

教学拓展

疑难问题解析

## 温度概念中的物理学思想方法\*

吴英 何应虎 冯景华

(遵义师范学院物理与电子科学学院 贵州 遵义 563006)

(收稿日期:2020-05-22)

**摘要:**温度概念在形成过程中包含了丰富的物理学思想方法,概念的建立见抽象概括,温度的测量见分析综合,温标的发展见质疑释疑,统计解释见唯象机理,正负温度见比较推理.

**关键词:**温度概念 物理学思想方法 物理量

温度是物理学中一个非常重要的物理量.温度概念的形成经过了漫长的历史过程,在温度概念形成的过程中体现了丰富的物理学思想方法.

## 1 概念的建立见抽象概括

抽象是在思想上抽出各种对象和现象的共同的、本质的特征,舍弃其个别的、非本质的特征的过程.概括是人脑把抽象出来的事物间共同的本质特征综合起来,并推广到同类事物中去的过程.概括是一种特殊形式的综合,是概念形成的重要基础<sup>[1]</sup>.温度概念的形成过程就是一个抽象、概括的过程.

最早人们对温度的认识是从直感出发,凭主观感觉来测定冷热程度.从“冷热程度”到“冷热程度的科学化”,再到“温度”,经历了漫长的抽象概括过程,是人类长期科学活动的结晶.19世纪在热力学建立的过程中,也是凭经验将温度的概念直接引入到理论中,在研究热力学系统的状态函数与热力学基本定律的对应关系时才发现,在确立热力学第一、第二、第三定律的过程中,已经直接或间接地使用了热平衡定律,因此1927年美国的物理学家否勒提议将热平衡定律列为热力学第零定律<sup>[2]</sup>.根据热力学第零定律,以任意3个系统A,B,C为例,若A,B分别与C热平衡,则A和B也处于热平衡.即一切互为热平衡的系统都具有某种共同的宏观性质.这种“共同的宏观性质”抽象成什么呢?既然是共同的性

质,说明互为热平衡的系统就具有这种共同的性质,同时要判断系统是否处于热平衡,只需这一共同性质相同,其他的宏观性质是不能直接进行比较的.这一宏观性质就由一个态函数来描述.假设3个系统可以用状态参量 $x, y$ 确定,当系统A,C处于热平衡,描述它们的状态参量就要被一定的函数关系所制约,写成函数形式既有

$$f_{AC}(x_A, y_A; x_C, y_C) = 0 \quad (1)$$

同理系统B和C处于热平衡,有

$$f_{BC}(x_B, y_B; x_C, y_C) = 0 \quad (2)$$

由两式解出

$$y_C = g_{AC}(x_A, y_A, x_C) \quad (3)$$

$$y_C = g_{BC}(x_B, y_B, x_C) \quad (4)$$

则

$$g_{AC}(x_A, y_A, x_C) = g_{BC}(x_B, y_B, x_C) \quad (5)$$

要想式(1)和式(5)同时成立,式(5)中可以消去 $x_C$ ,即

$$\varphi_A(x_A, y_A) = \varphi_B(x_B, y_B) \quad (6)$$

因为A,B,C互为热平衡,可得

$$\varphi_A(x_A, y_A) = \varphi_B(x_B, y_B) = \varphi_C(x_C, y_C) \quad (7)$$

由此互为热平衡的3个系统都具有一个数值相等的态函数.这个态函数我们用符号 $T$ 来表示,则3个系统分别有

$$T_A = \varphi_A(x_A, y_A), T_B = \varphi_B(x_B, y_B), T_C = \varphi_C(x_C, y_C) \quad (8)$$

\* 贵州省重点学科基金资助项目,项目编号:黔学位办[2013]18号;省级理论物理人才创新团队,项目编号:黔教合人才团队字[2012]08号.  
作者简介:吴英(1972- ),女,硕士,副教授,主要研究方向为物理教育和物理学史.

