



# 普通物理学

第二分册 热学

(第二版)

梁绍荣 刘昌年 盛正华 主编

刘昌年 修订

高等教育出版社



977367

04

302122

2

# 普通物理学

第二分册：热 学

(第二版)

梁绍荣 刘昌年 盛正华 主编

刘昌年 胡一飞 编

高等教育出版社

1994

(京) 112号

## 内 容 提 要

全书共 5 册,曾于 1987—1989 年间出版了第 1 版。现根据国家教委 1991 年 12 月颁发的《中学教师进修高等师范专科物理教育专业教学大纲》,并考虑到师专、教育学院及函授等方面的教学需要修订再版。

本册为热学分册,其内容包括总论以及理想气体状态方程和气体分子动理论基本方程、气体分子统计分布律、气体内的输运过程、热力学第一定律、热力学第二定律、固体和液体的性质、相变等 7 章。各章末均附有思考题和习题。

全书加强了普通物理学各部分的内在联系,具有概念阐述准确、清晰,内容系统,知识面较广等特点。

本书可作为卫星电视教育、师专、教育学院和函授等办学形式物理专业教材,亦可供科技工作者和自学人员参考。

## 普通物理学

### 第二分册:热 学

(第二版)

梁绍荣 刘昌年 盛正华 主编

刘昌年 胡一飞 编

刘昌年 修订

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

中国科学院印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 9.75 字数 250 000

1987 年 7 月第 1 版

1994 年 6 月第 2 版 1994 年 6 月第 1 次印刷

印数 0001—4 235

ISBN7-04-004594-X/O·1296

定价 5.00 元

## 第二版前言

这套书共五册是适应师专教学改革的要求及培养、提高初中物理师资的需要,参照师专、教育学院、中学教师进修高等师范专科等三种教学大纲编写而成。于1987—1989年陆续出版后,受到各方面的欢迎和好评。本书是受当时国家教委高校理科物理教材编审委员会普通物理编审组委托编写的,现根据国家教委1991年12月颁发的中学教师进修高等师范专科物理教育专业教学大纲,并考虑师专、教育学院及函授等各方面的需要修订再版。全书分力学、热学、电磁学、光学和近代物理学基础等五个分册。

全书加强了普通物理学各分册之间的联系;增加了物理学导论作为全书的第一章,使读者在学习物理学之初对它的全貌有一梗概的了解,以图消除“只见树木,不见森林”的弊端;全书力求具有体系严谨、深入浅出、概念准确、叙述简明、知识面宽、求实求新,便于自学等特点。

本书为第二分册《热学》。它在内容上作了较大的调整,将分子动理论部分放在热力学部分之前,这样作的目的是为了由浅入深、循序渐进,更符合教学的规律,并能更好地与中学物理衔接。在取材上,删减了和中学物理相重复的一些内容;增添了较多联系实际的内容。本册书增加了较多的例题、思考题和习题,以利于理解教材内容和提高联系实际的能力。补充说明的和介绍知识的内容用小字排印,可供选作阅读材料,较难的部分教材内容和习题附加星号,以供教学时根据需要选用。

《热学》由刘昌年执笔修订,镇江师专严仲强同志协助作了大量的工作。在修订前曾广泛听取师范专科学校和教育学院有关教师的意见。云南楚雄师专岳开华、原编者之一安徽徽州师专胡一

飞、江苏镇江师专严仲强、湖南岳阳教育学院陈钺、天津教育学院刘若民等同志根据他们使用本册书的体会提出许多宝贵的意见。中国电视师范学院李小林同志根据电视教学中教师和学员所反映的情况提出了综合意见。北京大学包科达同志和南京大学秦允豪同志仔细地审阅了全册并提出许多改进意见。这些意见向编者指出原书的优点和缺点,从而能够切实地提高修订版的质量。在此,编者谨对以上各位同志以及所有关心这册书的同志们表示衷心感谢。

