

物理力学

钱学森 编

讲义

(新世纪版)

上海交通大学出版社

物理力学讲义

钱学森 编

(新世纪版)

上海交通大学出版社

内 容 提 要

物理力学是一门新兴的学科,它从物质的微观结构出发,提供计算工程技术中所用介质和材料的热力学性质的方法.

本书第1章绪论阐明了物理力学的内容、观点和方法.第2、第3、第4章是基础原理.第5章到第9章分别处理气体、固体和液体的热力学性质,说明了从分子结构计算宏观性质的方法.第10章到第13章处理各种输运过程,像热传导、粘滞性、扩散、中子慢化及热辐射等.

本书的特点是给出了明确具体而切实可行的计算方法,使得工程介质和材料的热力学性质可以不完全依靠实验就能确定.

图书在版编目(CIP)数据

物理力学讲义:新世纪版/钱学森编. —上海:上海
交通大学出版社,2007
ISBN978-7-313-04876-9

I. 物... II. 钱... III. 力学—高等学校—教
学参考资料 IV. O3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 100878 号

物 理 力 学 讲 义

(新世纪版)

钱学森 编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

昆山市亭林印刷有限责任公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:27.75 插页:4 字数:524 千字

2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印数:1-3 050

ISBN978-7-313-04876-9/O·204 定价:58.00 元

版权所有 侵权必究

物理力学讲义

钱学森

科学出版社

物理力学讲义(1962年2月出版)

序

物理力学的目的是提供一个计算工程技术中所用介质和材料的力学性质的方法,其内容、观点和方法将在本书第 1 章的绪论中详细讨论.概括地说,它是从物质微观结构出发,利用近代物理学、物理化学、量子化学等学科的成就,来减少设计人员在确定介质和材料时所花的劳动量;所以这是一门为工程技术服务的学科.

写这本书自然为的是在教这门课的时候能有一份教材.编者在这里所用的讲解方法是:(1)在原理问题上,在基本概念上,尽量做到严谨明确;(2)在具体计算上,第一,如果问题果真能够用比较少的数学运算求得数值解,那么就采用最有效的分析方法,不避开所谓高等数学;第二,如果问题在本质上就比较复杂,真用严格的数学方法去求解,将会招致长而繁的数学运算,反而使读者失去理论的轮廓,这时就不走精确计算的那条路,而用大大简化了的模型来代替原来的问题,只保留问题最关键的部分,用这个办法阐明了问题中各个参数之间的关系后,再直接引入问题精确解的全部结果,读者就能够不必经过繁复的演算而领会精确解;第三,如果问题虽然在概念上是清楚的,但是直到目前还不能用量量的办法把它计算出来,那么就利用概念来明确问题中参数之间的关系,留下来的定量规律就直接用实验数据去确定.

当然物理力学还是一门处在萌芽状态的学科,上述第三类问题的存在就说明了它本身还不完整.其实还有第四类的问题,那就是连基本概念也还不十分清楚的问题,例如固体强度和塑性变形就是如此,直到现在也还没有较全面的微观理论,没有工程技术上可用的肯定结果,所以虽然固体强度和塑性变形在工程技术中是一个很重要的问题,在本书中也就未能加以讲述.从为工程技术服务的观点来看,这是一个缺点.

另外,正也是因为物理力学还不成熟,表现在本书中的是:一方面承继有关较老学科的地方多,即使有本学科独特的见解,但那又不一定完善;另一方面,像本书第 2、第 3、第 4 等章的基础原理,虽说是物理学科的一般理论,不是物理力学的本身,但编者在这几章中也还没有能体现物理力学的特殊需要,只作了一般的讲述,尤以第 3、第 4 两章,那简直

就是一本统计力学老书 Fowler 及 Guggenheim 的“Statistical Thermodynamics”中的第 1 和第 2 章的转述.