这个态函数就是温度<sup>[3]</sup>. 描述系统的状态参量  $x, y$  即为压强  $p$  和体积  $V$ . 对于气体而言, 既然确定状态的参量有压强和体积就够了, 温度这个态函数的引入, 并没有增加给定系统的状态参量的个数, 温度是状态参量压强和体积的函数. 对于真实气体而言, 这个函数(关系)就是范德瓦尔斯方程

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT$$

对于理想气体而言, 这个函数(关系)就是理想气体状态方程  $pV = \frac{m}{M_{\text{mol}}}RT$ . 热力学第一、第二定律分别引入了状态函数内能和熵, 而热力学第零定律引入的温度也是一个状态函数, 这就是为什么热力学第零定律与热力学第一定律和第二定律同等重要的原因.

当我们将描述处于热平衡的系统具有的态函数抽象为温度后, 人类继续对温度、压强、体积这些描述系统宏观性质的物理量进行概括. 在概括的过程中人类对温度这个概念更加清晰. 温度作为描述系统内在性质的物理量, 它的一个显著特点就是两个温度不能相加. 两个温度之间只有相等或不等的关系. 在热力学中这类与系统质量无关的物理量叫做强度量. 压强和温度一样, 都是强度量. 但体积就与系统的质量有关, 这类物理量叫广延量. 气体的内能和熵却是“广延量”而非“强度量”<sup>[4]</sup>.

## 2 温度的测量见分析综合

分析是头脑中把事物整体分解为各个部分、各个方面或各个特征. 综合是在头脑中把事物的各个部分、各个方面或各个特征、各个属性综合起来, 了解他们之间的联系和关系, 形成一个整体. 分析和综合是思维的基本过程<sup>[1]</sup>. 温度的测量体现了分析和综合两种物理学思想方法.

大家都认为温度是一个可测量. 但实际上我们测量的是其他的可测量, 然后依赖一个我们未明说的、有时甚至是测量人根本不知道的某个物理学定律, 从而得到温度的数值<sup>[5]</sup>. 这些其他的可测量可以是体积压力(膨胀式温度计)、声速(声学温度计)、折射率(折射率温度计)、介电常数(介电常数温度计)、电阻(电阻温度计)、热电势(热电偶温度计)、热辐射能量(全辐射温度计)等等. 这些温度计中, 温度计

与被测温物体相接触, 利用热平衡定律, 测量出与温度紧紧相关的物理量, 再通过“综合”得到温度的数值, 叫接触式温度计, 如膨胀式温度计. 温度计与被测温物体不相接触, 如辐射温度计, 利用传感器(探测器)将物体辐射的能量转换成随温度而变的光电信号, 并由配套仪器将此信号按温度单位显示, 这种温度计叫非接触式温度计. 无论接触式还是非接触式, 都要通过分析找到温度与被测物理量之间的关系, 最后通过综合得到被测物体的温度.

以膨胀式温度计为例, 膨胀式温度计是以物质的热膨胀性质与温度的物理关系为基础制作的温度计. 按照制造温度计的材质, 膨胀式温度计可以分为液体膨胀式温度计(如玻璃液体温度计)、气体膨胀式(如气体压力式温度计)和固体膨胀式(如双金属式温度计). 首先找到体积、压力或金属偏转角等物理量与温度的关系, 再通过测量这个物理量(体积、压力或金属偏转角等)从而“测量”出温度. 以玻璃液体温度计为例, 首先找到体积变化与温度变化的关系  $V_t = V_0(1 + \beta t)$ , 其中  $\beta$  表示温度变化  $1^\circ\text{C}$  引起的物质体积变化与它在  $t^\circ\text{C}$  时体积之比, 叫平均体积膨胀系数.  $V_t$  是  $t^\circ\text{C}$  时的体积,  $V_0$  是  $0^\circ\text{C}$  时的体积<sup>[6]</sup>. 通过测量体积的变化  $V_t - V_0$ , 得到温度的变化  $t - 0$ , 即“测量”得到温度.