修订版虽然消除了原书中的一些错误和不妥处,但还可能存在某些问题,敬请读者指正。

编 者

1993年10月

## 前 言

这本《热学》是为师专物理专业暨培训在职初中物理教师而编写的《普通物理学》的第二分册。

本书是在国家教委高等学校理科物理教材编审委员会的指导下,根据有关教学大纲的基本要求编写的。主要内容包括热力学、分子运动论基础和物性学知识等三部分,共十章,其中第五章至第七章由徽州师专胡一飞执笔,其余各章由镇江师专刘昌年执笔,全书由刘昌年统稿。书中大字排印部分为基本内容,小字排印部分可供师专选讲及读者参考。有关各章的小结和解题指导等巩固知识的内容,均列入与本书配套的《学习指导书》中。

考虑到本书的主要目的是培养初中物理教师(包括培训在职教师),并考虑到热学所讨论的物质热运动形式和力学所研究的机械运动存在本质区别,我们在编写过程中,注意加强热力学和分子运动论的实验基础,力求从实验事实出发阐明热物理学的基本概念和基本规律;注意联系初中物理教学及生产、生活实际,适当介绍一些科学技术新知识,以拓宽学生的知识面;我们还注意教学方法上的启发性以及基本方法的训练,让学生去联想、去自己觅取知识。此外,在内容方面,我们注意加强关于系统、过程、温度、热与量热、内能和熵等概念,以及热运动的宏观规律等的阐述,以期给学生以较坚实的热物理学基础知识,能胜任初中物理教学工作。对于上述各点,我们尽了很大努力,但到底做到了什么程度,还有待读者来鉴定。

本书承山东大学余寿绵教授(主审)、陕西师范大学辛绵荣副教授(副主审)和南京大学秦允豪、哈尔滨师专肖顺镛、济宁教院边大安、北京师范大学学院聂宜如等同志审定,他们曾提出很多中肯意

见,对此,我们深表感谢。

限于我们的水平,本书定会存在一些错误和不足之处,敬请读者指正。

编 者

1987年7月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 总论                       | 1  |
| § 2-0-1 热学的研究对象和研究方法     | 1  |
| *§ 2-0-2 热学的形成和发展        | 2  |
| § 2-0-3 温度和热量的测量         | 6  |
| § 2-0-4 热力学平衡态 热力学第零定律   | 15 |
| 思考题                      | 19 |
| 习题                       | 19 |
| 第一章 理想气体状态方程和气体分子动理论基本方程 | 22 |
| § 2-1-1 理想气体状态方程         | 22 |
| § 2-1-2 分子动理论的实验基础       | 25 |
| § 2-1-3 分子力和分子势能         | 31 |
| § 2-1-4 理想气体的微观机制        | 34 |
| § 2-1-5 理想气体的压强公式        | 38 |
| § 2-1-6 能量公式和温度的微观解释     | 41 |
| § 2-1-7 基本公式的验证          | 43 |
| § 2-1-8 范德瓦耳斯方程          | 45 |
| 思考题                      | 49 |
| 习题                       | 50 |
| 第二章 气体分子的统计分布律           | 53 |
| § 2-2-1 统计方法简介           | 53 |
| § 2-2-2 气体分子速率的测定        | 61 |
| § 2-2-3 麦克斯韦气体分子速率分布律    | 65 |
| § 2-2-4 波耳兹曼分布律 等温气压公式   | 72 |
| § 2-2-5 分子能量按自由度均分定理     | 76 |
| § 2-2-6 理想气体的内能和定容摩尔热容   | 80 |
| 思考题                      | 85 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 习题                          | 86  |
| <b>第三章 气体内的输运过程</b>         | 89  |
| § 2-3-1 气体分子的自由程            | 89  |
| § 2-3-2 气体内输运过程的宏观规律        | 93  |
| § 2-3-3 粘滞现象的微观机制           | 100 |
| § 2-3-4 热传导和扩散的微观机制         | 105 |
| § 2-3-5 稀薄气体                | 109 |
| 思考题                         | 114 |
| 习题                          | 115 |
| <b>第四章 热力学第一定律</b>          | 117 |
| § 2-4-1 热力学过程 功和热           | 117 |
| § 2-4-2 状态函数内能 热力学第一定律      | 125 |
| § 2-4-3 气体的内能 焦耳定律 焦耳-汤姆孙效应 | 127 |
| § 2-4-4 热容                  | 130 |
| § 2-4-5 热力学第一定律应用于理想气体      | 134 |
| § 2-4-6 循环过程与卡诺循环           | 143 |
| § 2-4-7 热机和制冷机              | 152 |
| 思考题                         | 163 |
| 习题                          | 165 |
| <b>第五章 热力学第二定律</b>          | 172 |
| § 2-5-1 热力学第二定律             | 172 |
| § 2-5-2 热现象过程的不可逆性          | 177 |
| § 2-5-3 卡诺定理                | 181 |
| § 2-5-4 热力学温标               | 184 |
| § 2-5-5 熵 熵增加原理             | 186 |
| *§ 2-5-6 熵的统计意义             | 196 |
| 思考题                         | 198 |
| 习题                          | 199 |
| <b>第六章 固体和液体的性质</b>         | 203 |
| § 2-6-1 物质的热学性质             | 204 |
| § 2-6-2 液体的分子现象             | 215 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| § 2-6-3 固体和液体的微观结构 .....       | 235        |
| 思考题 .....                      | 249        |
| 习题 .....                       | 250        |
| <b>第七章 相变</b> .....            | <b>253</b> |
| § 2-7-1 相变 一级相变的普遍特征 .....     | 253        |
| § 2-7-2 气液相变 .....             | 258        |
| § 2-7-3 固液相变 .....             | 267        |
| § 2-7-4 实际气体的等温线 物质的临界状态 ..... | 269        |
| § 2-7-5 克拉珀龙方程 .....           | 277        |
| § 2-7-6 固气相变 三相图 .....         | 283        |
| *§ 2-7-7 大气中的含水 .....          | 284        |
| 思考题 .....                      | 292        |
| 习题 .....                       | 292        |
| <b>习题参考答案</b> .....            | <b>294</b> |
| <b>常用物理常量及换算关系表</b> .....      | <b>299</b> |
| <b>主要参考书</b> .....             | <b>301</b> |