为了响应党的伟大号召,要我们尽快地占领各个空白的科学领域,以加速祖国的社会主义建设,所以尽管本书有这些缺点,但还是把它作为一份不成熟的教材而出版了;这是我们迈出的第一步,希望用它来帮助培养物理力学的青年工作队伍,从而再取得以后更大、更快的进展,因此编者相信,本书的缺点是能够弥补的,在实际用这本书来讲授时,它的缺点和错误也必然会被发现,那么经过修订后,下一版一定会比这一版完善.为了加速这一过程,编者恳请读者给以批评指正.

在编写这本讲义的过程中,曾得到崔季平、钱希真、蔡树棠、吴金生等同志的帮助,尤其是崔季平、钱希真两同志长期付出了辛勤的劳动;此外,科学出版社编辑部的工作同志对书稿作了认真的校辑;编者在此谨对他们表示衷心的感谢.

编 者

1960 年 8 月

目 录

序

第 1 章 绪论	1
1.1 什么是物理力学?	1
1.2 物质的结构	3
1.3 原子半径与分子结构	5
1.4 物质结构概念的应用	10
第 2 章 量子力学	12
2.1 薛定谔波动方程	12
2.2 振幅方程	14
2.3 波函数的物理意义	16
2.4 谐振子	18
2.5 点粒子的体系	22
2.6 氢原子	26
2.7 自由粒子	29
2.8 氢原子的内部动力学	30
2.9 类氢原子的能级	34
2.10 电子自旋	35
2.11 分子能级的分类	35
2.12 分子的波动方程	37
2.13 双原子分子	38
2.14 $U(r)$ 的性质	40
2.15 刚性线转子的简单势	40
2.16 莫尔斯势	43
2.17 多原子分子	47

第 3 章 统计力学基础	49
3.1 体系的系集	49
3.2 关于微观性质的准备知识	50
3.3 一个系集状态的一般性质	51
3.4 关于平均的规则	53
3.5 一个经典系集的描写	54
3.6 可及性(主要是经典部分)	56
3.7 关于相似体系的系集的可及态 对称群和反对称群	59
3.8 关于真实系集本征函数的对称类型	63
3.9 计算普通系集可及态的捷径	64
3.10 关于定域系配容的计算	65
第 4 章 恒定体系系集的一般原理	68
4.1 权重	68
4.2 几个简单体系的状态的权重	70
4.3 可及态(配容)的计算	74
4.4 两组定域线性振子的系集	75
4.5 最陡下降法的简单描述	79
4.6 平均值和统计温标	82
4.7 多自由度体系及退化体系	84
4.8 线性谐振子	85
4.9 二维及三维谐振子	86
4.10 没有轴自旋的刚性转子	87
4.11 有绕轴自旋的刚性转子(对称陀螺)	89
4.12 两组非定域系组成的系集	90
4.13 数学推导	93
4.14 结果之摘要	94
4.15 退化体系	95
4.16 经典统计力学	96
4.17 无结构质点在盒子中的运动	97
4.18 系集的外作用力	99
4.19 统计力学与热力学之间的关系	100

4.20	热力学定律	101
4.21	由统计力学推导热力学	106
4.22	热力学量与统计力学量之间的关系	110
4.23	经典统计的热力学公式	112
4.24	玻耳兹曼常数和气体常数	113
4.25	以热力学温度 T 表示的分布律	114
第5章	理想气体	116
5.1	平移运动量子化	116
5.2	麦克斯韦定律的经典推导	119
5.3	经典统计力学和经典力学	121
5.4	经典的和不激发的自由度	122
5.5	电子的自由度	122
5.6	理想气体的热容量	122
5.7	单原子分子	123
5.8	常温时的双原子气体	125
5.9	双原子分子转动的经典处理	126
5.10	核对称	127
5.11	单原子分子的修正公式	133
5.12	常温时双原子分子热力学函数的计算公式	134
5.13	振动自由度	137
5.14	高温下的双原子气体	138
5.15	非谐性和相互作用的校正	140
5.16	电子的贡献	143
5.17	刚体的转动自由度	145
5.18	多原子分子的振动自由度	146
5.19	多原子分子热力学函数的计算公式	147
5.20	振动贡献的近似计算	150
5.21	化学平衡常数	152
5.22	能量均分	152
第6章	固体的热学性质	155
6.1	连续弹性固体的简正振型	155

