些物质的“相”平衡温度(如水的汽相和液相的平衡温度——水沸点,水的液相和固相的平衡温度——冰点等)作为温标基本点,并对每个点的温度给以确定的数值。这些点就称为固定温度点(被选用的固定温度点的数值应当恒定,固定点的实现装置也应当便于制造和复现)。

(3) 温标方程

温标方程是用来确定各固定点之间任意点温度数值的数学关系式。以线性关系为例,设 y 为测温量, t 为温度,则

$$y = Kt + C \quad (1-1)$$

式中 K ——待定比例系数;

C ——决定于初始值的常数。

利用两个已知温度数值 t_1 、 t_2 的固定温度点,可以求出常数 K 和 C :

$$y_1 = Kt_1 + C \quad (1-2)$$

$$y_2 = Kt_2 + C \quad (1-3)$$

两式相减得:

$$K = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}$$

将 K 值代入式 (1-2) 得

$$C = y_1 - \left(\frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \right) t_1$$

将 K 、 C 值代入式 (1-1), 得到线性温标方程如下:

$$t = \left(\frac{t_2 - t_1}{y_2 - y_1} \right) y + \left[t_1 - \left(\frac{t_2 - t_1}{y_2 - y_1} \right) y_1 \right] \quad (1-4)$$

2. 经验温标

由特定测温质、特定测温量所确定的温标称为经验温标。

17 世纪初,伽利略制做成的第一个测温器只能定性地测定温度。直到 1660 年福洛伦丁提出了第一个温标。他规定用玻璃酒精温度计测定温度,以当地冬季最冷之日的温度定为 11 度,夏季最热之日的温度定为 40 度。其后又有很多人提出了不同形式的温标,其中影响较大的是摄氏温标和华氏温标。

1714 年德国人华伦海特 (Fahrenheit) 制造了玻璃水银温度计。他规定水的沸腾温度为 212 度,水和冰的混合物为 0 度,用来标定玻璃水银温度计。温度计两固定温度点之间的距离等分为 212 份,每一等分称为华氏 1 度,记做 1°F 。这种标定温度的方法称为华氏

温标。冰的融化温度相当于 32°F 。

1740 年瑞典人摄尔塞斯 (Celsius) 把冰的融化温度规定为 0 度, 把水的沸腾温度定为 100 度。用这两个固定温度点来标定玻璃水银温度计, 将两固定温度点之间的距离等分为 100 份, 每一等分称做摄氏 1 度, 记做 1°C 。这种标定温度的方法称为摄氏温标。

华氏度 t_{F} 与摄氏度 t_{C} 的换算关系如下:

$$\text{因为} \quad \frac{t_{\text{C}}}{t_{\text{F}} - 32} = \frac{100}{212 - 32} \quad (1-5)$$

$$\text{所以有} \quad t_{\text{C}} = \frac{5}{9}(t_{\text{F}} - 32) \quad (1-6)$$

$$t_{\text{F}} = \frac{9}{5}t_{\text{C}} + 32 \quad (1-7)$$

3. 热力学温标

如前所述, 经验温标具有局限性和任意性两个缺点, 因而不是科学的。只有超脱于任何特定特质, 而由普遍适用的自然规律所决定的温标, 才能将温度计量建立在科学的基础上。

由于温度这个物理量在热力学中占有特殊地位, 所以对温度进行标志所选定的普遍适用的自然规律, 应在热力学范围以内。这项工作是由物理学家开尔文 (Kelvin) 在 1848 年完成的。他所提出的以热力学第二定律为基础的热力学温度于 1967 年第十三届国际计量大会上被正式肯定, 并将热力学温度的单位开尔文 (符号 K) 列为国际单位制 (SI) 7 个基本单位之一。

为了弄清热力学温标的含义, 必须对热力学的基本内容有所了解。热力学是以经验为基础, 以热能和功之间的转换和热运动为研究对象的科学。为了叙述方便, 以下简要介绍热力学第一定律、第二定律和卡诺定理等基本概念。

