

经典和近代

# 物 理 学

第 三 册

[美] K. W. Ford 著

高 航 等译

高等教育出版社

1983

这是一部美国理工科大学生物理学教科书。原书分三卷。前两卷为经典物理学，后一卷为近代物理学。全书可作一年半的物理课教科书，也可删去某些章节作为一年的教科书。

译本分四册出版。第一册包括物理学导论和数学，第二册包括力学，第三册包括热力学和电磁学，第四册包括相对论和量子力学。本书可作我国理工科各专业物理课教学参考书。

本册第13、14两章由周舟译，第18章由薛秉忠译，其余均由高航译。译稿经王荣庆校订，最后由高航定稿。

K. W. Ford

*Classical and Modern Physics*

**A TEXTBOOK FOR STUDENTS OF SCIENCE**

**AND ENGINEERING**

Xerox College Publishing, 1974

经典和近代

**物 理 学**

第三册

[美] K. W. Ford 著

高 航 等译

\*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京顺义县印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 18.625 字数 450,000

1986年7月第1版 1986年7月第1次印刷

印数 00,001—4,580

书号 13010·0103<sup>2</sup> 定价 4.20 元

## 内 容 简 介

本书共七篇，头两篇(物理学导论和数学)提供绪言材料和背景材料，使用时可有很大的灵活性。其余五篇(力学、热力学、电磁学、相对论和量子力学)叙述物理学各方面的主要理论。对力学、电磁学和狭义相对论的理论，进行了最充分的数学阐述。在讲述热力学和量子力学时，比较注意分析物理现象而不是数学形式。尽管如此，我还是避免使用比较一般的篇名，如热、原子现象和原子核现象等，因为这几篇也要着重阐述物理学理论的统一性和威力，它们所需要的并非数学。当前学生非常易于把物理学看成互不联系的篇章拼凑在一起，针对这种情况，我预先计划把全书分成几个大篇，再分成若干篇幅较长的章，而不分成数目很大而篇幅很短的章，使学生一下子便能看到物理学的全面结构。

第一至第三篇，在第一卷(译本为第一二册)中已经介绍，这里只介绍第四和第五篇。

第四篇。本篇对热力学的探讨，微观多于宏观。可是，无论在何处，只要有可能我们就把微观与宏观并提且加以比较。特别强调热力学是连接和统一宏观世界和微观世界的理论这一事实。

第13章的主要课题是热和温度的概念、气体分子运动论、热力学的第零定律和第一定律、气体的性质等。热和内能之间的区别已经强调过(见§13.5)。理想气体定律的分子运动论推导(§13.7和13.8)，相当简明而又严格。本章末尾讨论了自由度和比热的量子化效应。

第14章中，热力学第二定律是通过无规事件的几率概念进行探讨的。本章特点之一是通过许多不同观点，例如通过热流的概

念、先验几率、无序和永恒运动等，来检验熵和热力学第二定律。本章中大多数实际应用是对理想气体的应用。有关热力学第二定律的范围更宽的应用，还需要教师重点地予以补充。

第五篇。本篇四章中的每一章都含有理论推导、实际应用和定性讨论这三者的均衡混合。第15、16两章以及第17章的前半章是电磁学基本定律的推导和应用。第七章的后半章把电磁理论与波结合起来。第18章继续进行波和光的统一论述。定性讨论是用于两个目的：一是介绍随后作定量发展的新概念（如§15.1、§16.1和§18.9所示），二是提供数学推导超出本书水平的材料（如§17.11所示）。在下列三节中，电磁学的不同方面被汇集在一起：§16.3预习后面几节将展开的定律；§16.11扼要概述电磁学的一些定律；§17.5概述电磁学的所有定律。有几个地方还着重介绍不同定律的相互关系。本篇具有高度对称性的应用题中有节制地用到线积分和面积分。

第15章的头两节，提供电现象和电荷的历史背景和某些一般事实。然后，在§15.3—§15.9里阐述静电学的重要概念和技术。§15.5里，叠加定律既作为基本定律介绍，又作为计算工具介绍。§15.6里，高斯定理是作为解高度对称性问题的一个很有力工具来介绍的，本节还介绍了面积分。在§15.10、§15.11和§15.14等节里，介绍电路和加速电荷的实际应用。注意，开始时以 $J = \sigma E$ 的形式介绍欧姆定律，后来以 $V = IR$ 的形式介绍。§15.12介绍电容，包括 $RC$ 电路，并与§15.15里的场能讨论结合在一起。选择在§15.13中用微观观点探讨电介质，未引进电位移 $D$ 。