6.2	连续介质的配分函数	157
6.3	热辐射	158
6.4	无内部结构原子的晶体	159
6.5	电子及原子核对配分函数的贡献	162
6.6	晶体的平均性质	163
6.7	晶体的热力学函数 能量的修正	164
6.8	德拜近似下的热力学函数	167
6.9	德拜近似与实验的比较	170
6.10	由分子组成的晶体	172
6.11	离子或复杂晶格晶体	173
6.12	金属和绝缘体	177
6.13	电子气的统计	180
6.14	λ 很小和 λ 很大时的展开式	183
6.15	电子气的热力学函数	186
6.16	应用于金属时公式的修正	189
6.17	金属的电子热容量	190
第 7 章	固体的物态方程	193
7.1	物态方程	193
7.2	原子间的相互作用	195
7.3	作为形变的函数的特征频率	197
7.4	格吕乃孙物态方程	199
7.5	等体积过程	200
7.6	两种比热容的比率	204
7.7	绝热过程	205
7.8	等温过程	208
7.9	等压过程	212
7.10	振幅和熔点	218
7.11	泊松比和杨氏模量	221
第 8 章	非理想气体	223
8.1	非理想气体的配分函数	223
8.2	分子分布律	227

8.3	非理想气体的一级近似 短程力	229
8.4	非理想气体的热力学性质	233
8.5	几个简单的模型	235
8.6	经验及半经验物态方程	236
8.7	分子间的相互作用	238
8.8	色散能的形式	239
8.9	重叠能的形式	240
8.10	分子间相互作用的总表示式	241
8.11	由林纳德-琼斯势所求得的第二维里系数表示式	242
8.12	与实验的比较	248
8.13	分子的转动和内部势能	248
8.14	高级维里系数和高压下的状态方程	253
8.15	用维里系数表示的非理想气体的热力学函数	257
第9章	液体和稠密气体	261
9.1	气体或液体的自由能	263
9.2	液体的几个粗糙模型	264
9.3	液体和气体以及液体和固体的关系	266
9.4	对粗糙模型的热力学函数推导	267
9.5	熔点的基本热力学理论	269
9.6	沸点的基本热力学理论——特罗顿定律	271
9.7	分子间势能和对比状态方程	273
9.8	林纳德-琼斯和德文沙液体理论	277
9.9	状态方程和临界数据	282
9.10	在小体积和低温下的渐近展开——液体理论	284
9.11	液-汽平衡	287
9.12	热膨胀和压缩系数	288
9.13	定压比热容	293
9.14	正常液体的声速	295
9.15	气体在高温高压下的性质	296
9.16	液体和稠密气体的更精确的理论	299
第10章	输运过程的一般理论	301
10.1	离开热平衡的小偏差	301

10.2	昂塞格对易关系	302
10.3	不可逆热力学	307
10.4	固体中的热传导	309
10.5	各向同性物质中的普遍输运过程	310
10.6	流体中输运过程的唯象定律	314
10.7	索赖脱效应和杜福效应	316
10.8	具有化学反应的输运过程	319
10.9	不可逆热力学的其他应用	320
第 11 章	粘滞性, 扩散和热传导	321
11.1	气体中的碰撞数	321
11.2	平均自由程	327
11.3	碰撞后的速度持续	330
11.4	气体粘滞性的初等理论	332
11.5	弹性球分子气体的粘滞性	334
11.6	实际气体的粘滞性	336
11.7	气体中的热传导	340
11.8	二元混合物中的扩散	343
11.9	弛豫时间和体积粘度	347
11.10	稠密气体的输运过程	349
11.11	液体的粘滞系数	351
11.12	液体的热传导	354
11.13	固体的热传导	355
11.14	金属中的热传导	357
第 12 章	中子的扩散和减速	360
12.1	中子在纯吸收介质中的扩散	360
12.2	点源和平面源之间的关系	363
12.3	扩散理论近似	364
12.4	玻耳兹曼方程的精确解	369
12.5	精确解与扩散理论的比较	372
12.6	边界附近扩散理论的修正	375
12.7	中子扩散的一些简单例子	377