# 总 论

## § 2-0-1 热学的研究对象和研究方法

热学是物理学的一个重要分支，它是研究物质热运动规律的学科。

在自然界发生的多种现象中，有一些现象如物质的热膨胀、物质的状态变化、气体被压缩温度升高、摩擦生热、蒸气在气缸中推动活塞做功等等，它们宏观上都是和温度有关的物质性质的变化。这些变化叫**热现象**。热现象在微观上都是由于构成物质的大量分子的无规运动而发生的。任何现象的发生都是由于物质的运动。我们把与热现象有关的一类物质运动叫做**热运动**。

研究热运动有两种方法。一种是直接通过观察和实验去总结热运动的规律性，这种方法叫**热力学方法**。用热力学方法得到的理论，是热运动的宏观理论，叫**热力学**。另一种方法是从物质的微观结构出发，即从分子运动和分子间相互作用出发，去研究热运动的规律。这要用到统计方法。用这种方法研究大量分子的行为得到的理论叫**统计物理学**。宏观方法可测定物质系统的参量并可表达它们之间的关系和它们变化的规律，并不涉及系统的内部结构。微观方法从系统微观结构的原子-分子论出发，探讨大量各自依照力学规律运动着和相互作用着的个体(原子、分子)的集体行为，并确认宏观参量和宏观规律根源于这种集体行为。

个别分子的运动以及它与其它个别分子间的相互作用遵从力学规律，并可以用力学参量(位置、速度等)描绘它的状态。一个系统所含分子数非常巨大，它有着不同于力学性质的热学性质。显然，这种性质虽与个别分子的力学性质有关，但并不是个别分子

性质（以参量来表示的）的总和。在探讨这种性质时必须着眼于大量分子的平均行为，使用统计方法得出大量分子集体所遵守的规律——统计规律。个别分子遵守力学规律，而大量分子的集体遵守统计规律