温度计“测量”的温度与被测物理量的关系不一定都为线性关系, 如电阻温度计, 在高温下 ( $T > 0.5\theta_D$ ), 导体电阻率在很宽温度范围内用布洛赫-格林爱森经验公式描述, 电阻率与温度的关系成正比关系即为  $\rho(T) = \frac{AT}{4M\theta_D^2}$ , 其中  $A$  为金属特性常数,  $M$  为金属原子质量,  $\theta_D$  为金属的德拜温度; 但当  $T < 0.5\theta_D$  时,  $\rho(T) = 124.4 \frac{AT^5}{M\theta_D^6}$ , 电阻率与温度的 5 次方成正比<sup>[7]</sup>. 因此在温度的测量过程中, 我们利用“分析”的物理思维方法找到温度与其他物理量的关系, 测量出与温度紧密相关的物理量, 再通过“综合”的物理思维方法得到被测物体温度的数值.

## 3 温标的发展见质疑释疑

概念形成的过程是不断提出假设、验证假设的过程. 概念所包含的属性越多, 越复杂, 假设检验的次数就越多, 探索的过程就越长<sup>[1]</sup>. 为了定量地描述

温度,必须具有能衡量温度高低的方法,能用来表示温度数值的方法称为温标.温标的发展经历了经验温标、热力学温标、国际温标建立的过程,体现了质疑、提出假设、验证假设、释疑的过程.

早期温标起源于温度计的制造,1592年伽利略根据气体热膨胀现象制造的温度计只能定性地表示温度的高低,所以只能叫感温器.温度计怎样才能定量地描述温度的高低呢?1641年费狄南、1694年哈克、1665年波意尔、1667年玛格罗蒂、1694年雷纳尔蒂尼、1701年牛顿以及1730年列莫等人提出了建立定量描述温度高低的方法,后人称之为经验温标.其中1714年华伦海特用冰水混合后的温度为32度,水的沸腾温度为212度,中间均匀地分成180格,每一格为华氏温标1度( $^{\circ}\text{F}$ ),称之为华氏温标;1742年摄尔修斯以冰的熔点为零度,水的沸腾温度为100度,两点之间100等分,每一等分为1度( $^{\circ}\text{C}$ ),创立了摄氏百度温标.这些经验温标都有固定的温度点、表示固定点之间温度的温度计、用来确定固定点之间温度量值的数学关系等三方面的内容,所以,基本实现了定量描述温度高低的目的.

但经验温标温度测量依赖于选用的测温介质,并人为选用了某些自然现象作为固定点的温度值,所以局限性大,测温范围有限,缺乏合理的单位<sup>[6]</sup>.而且经验温标采用了任何一种物质的某一物理性质随着温度连续而单调变化的特性,不同的测温物质同一测温特性随温度变化的函数关系不同,而同一测温物质的不同测温特性随温度变化的函数关系也不同<sup>[2]</sup>.能不能建立一种与测温物质无关的温标呢?1848年英国物理学家开尔文根据热力学第二定律建立了与测温物质无关的热力学温标.根据卡诺定理,工作在 $T_1$ 和 $T_2$ 之间的所有可逆热机的效率为 $\eta=1-\frac{T_2}{T_1}=1-\frac{Q_2}{Q_1}$ ,效率与介质无关.开尔文提出用一个固定点来确定此温标.这个固定点为多少最为恰当呢?由于水的三相点(273.15 K)的稳定性能长期维持在0.1 mK范围内,因此1954年底第10届国际计量大会决定采用水的三相点作为热力学温标的基本固定点,此温标的表达式为 $T=273.16\frac{Q_2}{Q_1}$ ,这种温标的最大特点是与选用的测温介质的性质无关,克服了经验温标随测温介质而变的

缺陷,故称之为科学的温标或热力学温标.由此得到的温度叫热力学温度.热力学温标奠定了测量热力学温度的理论基础.但是理想的卡诺循环是无法实现的,热力学温标只是一种理论温标,不能用实验方法直接实现.可以采用由实际气体构成的气体温度计经过非理想修正后实现.