12.8	由弹性散射引起的中子减速	379
12.9	年龄方程的推导	383
12.10	平面单一能量源的中子减速	389
12.11	年龄方程的应用范围	390
12.12	年龄方程的应用	392
12.13	靠近边界的解	394
第 13 章	热辐射	396
13.1	辐射场	396
13.2	辐射和物质的相互作用	397
13.3	辐射热通量	399
13.4	边界条件	402
13.5	流体的发射率	402
13.6	质量吸收系统	404
13.7	薛定谔方程的含时微扰	405
13.8	爱因斯坦跃迁几率	408
13.9	爱因斯坦跃迁几率的计算	410
13.10	谐振子的选择定则和强度	413
13.11	面谐波函数的选择定则和强度	414
13.12	双原子分子的选择定则和强度	415
13.13	双原子分子的偶极矩和有效电荷	418
13.14	双原子气体的累积吸收的计算	418
13.15	双原子气体的质量吸收系数	421
13.16	双原子气体的发射率计算	423
附录	物理常数表	431
编后记		432

第1章 绪 论

1.1 什么是物理力学?

物理力学是一个新的力学分支,具体地提出这个名词还只不过几年;它的目的是想通过对物质的微观分析,把有关物质宏观性质的实验数据加以总结和整理,而找出其中的规律,然后再进一步利用这些规律去预见新物质材料的宏观性质,特别是工程技术里要用的物质和材料,像动力机械的工作介质,结构里的金属和非金属材料等等.因此,它是一门为工程技术服务的技术科学.

自然,开拓一门技术科学的新领域时,我们不能够只凭主观的兴趣,更重要的是要考虑工程技术里有没有这个需要.一直到现在,工程师们完全用经验方法来解决材料性质的问题.例如:蒸汽的热力性能是用实验方法来量的,钢材的强度和弹性也是用材料试验机来测定的.这是因为一方面工程师要解决的材料问题并不复杂,而实验方法用起来也很方便;另一方面,在物质的微观结构搞清楚以前,也实在没有能力来建立物质宏观性质的理论.可是现在工程师面临着高温、高压、超高温、超高压条件下的材料问题,材料在各种放射线作用下的性能也急待解决,如果完全靠实验方法,则需要庞大的设备和长久的时间来做实验,这就有些困难;另一方面,由于近代物理学和化学的发展,在原子核以外,物质的微观结构已经基本上没有问题了,也就有条件来建立物理力学这门技术科学,为工程师提供一个材料性质的计算方法.也就是说,物理力学的最终目的是:能够就工程师所提出的技术条件,“设计”出能完全满足这条件的介质和材料.

当然,一门新的学问也是有一定的继承性的,也必定有旧的已成长了的学科作为它的基础.与物理力学尤其有密切关系的是统计力学和分子运动论这一门统计物理;在化学里的量子化学和物理化学也是研究物理力学所必需的学科.这些学科都是从物质的原子和分子结构出发,先知道了原子和分子的性质,然后用统计的方法来计算物质中千千万万原子和分子聚在一起的性质.这正是物理力学由微观结构到宏观性质的道路,它们与物理力学的紧密关系是容易了解的.