气体分子动理论（过去称为气体分子运动论）是统计物理学的组成部分。由于使用了简单和鲜明的理想气体模型和其它模型（例如范德瓦耳斯模型），使它成为统计物理学最先发展起来的并最易为人们所理解的部分。

本课程只讨论热力学的最基本的部分和气体分子动理论，最后介绍一些物质的热学性质。

## **\*§ 2-0-2 热学的形成和发展**

从远古时代起，由于火的广泛应用，人们就逐渐认识了许许多多的热现象。但是人们在生产和生活中对热的利用最早只限于取暖、照明、煮熟食物等，利用热来制造器具、工具和兵器则是较晚的事了。人们缓慢地积累着关于热的知识。直到十八世纪初资本主义萌芽时期，由于社会生产力有了很大的发展，生产中遇到的热现象增多了，因而提供了大量的有关知识，大大促进了人们对热现象的研究。当时生产上需要动力，人们产生了利用热来获得机械功的愿望。1705年纽可门等制造出第一台可以连续工作的蒸汽机，1724年华伦海脱(1686—1736)制成水银温度计，并制定了华氏温标。1742年摄耳修斯(1701—1744)制定了摄氏温标（见§ 2-0-3）不过当时温标的固定点是，水的沸点为 $0^{\circ}\text{C}$ ，冰的熔点为 $100^{\circ}\text{C}$ ，后来，把这两个固定点赋值对调一下，成了现在使用的摄氏温标。1754年布莱克(1728—1799)用混合量热法测定热量、比热容和潜热、蒸汽机在十八世纪上半叶得到不断改进，瓦特(1736—1819)终于在该世纪六十年代设计出了划时代的往复式蒸汽机。生产的需要，知识的积累以及测温与量热方法和工具的创造，使对热现象的研究逐渐形成一门科学——热学。

在我们叙述热学的发展时，必然要介绍许多在此领域内作出重要贡献的科学家和他们的历史功绩。然而，这些正是本书所要讲述的内容，因此，在这里只是给读者一个轮廓。

当十八世纪上半叶测温学和量热学发展起来以后，人们把热传导和物质受热温度升高以及固体受热变为液体等现象看作是一种特殊的物质——热质的运动。显然，这是错误地把较机械运动远为复杂的热运动看作一种机械运动了。只当人们接触到运动形式的转化，特别是在研究摩擦生热现象时，热质说才碰到不可克服的困难。

十九世纪上半叶，在热学中出现了突破性的研究成果。1842年迈耶(1814—1878)提出能量守恒的学说，他认为热是一种能量，能够和机械能相互转化。他还从空气定压比热容与定容比热容之差推算出热功当量(参看第四章迈耶公式)。十九世纪最伟大的物理学家之一，可称为现代热学的创始人焦耳(1818—1889)在1842年到1850年间做了大量的实验，以各种方式测定了热功当量。他利用重物下降做功带动桨叶搅动容器中的液体，使液体的温度升高，来计算重物所作功和液体所获热量之比  $\frac{m'gh}{mc\Delta T}$ ，式中  $m'$  为重

物质量， $h$  为下降高度， $m$  为液体质量， $c$  为液体比热容。此比值在多次实验中为一常数，不依赖于  $m'$ 、 $h$ 、 $m$  和  $c$ ①。焦耳还用了包括电热方法在内的其它许多实验设计，所获结果惊人地一致。现在公认的比值是  $4.186 \text{ J} \cdot \text{cal}^{-1}$ 。热功当量的测定最终粉碎了热质说，并揭示了各种运动形式之间的联系与转化，且在转化中“运动的量”(即能量)守恒。在热的本质被认识之后，热和功的当量关系只作为单位换算关系。热功当量的测定证明了能量守恒与转化定律。该定律被恩格斯称为十九世纪上半叶的三大发现之一。这样，热功当量测定对于发展辩证唯物主义的意义远远超出它本身