第16章以磁铁和磁极开头，这样处理有助于强调磁和电虽然是有联系的但却是截然不同的现象，还使假想的磁单极问题的讨论成为可能。§16.3是对第16和17两章后面阐述的内容作了定性综述。运动中电荷所受的磁力和运动中电荷所产生的磁场，其

有关定律在 § 16.4 和 § 16.6 中讨论。介乎其间的 § 16.5 集中讨论应用问题。§ 16.7 (介绍作用在电流上的磁力) 与 § 16.4 是对应的, 而 § 16.8 (介绍电流所产生的磁场) 与 § 16.6 相对应。§ 16.8 还介绍安培定律及其应用。§ 16.10 是供选用的, 本节从微观观点探讨物体的磁性, 未引进磁场强度  $\mathbf{H}$ 。

第17章的 § 17.1 和 § 17.3 着重介绍电磁感应和磁电感应这两个定律的类似, 象这些定律与第 16 章所介绍的定律是一致的。§ 17.4 里, 楞次定律是作为能量守恒的重要推论, 和判定感应效应的方向之轻便工具来介绍的。电感的实用课题 (§ 17.6 和 § 17.7), 提供了从感应定律到辐射定律的一个桥梁。课文中只讨论简单的  $LR$  电路和  $LC$  电路; 习题中出现  $RLC$  电路。波动方程是作为特例来推导的, 并放在供选择的一个较难的小节中。另外, § 17.8—§ 17.11 的材料基本上是定性的。§ 17.11 可以考虑作为选择性的一节。§ 17.9 第一段所陈述的重要结论不应忽视。

第18章的开头三节, 是以偏振和相干为依据, 介绍波的理论描述。惠更斯原理出现在 § 18.3 的末尾。于是把波动形式的进一步阐述, 推迟到本章的最后三节。在这最后三节里讨论了干涉现象和衍射现象。几何光学出现在 § 18.4—§ 18.8。反射定律和折射定律的一般性推导出现在 § 18.4—§ 18.6。本章讨论了几种光学仪器, 包括从手放大镜到光栅分光镜等。

本书第五篇包括量子力学初步: § 15.2 有电荷量子化, § 17.11 有辐射线的发射和吸收, § 18.11 有光谱线。

# 目 录

## 第四篇 热力学

<b>第十三章 温度,热和分子运动论</b> .....	1
§ 13.1 热力学导言.....	1
§ 13.2 温度的概念.....	3
§ 13.3 摩尔.....	10
§ 13.4 温度的两个定律.....	13
§ 13.5 内能和热.....	19
§ 13.6 气体分子运动论.....	25
§ 13.7 密封气体的压强.....	29
§ 13.8 温度的亚微观定义.....	34
§ 13.9 比热.....	37
§ 13.10 理想的单原子气体.....	42
§ 13.11 热力学第一定律.....	45
§ 13.12 均分定理和热力学第零定律.....	49
§ 13.13 布朗运动.....	53
§ 13.14 简单气体的比热容.....	55
§ 13.15 自由度的“冻结”.....	61
<b>第十四章 熵和热力学第二定律</b> .....	84
§ 14.1 无规事件的几率.....	84
§ 14.2 分子几率.....	92
§ 14.3 熵和几率:热力学第二定律的微观描述.....	96
§ 14.4 热流和均分.....	101
§ 14.5 永动.....	102
§ 14.6 熵和热流:热力学第二定律的宏观描述.....	105
§ 14.7 热力学第二定律的应用.....	112
§ 14.8 气体的行为.....	122

* § 14.9	循环过程	131
§ 14.10	时间的流向	139

## 第五篇 电磁学

<b>第十五章</b>	<b>电学</b>	161
§ 15.1	电力的基本性质	162
§ 15.2	电荷的概念: 电荷守恒和量子化	164
§ 15.3	电力的库仑定律	167
§ 15.4	电场	173
§ 15.5	叠加定理	181
§ 15.6	电通量: 高斯定理	185
§ 15.7	电势	192
* § 15.8	电偶极子	204
§ 15.9	静电场中的导体	207
§ 15.10	欧姆定律	213
§ 15.11	简单电路	217
§ 15.12	电容	224
* § 15.13	电介质	231
§ 15.14	带电粒子的电致加速度	236
§ 15.15	电场的能量	243
<b>第十六章</b>	<b>电磁学</b>	272
§ 16.1	磁铁和磁力	272
§ 16.2	磁场	275
§ 16.3	电磁学上的关键性发现	282
§ 16.4	作用在运动电荷上的磁力	290
§ 16.5	带电粒子的磁偏转	292
§ 16.6	运动电荷所产生的磁场	300
§ 16.7	作用在电流上的磁力	305
§ 16.8	电流所产生的磁场	311
§ 16.9	安培的定义	324
* § 16.10	物质的磁性	327