值得注意的是:在早年的时候,物理学家和化学家之所以研究物质的宏观性质,与我们现在的目的是不相同的,在以前,物质的微观结构还没有肯定,原子和分

子论只不过是一个合理的、看来说得通的假定,再加以象马赫、奥斯特瓦尔德之流的唯心主义者们的反动攻击,就有些人对原子和分子也抱着将信将疑的态度;物理学家和化学家为了帮助明确微观结构的概念,就研究怎样从假设的微观结构来推论出已知的宏观性质.如果这与直接测量的结果能符合,那么假设的微观结构也就有更多的真实性.所以在那个时代,我们可以说物理学家和化学家是用物质的宏观性质来帮助他们确定物质的微观结构.可是现在的情形反过来了,我们已经清楚地知道了分子是由原子构成的,而原子是由一个中心非常密集的原子核和周围很稀疏的电子云所构成的.这一个肯定了的、具体的微观结构就成了我们的可靠的出发点,这是已知的,通过统计方法我们可以推论出宏观的性质.在这里,作为未知的是宏观性质.所以将从前的情形和现在的情形对比,微观结构和宏观性质的已知和未知关系是恰恰反转过来了.

虽然物理力学引用了许多物理学和化学的理论,但是它并不完全是统计物理与物理化学的分支,因为基础科学不能完全解决工程技术里所提出的问题.譬如说,在原则上我们可以用量子力学方法来算出氧原子的结构,由此推算氧分子的性质(它的大小,相互作用的力等等);但是这种计算是过于繁难了.通常我们还是靠实验测定一些容易测量的性质,例如通过氧气的粘度的测定来计算氧分子的大小,它们之间相互作用的力;用光谱测定它的振动能级,然后通过理论算出氧气的热力学函数,它的传热系数等新的、不必再由实验去测量的宏观性质.物理力学里面的问题往往还没有氧气的问题那样简单,更不能用简单推演的方法,而要灵活地结合实验方法.无疑的,物理力学的基础还包括一切可以利用的实验和经验数据,例如在物理学和化学手册中有关物质性质的测定数据和冶金学中从长远以来所累积的金属材料性质,以及工程材料和介质的性质等等.这就是说,研究物理力学的基本方法是理论与实验的相互结合.自然,作为一门技术科学,它必然介乎基础科学和工程技术之间,一面吸取基础科学里的规律和理论,另一面也要吸收工程技术里的经验和规律(如化工的经验规律,材料强度试验中总结出来的原则),把两方面的东西融会贯通才行.

研究物理力学的方法和研究其他技术科学的方法是一样的,在一般原则上,它和一切自然科学没有什么不同,不过特别要注意下面两点:

第一,它注重问题中机理的分析,从而认清问题的主要矛盾,也就是问题中最重要的因素,为问题制造出一个简单的模型,使模型里只包括机理里面最重要的因素.唯有这样,才能进行分析运算.自然,就是同一个东西,在不同情况下可以显示它本质的不同方面,因此同一东西在不同问题里可以有不同的模型.例如:研究气体粘滞性时把分子看作一个各向同性相互作用的质点;但是当我们研究气体热力

学函数时,又把气体分子看作具有内部结构而不光是质点了.在深入地分析问题的机理时,也常常会发现手头资料不够,那就必须做新的实验.因此研究物理力学必须理论和实验并重,不可偏重一面.

第二,注重运算的手段,也就是要求采用有效的数学工具.要使工程师们能利用物理力学的成果,不能仅仅满足于原则上的解决,一定还要有数据.计算必定要做得彻底,因而计算也就繁了,不采用高效率的运算方法,自然就很难完成这个工作.

物理力学中的问题可以分成两大类,一类是属于平衡现象的,像物态方程、比热容、化学平衡等;另一类是属于不平衡现象的,像物质的扩散、热传导、粘滞性、化学反应等等.对于第一类的平衡现象,我们用统计力学的方法去解决,而对于第二类的不平衡现象,统计力学的方法还不能完全解决问题,一般地需要用分子运动论的手法.统计力学方法的好处在于它的一般性,它分析了物质运动的共性,由它所得到的规律不为各个物质特性所影响,不论钢材或氧气,都得遵守普遍的热力学定律.只在把它用到热力学函数的具体计算上时才需要引入物质的特性.正因为它的一般性,比较复杂的不平衡现象就不能用统计力学的方法,而必须在一开始就引入现象的具体模型,才能进行运算.几乎每一类现象都得分别处理,这是研究不平衡现象中的困难.也就是由于这个原故,在本书中我们将先讨论平衡现象,然后再研究不平衡现象.