热力学温标建立之后,人们发现要想获得足够的准确度,构成热力学温标的测温装置非常复杂,成本昂贵,实验过程稍有不慎就会误差很大,复现性很低.能否找到一种国际温标,由它确定的温度复现精度高,试验方法简单便于温度量值传递,能满足生产需要,使用的测温仪器测得温度与热力学温度一致,技术条件能体现当代科学水平,这样的温标存在吗?1887年卡比伊研究制成定容气体温度计,建立了氢百度温标,1899年卡林达尔用铂电阻温度计作为温标的内插仪器,1911年德国柏林技术物理研究所建议采用卡林达尔的设想,1927年在英、美、德三国实验人员共同努力下,向第7届国际计量大会提出实用温标协议草案,这种温标以百度温标为基本温标,以6个可复现的固定点(氧沸点、冰熔点、水沸点、硫沸点、银和金的凝固点),3种内插仪器(铂电阻温度计、铂铑10-铂热电偶、光学高温计)、4个内插公式来确定温度,温度用 $^{\circ}\text{C}$ 表示,下限为 $-190^{\circ}\text{C}$ ,计量大会命名其为1927年国际温标(ITS-27).随着科学技术的发展,对温度测量准确度的要求越来越高,ITS-27确定的温度与热力学温度有一定的偏离,在1939年、1948年、1954年、1967年、1975年、1990年,以及今后都需要分别对国际温标进行修改,使之不断完善<sup>[7]</sup>.

#### 4 统计解释见唯象机理

在物理思维的基本思路和程序中,唯象和机理成功应用到热力学中.不涉及问题的机理,只从宏观现象上充分占有问题的条件和结论,称之为唯象性处理.从微观机理上释疑,称为机理性处理<sup>[8]</sup>.温度作为一个宏观量,其微观描述体现了机理性处理;同时统计解释体现了唯象性处理.根据热力学第零定律,两个温度不同的系统,通过热接触能够实现热平衡,最终达到温度相同,此时的温度只取决于系统内部的热运动状态.那温度反映了系统内部单个分子的热运动状态,还是大量分子热运动的集体表现

呢? 根据理想气体状态方程  $PV = \frac{m}{M_{\text{mol}}}RT$ , 得到  $P =$

$$\frac{\mu RT}{V} = \frac{N}{V} \frac{R}{N_{\text{mol}}} T = nkT, n = \frac{N}{V}$$

叫单位体积内的分子数,  $k = \frac{R}{N_{\text{mol}}}$  叫玻尔兹曼常数, 将理想气体的压强公

$$P = \frac{2}{3} n \overline{\epsilon_k} \text{ 代入, } T = \frac{2}{3k} \overline{\epsilon_k},$$

由此式可以看出, 温度这个宏观量, 从分子热运动角度来看, 是大量热运动

分子平动动能统计平均值  $\overline{\epsilon_k}$  的量度, 分子热运动平

动动能统计平均值  $\overline{\epsilon_k}$  越大, 系统温度越高. 由于温度

与大量分子热运动的统计平均量  $\overline{\epsilon_k}$  相对应, 所以对

单个或少数几个粒子的力学系统来说, 不存在温度的

概念. 温度是大量分子热运动集体表现, 具有统计

意义. 从另一个方面, 温度越高, 分子热运动平均平

动动能统计平均值  $\overline{\epsilon_k}$  越大, 说明分子运动越剧烈. 对于

处于平衡态的气体系统, 根据麦克斯韦速率分布

函数求得方均根速率  $\sqrt{v^2} = 1.73 \sqrt{\frac{RT}{M_{\text{mol}}}}$ , 方均根速

率涉及系统每一个分子的速率, 同时又是整个系统

气体分子运动速率平方的平均值的算术根, 反应了

气体分子运动的集体速率水平, 所以对于同一种气

体分子, 宏观量温度  $T$  越大, 方均根速率越大, 温度

仍然是大量气体分子热运动的集体表现.