§ 16.11	电磁学定律的概述	332
<b>第十七章</b>	<b>变化中的场</b>	<b>356</b>
§ 17.1	电磁感应	357
§ 17.2	电磁感应的应用	370
§ 17.3	磁电感应	374
§ 17.4	楞次定律	381
§ 17.5	麦克斯韦方程组	383
§ 17.6	电感	387
§ 17.7	LC振荡电路	395
§ 17.8	光的波动性	400
§ 17.9	光的电磁理论	406
§ 17.10	电磁波谱	412
§ 17.11	发射和吸收	418
<b>第十八章</b>	<b>波动现象</b>	<b>448</b>
§ 18.1	光和声	448
§ 18.2	偏振	451
§ 18.3	叠加	457
§ 18.4	反射	465
§ 18.5	反射镜	467
§ 18.6	折射	475
* § 18.7	棱镜	481
§ 18.8	透镜	486
§ 18.9	衍射现象	496
§ 18.10	干涉	498
§ 18.11	衍射光栅	506
* § 18.12	单缝衍射	517



## 第四篇 热 力 学

### 第十三章 温度,热和分子运动论

那些与人体大小相距很远的自然领域,经常对人类的想象力提出挑战。大至宇宙体系,小至物质的基本结构,都一直令人们冥思苦想,绞尽脑汁。如果说牛顿力学是沟通宏观(人体大小)世界与宇宙世界的桥梁,那么,热力学就把宏观世界同亚微观世界联系了起来。

#### §13.1 热力学导言

热力学是以力学为基础的关于热和温度的理论。它的巨大成就,在于用关于原子和分子的亚微观力学理论,成功

热力学把宏观与亚  
微观联系了起来

地解释了物质的宏观性质,特别是热学性质。热力学在沟通宏观与亚微观这两个自然领域方面起到了桥梁作用<sup>①</sup>,这就是本章和下一章将要着重阐明的内容。

尽管热力学是同物质的原子论同时发展起来并支持了后者的发展,热力学本身却并不是关于物质结构的理论。十八世纪末叶,热和温度的理论刚刚开始站住脚;大约与此同时,化学实验为原子

---

<sup>①</sup> 有时,“热力学”一词的含义只限于对热现象的宏观研究,而不包括“统计力学”的亚微观研究。我们这里所说的“热力学”则包括这两种研究的热现象的全部理论。

的存在提供了第一批有力的实验根据。到十九世纪中叶，化学几乎能确凿无疑地证实原子的存在了，也就在这个时期，宏观的和微观的物理学理论结合了起来，形成了我们今天所说的热力学。十九世纪末叶，对于原子的存在，取得了意义重大的但仍然是间接的证明。最后，直到1905年，爱因斯坦用热力学来研究布朗运动 (§ 13.3)，弄清了在液体中尘粒的跳动正是分子碰撞作用的反映和体现，这才使热力学的这种桥梁作用成为直观。不久以后，其他一些甚至更为直接的原子现象和分子现象，也相继观察到了。

当物体运动时，其结构一般不受什么影响。如果这同一物体带了电，它的形状、大小和外观也不大可能发生什么变化。从宏观角度研究力学现象和电学现象时，可以不必考虑物质结构问题，但

热物理学不能忽视  
物质结构

对于热现象的研究就不然了。物体在受热后，至少它的大小会稍有改变，它还可能熔化、沸腾、烧焦、着火或者爆炸。物

体究竟怎样变化，在很大程度上由其组成所决定。研究热现象的热力学是与物质结构分不开的。热力学不但要考虑到物质是由原子和分子所组成，而且还得考虑原子和分子如何排列(不管是处于固态、液态或气态)，怎样运动以及怎样相互作用。