(1) 热力学第一定律是由迈尔 (Mayer) 和焦耳 (Joule) 在 1842 年和 1843 年先后独立提出的。其实质是能量守恒和能量转化定律在热现象上的应用。它可以简略概括为: 热是能的一种, 当它与另外形式的能或功之间转换时, 总量不变。热力学第一定律指明, 不消耗任何能量而作功或用较少能量而作较多功的机器是不可能实现的。人们把这类机器称为第一类永动机。所以热力学第一定律又可以简叙为第一类永动机是不可能实现的。

(2) 热力学第一定律指明了热过程的能量关系, 但没有说明热过程进行的方向。而热力学第二定律指明了热过程进行的方向。热力学第二定律是由克劳修斯和开尔文在 1850 年 1856 年先后提出的。定律本身有不同的说法, 但在实质上都是等效的。

克劳修斯对热力学第二定律的解释是这样的: 不可能制造出一种循环动作的机器, 把热量自低温物体传送到高温物体, 而且不消耗其他形式的能量。

开尔文提出: 不可能制造出一种循环动作的机器, 它只使一个热源冷却而动作, 而使其他物体不发生任何变化。

上述这一类机器被称为第二类永动机。所以热力学第二定律也可以简叙为第二类永动机也是不可能实现的。

(3) 卡诺定理的提出, 远在热力学第一定律和第二定律明确之前, 并且成为热力学第二定律的出发点。但是, 卡诺定理的严格证明, 必须依赖热力学第一定律和第二定律的

明确叙述。

卡诺定理可简述如下：所有工作于两个恒定温度热源之间的热机，以可逆热机的效率最高，并且所有可逆热机效率相等。

遵守卡诺定理的可逆热机热效率 η 为

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1-8)$$

式中 Q_1 ——卡诺热机从高温热源吸收的热量；

Q_2 ——卡诺热机向低温热源放出的热量；

W ——卡诺热机所作的功（由热力学第一定律可得知 W, Q_1, Q_2 ）；

T_1 ——高温热源的温度；

T_2 ——低温热源的温度。

简化后可得

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\text{则} \quad T_1 = \frac{Q_1}{Q_2} T_2 \quad (1-9)$$

这就是说，工作于两热源之间的卡诺热机，其与两热源之间交换热量之比等于两热源温度之比。

1848年开尔文建议，利用卡诺定理及其推论，可以建立一个与测温质无关的温标，即热力学温标，热力学温标所确定的温度数值称为热力学温度亦称绝对温度，用符号 K 表示。它选用卡诺热机作为测温质（即温度计），而选择热量比作为测量量（即温度计参数）。

如拟测定或标志某待测热源的热力学温度数值 T ，需先确定具有水三相点热力学温度 T_3 的热源为标准热源，并指定其标志的数值为 $273.16K$ （即 $T_3 = 273.16K$ ）。利用卡诺机进行测温，令其工作在 T 与 T_3 两热源之间。则卡诺机与两热源之间的交换热量之比，与两者热力学温度数值之比应相等，即

$$\frac{T}{T_3} = \frac{Q}{Q_3}$$

$$T = \frac{Q}{Q_3} T_3 = \frac{Q}{Q_3} \times 273.16 \quad (1-10)$$

此时，用卡诺机来测定比值 Q/Q_3 ，就可由公式求出待测热源的热力学温度数值。式（1-10）就是热力学温标的温标方程。

由热力学温标所确定的待测热源的温度称为热力学温度。它为温度计量奠定了牢固的科学基础。热力学温度的内容既包括了热力学温度的定义，也包括了热力学温度单位的定义。前者是后者的基础，后者是前者的补充。热力学温标是以热力学第二定律为理论基础，只有在严格的热力学温度和热力学温度单位的定义确定之后，才能依照温度本身的比较意义来进行温度测量。这里所说的测量只是一种手段，其最终目的是要对温度进行标志。

热力学温度单位开尔文（符号 K ）是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ ，它是在热力学温度定义基础之上，首先确定了水三相点热力学温度的标志数值，再取其 $1/273.16$ 定为