5 正负温度见比较推理

比较是在思想上把各种对象和现象加以对比, 确定它们的相同点、不同点及其关系. 比较是一种重要的物理学思维方法. 推理是由具体事物归纳出一般规律或者根据已有的知识推出新的结论的思维活动<sup>[1]</sup>. 温度有高温和低温, 还有超高温(即金的凝固点 1 337.58 K 以上的温域) 和超低温(即氧的露点 90.188 K 以下的温域). 那正、负温度的物理意义是什么, 正温度高, 还是负温度高? 在正、负温度概念的建立中体现了比较和推理的思想方法.

热力学第三定律告诉我们不可能通过有限的步骤使一个物体冷却到绝对温度的零度<sup>[9]</sup>. 为什么还会有负温度呢? 在热力学中, 开氏温度定义为  $\frac{1}{T} =$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_x, x \text{ 表示热力学坐标, } S, U \text{ 分别表示系统的熵和内能. 通常熵 } S \text{ 随内能 } U \text{ 单调增加, 故温度 } T \text{ 是正}$$

的. 但如果熵  $S$  随内能  $U$  单调增加而减少时, 偏导数为负数时, 温度  $T$  就是负温度. 根据麦克斯韦-玻尔兹曼能量分布律, 对系统中某两个能级上的粒子数而言, 两个能态  $\epsilon_1, \epsilon_2$  ( $\epsilon$  为分子热运动能量) 粒子数

之比为  $\frac{n_1}{n_2} = \exp\left[-\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{kT}\right]$ , 若有  $\epsilon_1 < \epsilon_2$  则有粒子数  $n_1 > n_2$ , 即分子将优先占据低能量状态, 温度可以改写成  $T = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{k \ln \frac{n_2}{n_1}}$ , 温度此时为正值; 若高能级

上粒子数高于低能级上粒子数(这称为粒子数反转分布), 即有粒子数  $n_1 < n_2$ , 而且这样的状态能相对稳定地维持一定时间而处于局域平衡, 这样的子系统便处于负温度状态<sup>[10]</sup>. 1951 年柏塞尔和庞德通过对纯氟化锂晶体中核自旋系统性质的实验研究, 首次发现粒子数反转分布的现象, 证明了负温度系统的存在. 因此以实验定律为基础进行演绎推理作出抽象化、符号化判断相结合的思想是物理学建立物理量定义的重要思想<sup>[11]</sup>.

那负温度是不是比正温度低呢? 温度是表征粒子在能级上分布情况的物理量. 温度越高, 分布在高能级上的粒子数越多. 当  $T \rightarrow \pm \infty$ , 两个能级上的粒子数相等. 再吸收热量, 粒子反转分布, 温度转变为负值, 此时的负温度是比无穷大温度还要高的温度. 我们可以对由“冷”到“热”的顺序做一个排列:  $0^+ \text{ K}, \dots, \pm \infty \text{ K}, \dots, 0^- \text{ K}$ , 这个顺序和我们的习惯完全不同, 我们只需将玻尔兹曼分布函数中  $-\frac{1}{kT}$  定义成一个新的温度  $\theta = -\frac{1}{kT}$ , 新温度顺序为  $-\infty \rightarrow 0 \rightarrow +\infty$ , 最冷、最热分别由  $-\infty$  和  $+\infty$  来标志, 与人们通常的习惯一致了. 负温度在研究激光器及微波激射量子放大器时是一个十分重要的概念, 但我们只是将反转分布与玻尔兹曼分布的数学表达式进行对照而得出的结论, 这时整个系统仍然处于正温状态, 要不然实现负温状态的激光器, 在比无穷大还高的温度下, 早已不复存在<sup>[2]</sup>. 因此在对正负温度进行比较的过程中, 我们更进一步理解, 温度的确标志着系统中粒子热运动的剧烈程度, 这与温度微观意义的定性描述也是一致的.