由于以下几个原因，热力学的数学工具和物理概念都比力学更为复杂。一个原因是，热力学所研究的对象不是少许几个粒子或物体的简单系统，而是由大量粒子组成的内部颇为复杂的系统。从分子观点看，一滴水是一个远比太阳系复杂得多的系统。另一个原因是，热力学同时以多种尺度(从原子尺度到人体以致更大的尺度)来观察自然界。再一个原因是，热力学涉及物质的各种形态(固态、液态、气态)并与物质的物理变化和化学变化都有关系。

在本书的这一篇中，我们既不打算对整个热力学理论加以概述，也不打算对其全部基础作逻辑的论证，而是着重探讨热力学的

几个基本概念，特别是下面两个基本概念：

1. 热和温度都是分子能的表现。
2. 宏观世界的自发变化由微观世界的统计规律所支配。

热力学的两个基本概念

这两个概念都讲到了宏观世界与微观世界的联系，足以说明热力学的桥梁作用，也足以表明热力学第一定律和第二定律这两个重要原理的意义。

### §13.2 温度的概念

在引入象温度这样一个新概念时，首先要记住定义和测量是不可分割的。温度由温度计的读数所确定，这个说法是完全正确的。因此，制作温度计的细则之中实质上包含了温度的定义。还有一个很重要的问题，就是温度定义的实用性，这取决于由某一特定温度计所定义的温度概念能不能用简单而自洽的方法来描述自然现象。

在本节中，我们将从宏观角度来探讨温度的概念。这样，温度就成了一个全新的、基本的概念，而不是由质量、长度和时间等力学概念所派生的概念。以后，在§13.8中，我们还要从微观角度来研究温度，并将发现，从分子观点看，温度的性质最终仍有其力学基础。

环顾周围，我们不难发现一些无生命的物质受冷或热的作用，这些作用可

各种测温方法

用来作为定义和测量温度的依据。当受热时，金属棒会伸长，液体会膨胀，而气体则体积会膨胀，或者压强会增大，或二者兼有。在很热的时候，大多数物质会发光并放出辐射能。此外，在一定的温度下，物质还会发生某些显著的变化——如凝固、沸腾、燃烧。从原理上说，这些效应中的任一种效用都可用来定义和测量温度，其

中多数确已用于测温了。例如，加热炉用金属丝作为温度计，常用的露天温度计由液柱构成，高温计则通过测定辐射能来测量高温。

### 气体温度计和开氏温标

作为在实验室条件下(此时温度既不太高也不太低)确定温度的标准，气体温度计是最适宜的。定容气体温度计是气体温度计的相当简单<sup>①</sup>的一种(图 13.1)。这是一种用来测量气体压强(在

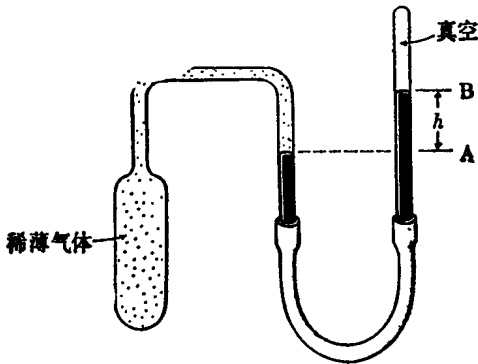


图 13.1 定容气体温度计(理想的)。右边的竖直管可以上下移动以保持液面A固定,从而使气体体积保持恒定。由A、B液面差(高度 $h$ )就可测出气体的压强。压强越高,表示温度越高。(参阅图 13.3)

体积恒定下)的装置。气体受热时,压强升高;冷却时,压强降低。压强是气体的一种力学性质(单位面积上的作用力),很明显,它与可称之为气体热学性质的冷、热有关。因而,我们可以用已经建立的压强这个概念来定义温度这个新概念。最简单的是,把温度规

用气体温度  
计定义温度

定为与压强成正比:

$$T = aP \quad (\text{体积恒定}) \quad (13.1)$$

这个定义有两方面的内容。第一,也是最重要的,是温度与压强成

<sup>①</sup> 另一类型即定压气体温度计,在原理上同样简单,但实际用途不太广泛。定压气体温度计将在习题 P 13.2 中讨论。

正比, 这个关系说明了温度这个概念的性质。第二, 是比例常数  $\alpha$  的选择, 它决定  $T$  的数值(相当于  $T$  的单位)。

如果气体温度计中的气体是所谓的“理想气体”, 那么, 式 13.1 就给出了绝对温度的定义。从分子观点看, 如果气

理想气体的亚微观定义

体分子的大小与分子间平均距离相比可以忽略, 并且, 两分子间相互作用的平均势能与它们的平均动能相比也可以忽略, 这样的气体就叫做理想气体。从宏观角度看, 理想气体的定义是由推论而得来的。在气