---

① 此处为叙述原理方便，没有把容器等的热容算入，同时也未计热量的散失。

的物理内容了。

和力学中把功看作系统机械能变化的量度一样，焦耳所做的一系列实验都揭示出做功不仅可以改变物体的机械能，做功还可以改变系统的另一种形式的能量——内能。焦耳进一步研究了气体的节流膨胀，也就是今天称作焦耳-汤姆孙(开尔文1827—1907)效应的现象(见第四章)，从而对气体的内能有个更加全面的认识。就这样，热力学第一定律建立起来了，它是包括功、热量和内能的能量守恒定律。

热力学第一定律揭示了系统吸取热量可能做功，这在蒸汽机中已经实现。但是，在十八世纪，蒸汽机的效率仅有百分之几，这就意味着消耗大量的燃料而仅能获得很少的机械功。仅靠改善机械结构，减少热量散失和摩擦损失并不能有效地提高蒸汽机的效率。瓦特于1763—1769年提出多项改进，有了和现在使用的蒸汽机基本相同的热机，它的效率仅为8%—16%。提高热机效率的要求进一步推动了热力学理论的发展。工程师卡诺(1796—1832)研究了理想热机的效率，于1824年提出卡诺定理(见第五章)。克劳修斯(1822—1888)于1850年发现热传递过程的不可逆性；汤姆孙于1851年发现功转化为热过程的不可逆性。人们对于不可逆过程的研究导致发现在孤立系统中进行的能量传递和转化过程的进行方向与限度的普遍规律——热力学第二定律。1865年克劳修斯引入了系统的一个物理量熵，并把热力学第二定律表达为数学形式。

热力学第一定律和热力学第二定律构成经典热力学。

在热力学发展的同时，分子动理论也迅速发展起来。最早，分子动理论的研究是为了探讨热的本质。1744年罗蒙诺索夫(1711—1765)在《论热与冷的原因》中提出热是分子运动的表现。1797年伦福德(1753—1814)观察了钻炮膛时不断生热的现象。当时观察到钻头越锐，钻下来的铜屑越多，炮膛并不很热(即温度不很高)。而钻头越钝，钻下来的铜屑越少，炮膛反而很热。这是用热

质说解释不通的。伦福德首次从实验肯定热来源于运动。

十九世纪中叶,克劳修斯、麦克斯韦(1831—1879)、玻耳兹曼(1844—1906)等人对气体分子动理论作了大量的研究。麦克斯韦于1859年导出了气体分子的速度分布律。玻耳兹曼得出分子按能量的分布律。在这一时期,除麦克斯韦和玻耳兹曼外,克劳修斯作出了最出色的工作。他除了在建立热力学第二定律方面的贡献外,在气体分子动理论的建立过程中,他引进了分子自由程概念并导出平均自由程公式,阐明了气体分子发生碰撞的统计规律,运用这个规律能够正确说明分子能量按自由度均分,解释气体输运现象等(见第三章),可以认为他是清楚地说明气体分子运动规律的统计意义的第一个人。

1870年以后建立了麦克斯韦-玻耳兹曼统计法。1902年吉布斯(1839—1903)建立了系综理论。从此经典统计物理学的理论和方法基本完善。

1900年普朗克(1858—1947)在当时物理学家们从多种理论解释黑体辐射规律取得进展的基础上得到普朗克公式。为了使得到的辐射公式和实验曲线完全符合,必须抛弃辐射能量连续发射与吸收这一经典概念,代之以辐射能量量子化的概念,从此产生了量子论。1924—1926年建立了量子力学,继而产生了量子统计物理学。

与此同时,热力学理论也得到发展,超出平衡态热力学范围,进入了非平衡态热力学的领域,特别是自本世纪60年代以来在远离平衡态的热力学领域,产生了耗散结构、协同论、突变论等理论,从而扩大了热力学研究的范围,进入了天体演化和生命起源等领域。

回顾热学的发展过程,使我们清楚地认识到,自然科学大都是在生产发展的推动下发展起来的,而前者的发展反过来又会推动后者的进一步发展。不过,近代科学中的重大发现,特别是新的理论的出现,往往不能直接影响目前的社会生产。科学家的目光是