在物理学形成和发展成为一门科学的过程中逐

(下转第 74 页)

— 71 —

率比,如果已知扬声器一的信号频率,就可测量扬声器二的信号频率.

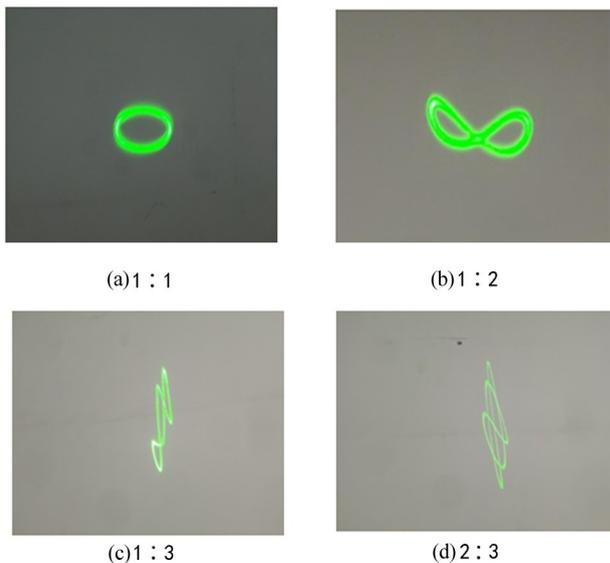


图2 不同频率比下的李萨如图形

## 6 实验结论

从实验结果可以看出:利用自制的李萨如图形演示仪可以在教室墙面上得到不同频率比下清晰的李萨如图形,其演示效果稳定、趣味性强,更能让学生简单直观地看到李萨如图形的形成.另外利用该演示仪也可以演示信号频率测量,给学生提供一种频率测量方法.

## 参考文献

- 瞿山,夏清华.一种李萨如图形演示仪[J].科技创新与应用,2019(29):33~34
- 林阿山.新型李萨如图演示仪的设计[J].龙岩学院学报,2012,30(05):16~19
- 唐世洪,张克梅.振动综合演示仪的设计与制作[J].大学物理实验,2001(02):38~39,42

(上接第71页)

步形成了物理学的思想方法.温度作为物理学重要的概念之一,在概念形成和完善的过程中,体现了丰富的物理学思想方法.

## 参考文献

- 彭聃龄.普通心理学(第4版)[M].北京:北京师范大学出版社,2012
- 薛国良.温度概念及其发展[M].石家庄:河北教育出版社,2006
- 张玉民.热学[M].北京:科学出版社,2000.28~29
- 邓人忠.物理学基本概念探讨[M].北京:气象出版社,2010

- 曹则贤.物理学咬文嚼字[M].北京:中国科学技术大学出版社,2015
- 高庆中.温度计量[M].北京:中国质检出版社,2004
- 崔志尚.温度计量与测试[M].北京:中国计量出版,1998
- 续佩君.物理能力测量研究[M].南宁:广西教育出版社,1996
- 汪志诚.热力学·统计物理(第4版)[M].北京:高等教育出版社,2008.129
- 黄颂翔,葛永华,王春涛.谈谈温度的概念[J].物理与工程,2007,17(3),20~23
- 朱铨雄.物理学思想概论[M].北京:清华大学出版社,2009

# Physics Thought Method in Temperature Concept

Wu Ying He Yinghu Feng Jinghua

(School of Physics and Electronic Science, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou 563002)

**Abstract:** In the process of the formation and development of temperature concept, it contains rich thought way on Physics. The process of establishing the concept of temperature embodies abstraction and summary. Temperature measurement embodies analysis and synthesis. Gradual improvement of temperature scale embodies questions and interpretations. Statistical interpretation of temperature embodies dimension and mechanism. Positive temperature and negative temperature embodies comparison and reasoning.

**Key words:** concept of temperature; thought way on physics; physical quantity