理想气体的宏观定义

体温度计内, 具有通常密度的空气确定了某一温标。密度稍低时, 空气所确定的温标就稍有不同。可以推论, 密度降为零时, 空气必确定某个特定的温标。如果在气体温度计中充以其他气体, 我们可以重复上面所说的过程。实验发现, 无论什么气体, 当密度趋近于零这个极限时, 所确定的温标总是相同的, 这个温标就是绝对温标。密度极低的极限情况下, 所有的气体都成了理想气体。即使在通常的密度下, 大多数气体如氢、氦、氮和氧, 也都非常接近于理想气体。在下面的讨论中, 我们假定气体温度计中的真实气体与理想气体非常相近, 以致不再需要任何校正。

温度的 SI(国际制)单位“开”(K), 是令水的三相点的温度为 273.16K 来规定的:

$$T_t \equiv 273.16 \text{ K} \quad (13.2)$$

在通常的压强下, 水在某一温度凝固, 在另一温度沸腾。当压强降低时, 沸点和凝固点之间的温差减小。在某一临界压强下(对于水, 约为 0.006 atm), 温差消失。这一临界状态, 称为三相点, 它是固、液、汽三相平衡共存的临界状态。由于三相点的唯一性和复现性, 它可取作一个很好的校正点。图 13.2 展示一个

“开”由水的三相点所规定

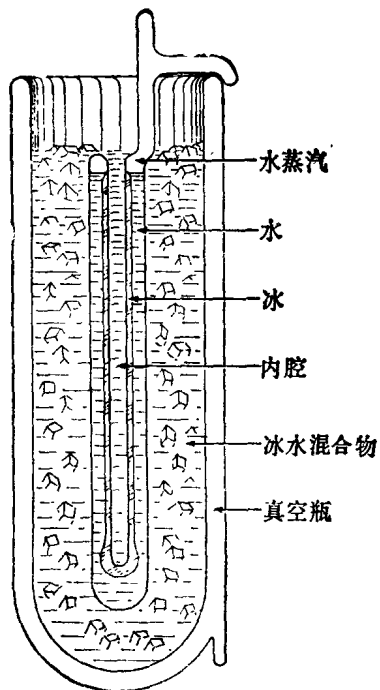


图 13.2 美国国家标准局的三相点测定器。把待校正的温度计插入内腔。温度计周围的冰、水、水蒸汽三者的平衡混合物建立了被规定为 273.16K 的标准温度。外面的冰、水混合物和真空瓶用来使冷热状态保持均匀。

用来确定三相点温度的装置。选择 273.16 这个数，是为了与原先的两个标准校正点（即标准压强下水的凝固点与沸点）一致。在开氏绝对温标中，这两个点非常接近于 273.15 K 和 373.15 K，因而其差值几乎正好是 100 K。

如果气体温度计的测温泡处于水的三相点温度，而取气体的压强为某一值  $P_t$ ，则式 13.1 可写成

$$T = \left( \frac{273.16}{P_t} \right) P \quad (13.3)$$

常数  $a$  等于  $273.16/P_t$ ，对于一个特定的温度计， $a$  是单值的，对于

另一个温度计,  $P_t$  值可以不同, 因此  $a$  也可以不同, 但是这两个温度计却确定同一温标.  $T$ - $P$  特征直线图如图 13.3 所示.

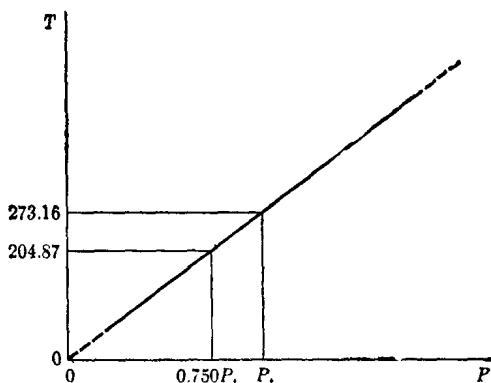


图 13.3 用气体温度计建立的开氏温标. 在水的三相点, 气体压强为  $P_t$ , 这一点的温度规定为 273.16 K. 在其他介质中, 气体取其他压强值; 此时的温度由定义  $T = aP$  所决定. 例如, 当  $P = 0.750P_t$  时, 温度  $T = 0.750 \times 273.16 = 204.87$ . 直线中的虚线部分表示气体温度计不再适于测温的外延区域.