1.2 物质的结构

在一般条件下,物质有三种状态:气态、液态和固态.这三种状态有显明的分别,并且各有特性,使我们易于识别它们.气态的特征在于它内部分子组织的无秩序性.实际上,气态分子几乎是独立的,除了在碰撞瞬间外,分子的质心运动、分子的转动以及分子内部原子的振动都可以认为不受同时存在的其他分子的干扰.因而研究气态时,我们对单个分子的行为最感兴趣.固态具有另一种极端情形,分子排列得很紧密而有规则地成为晶体;自然,相互作用就成为最主要的.液态则介于气态和固态之间,不过在一般条件下更近于固态,宁可叫作无组织固体或熔融固体,而不是有组织气体或冷凝气体.极端情形的轮廓可以比较清楚地想象出来,也就容易构成简单的模型.液态具有像气体和晶体的双重性质,因此问题就复杂一些,并且需要更详细的分析.这一点在以后的讨论中会说明.

固体分子间的相互作用很强烈,致使形成了完全有规则的结构——晶格.例如碱金属:锂(Li),钠(Na),钾(K),铷(Rb)和铯(Cs)都有同样的体心立方格子,如图

1.1 所示. 原子占据了立方体的中心和各个角隅. 如果立方体的边长为 a , 最邻近的原子间距为

$$d = \left[\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \right]^{1/2} a = \frac{\sqrt{3}}{2} a.$$

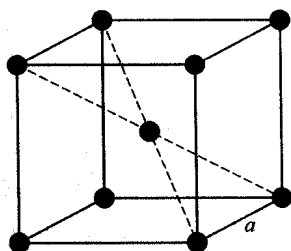


图 1.1

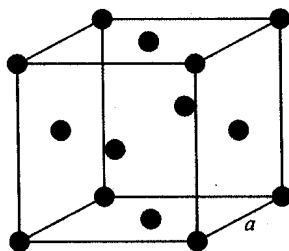


图 1.2

表 1.1 中列出了这些金属的 a 和 d 值, 单位为埃($\text{\AA}$). 一埃等于一亿分之一厘米(10^{-8} 厘米). 原子和分子世界里面的大小总是几个以至十几个埃, 所以如果说米是我们日常生活中的自然尺度, 那么埃就是原子和分子世界中的自然尺度了. 一价贵金属, 铜(Cu), 银(Ag)和金(Au)有如图 1.2 表示的面心立方格子, 除了立方体的各角, 原子还占据了各个面的中心. 若边长为 a , 则最近邻的间距为 $\frac{\sqrt{2}}{2} a$. 这些金属的 a 和 d 值列在表 1.2 中.

表 1.1 碱金属, 体心立方 a 、 d 值
(单位为 $\text{\AA}$)

	a	d
Li	3.46	3.00
Na	4.24	3.67
K	5.25	4.54
Rb	5.62	4.87
Cs	6.05	5.24

表 1.2 一价贵金属, 面心立方 a 、 d 值
(单位为 $\text{\AA}$)

	a	d
Cu	3.609	2.55
Ag	4.078	2.88
Au	4.070	2.87

体心立方和面心立方是具有最大对称性的晶格. 其他的金属如镁(Mg), 锌(Zn)等等有所谓的六方密堆积晶格, 如图 1.3 所示, 有晶格参数 a 和 c , a 是六角形底的边长, c 是高. 表 1.3 列出了这类结构的 a , c 及 d 的数值. 自然, 还有更复杂的晶格. 例如氯化钠晶体的结构可以分解成钠离子和氯离子的两组规则排列(图 1.4), 可以认为是钠离子的面心立方格子和氯离子的面心立方格子互相结合而成