向着未来的。在科学技术高度发达的今天，热学占有非常重要的地位。热学中的非平衡态理论、量子统计物理学等已经广泛应用于气象学、海洋物理、低温物理、表面物理、等离子体物理、物质结构理论、材料科学、天体物理学、微电子学、生物工程、核能利用等尖端科学技术之中。

## § 2-0-3 温度和热量的测量

研究物质系统的热现象必定涉及系统的温度和系统在状态变化过程中与外界能量的交换——做功和传热。为此，我们应该了解温度和热量的测定方法。温度和热量的严格定义则将在以后章节中给出。

### (一) 温度和温标

我们已知温度是表示物体冷热程度的物理量。这是对温度的最通俗的、也是最早的宏观描述。我们也已确认，温度是构成物体的原子-分子无规运动剧烈程度的标志。这是最初始的，只相当于十八世纪罗蒙诺索夫那个时代的微观描述。

温度是描述热现象所特有的物理量。所以我们必须逐步深入地认识它，建立起温度的概念。我们将首先探索定量地测定温度的方法，制造温度计和建立经验温标。

在许多简单系统中，有一个表征系统性质的物理量，它随着系统的冷热程度而变化。例如，如图 2-0-1，在具均匀内径的玻璃管和一个中空玻璃球的连结体中装着汞。会因球部受热汞的体积增大而使管内的汞柱上升；也会因球部遇冷而使管内汞柱下降。又如，如图 2-0-2，泡体  $B$  中充满气体，泡体  $B$  和开管压强计  $G$  相连。当对泡体加热时，调节压强计右管高度可使泡体  $B$  中的气体体积保持不变，即压强计  $G$  左管中汞柱高保持在标记  $M$  处。此时，压强计右、左两管中汞柱高度差发生了变化，说明  $B$  中气体保持体积不变则受热压强增大，受冷压强减小。在前一例中汞的体积

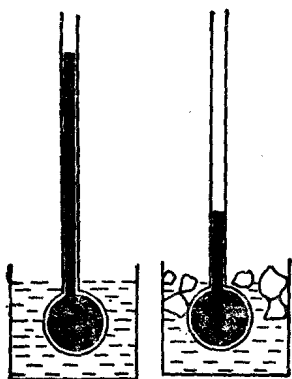


图 2-0-1

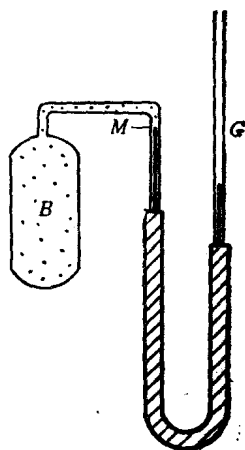


图 2-0-2

随冷热而变化,并反映在汞柱的高度上;在后一例中气体保持体积不变时,它的压强随冷热而变化(可用压强计测量出压强的变化)。还有其它一些例子,如导体的电阻随冷热程度而变化,炉内发光的颜色随炉温而变化等等。我们选一个系统作为测温物质系统,选定系统的一种随系统冷热程度变化的性质(可以测量的物理量)为测温属性,测量这个性质便可以比较物体的冷热程度。

只比较两个物体的冷热程度还不能使一个物体的冷热程度定量化,也就不能在任何时间和任何地点再显示出它的冷热程度来。要制定一个公认的标准,就如同对于质量测量需要一个千克标准器一样。最早使用的温度计是如图 2-0-1 所示的汞温度计,不过为避免汞的蒸发和外流而在高温下驱除管内空气后将上端封死。令这个装置处于一个标准大气压 ( $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ) 下纯水沸腾的环境中,在管侧刻线标记水的汽点(定义为纯水与水蒸气在蒸汽压为一个标准大气压下达到平衡时的温度<sup>①</sup>);再令它处于一个

① 物质的沸点是随外界压强的大小而变化的。加热液体时,只当蒸汽压等于外界压强时,液体沸腾。所以,汽点也就是在一个标准大气压水的沸点,详见第七章。表 2-0-1 中水的标准沸点就是汽点。冰点应是冰的标准熔点。