## 温度的测量

显然, 气体温度计既能定义温度, 也能测量温度. 当气体温度计的测温泡置于热稳定的环境中时, 气体的压强也会稳定在某一特定值. 这时, 称温度计与其环境处于平衡. 由式 13.3, 测出压强, 就可确定温度. 这是温度计的温度. 至于该温度是否就是环境的温度, 还需由另一个实验来验证 (§13.4). 设有一支水银温度计(或其他类型的温度计), 在不同的温度下逐一与一支气体温度计处于平衡, 我们就可以校正这支水银温度计. 这样, 即使没有象式 13.1 那样简单的公式来规定, 这支水银温度计也可用来测量绝对温度.

热平衡

对其他温度计的校正

### 温度是标量

由定义可知，温度是一个标量。温度计表示的仅仅是  $T$  的数值，温度没有方向性，也不取决于坐标系。实验证明，温度的这个定义如同物理学中的其它定义一样，是简单、自洽和实用的。

### 绝对零度

如果把气体温度计测温泡逐一放进渐渐变冷的各个环境中去，它所记录的压强值也就递减。气体的最低压强的期待值是零。式13.3表明，可能存在一个最低温度即  $0\text{K}$ 。然而单从气体温度计作出这个结论未免太大胆了，因为，足够冷时，一切气体都液化了，“气体温度计”就不再含有气体，也就不再起简单温度计的作用了。

### $0\text{K}$ 是可能达到的最低温度

但是，其他许多事实证实，确实存在着一个实际的温度起点，对于这个温度起点，现代实验工作者的测定已精确到千分之一度以内。关于温度是分子能的表现形式这一观点 (§ 13.8) 清楚地说明，绝对零度是肯定存在的。因为，当不能再从一个系统中攫取能量时，该系统的温度也就不可能进一步降低了。

表 13.1 是某些常见气体的液化温度。在所有物质中，氮的液

表 13.1 某些常见气体的液化温度(大气压下)

物 质	液 化 温 度	
	K	$^{\circ}\text{C}$
氮	4.2	-268.9
氢	20.4	-252.8
氖	27.2	-245.9
氦	77.4	-195.8
一氧化碳	81.7	-191.5
氧	90.2	-183.0
甲烷	111.7	-161.5
氯	238.6	-34.6
氨	239.8	-33.4
水蒸汽	373.2	+100.0



化温度最低, 只比绝对零度高 4 度<sup>①</sup>。温度接近绝对零度时, 必须以温度与能量的关系为基础来设计全新的测温方法。

### 其他温标

摄氏温标原来是由常压下水的凝固点与沸点所规定的, 现在则用一个简单的公式由开氏温标来规定:

摄氏温标

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15^{\text{②}} \quad (13.4)$$

常压下水的凝固点( $0^{\circ}\text{C}$ )只比三相点温度低 0.01K。

华氏温标是由  $32^{\circ}\text{F} = 0^{\circ}\text{C}$  和  $212^{\circ}\text{F} = 100^{\circ}\text{C}$  这两个校正点所规定的。换算公式为

华氏温标

$$T(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5}T(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (13.5)$$

最后, 还有兰金温标, 它是一种绝对温标(即以绝对零度为零度), 它的单位温度间隔与华氏温标相等。只要乘上一个简单的因子, 兰金温标就可以同开氏温标建立如下关系:

兰金温标

$$T(^{\circ}\text{R}) = \frac{9}{5}T(\text{K}) \quad (13.6)$$

尽管在某些工程学科中还会遇到华氏温标和兰金温标, 但它们在科学研究中已很少使用。图 13.4 对于已经讨论过的四种温标作了比较。

---

① 在所有已知的物质中, 在绝对零度 (大气压下) 保持液态的只有氦。

② 对于开氏温标不再使用度的符号, 但在其他温标中仍保留度的符号。摄氏温标中, 温度的值用  $^{\circ}\text{C}$  表示, 温差有时则用  $\text{C}^{\circ}$  表示。