

# 大学物理学 与 实验物理学

第一卷

力学与热学

全书主编

刘宏清 胡修愚 周武光

本卷主编

杨宣东

武汉大学出版社

# 大学物理学与实验物理学

第一卷 力学与热学

全书主编

刘宏清 胡修愚 周武光

本卷主编

杨宜东

武汉大学出版社

# 大学物理学与实验物理学

第一卷 力学与热学

全书主编

刘宏清 胡修愚 周武光

本卷主编

杨宣东

\*

武汉大学出版社出版发行

(430072 武昌 珞珈山)

安陆市印刷厂印刷

\*

850×1168 1/32 12.5印张 320千字

1992年10月第1版 1992年10月第1次印刷

印数：1—4000

ISBN 7-307-00890-4/O·77

定价：3.60元

(鄂)第9号

## 编者的话

本书是武汉大学物理系第二基础物理教研室的教师，根据多年的教学经验，参考教学大纲的要求，集体编写而成的。此书可作为综合性大学、师范院校、工科院校非物理专业的普通物理学教材。全书共分四卷，各卷自成体系，内容分别为：

第一卷 力学与热学

第二卷 电磁学

第三卷 光学与近代物理学

第四卷 实验物理学

在编写过程中，我们力求做到以下几点：首先，在高中物理和大学物理间跨一个较大的台阶，能引起读者对学习大学物理学的兴趣。其次：在系统编写经典物理的基础上，适当增加近代物理和现代物理的内容，使本书能反映时代性，其中，特别注意我国目前在物理学方面的发展和应⽤。同时，为了把大学物理的讲授和实验结合起来，特编辑实验物理卷，使本书能有较完善的体系。最后，为使一部分读者在学习普通物理学的基本内容时，还有兴趣深入学习，我们编辑了部分较难的内容，在书中用“\*”号表示，以供参考与选用。

担任全书各卷的编写人员有：

全书主编 刘宏清 胡修愚 周武光

第一卷主编 杨宣东

第二卷主编 赵有伦 张少平

第三卷主编 徐斌富 马莉

第四卷主编 尹帮勇 黄兴鼎 李守源

全卷各章的编者分别是：

- 杨宣东 (第一卷 第1—7章)  
胡修愚  
周武光 (第一卷 第8—10章)  
刘宏清 (第二卷 第1、2章)  
张少平 (第二卷 第4、5章)  
赵有伦 (第二卷 第3、6、7章)  
马莉 (第三卷 第1—3章)  
徐斌富 (第三卷 第4—8章)  
黄兴鼎 (第四卷 实验1—10、26、27)  
李守源 (第四卷 实验11—19、28)  
尹帮勇 (第四卷 实验20—25、29—34)

全书各卷特请有关教师审阅：石展之教授（第一卷），李琪副教授（第二卷），刘福庆教授（第三卷），周孝安副教授（第四卷）。本书出版过程中，得到武汉大学教务处、物理系和武汉大学出版社领导的关心和支持，我们在此表示衷心的感谢。

全书由于编写时间较紧，有不当之处，敬请读者批评指正。

编者

于武昌珞珈山

1992. 4.

## 前 言

本卷分为力学和热学两部分。在本卷的编写过程中，参照了现行的理、工科及师范院校的物理教学大纲的相关内容，希望能够适应于不同学科的需要。

长期以来，大专院校的普通物理教学受到了一个困扰，这就是学生在中学阶段有较好的物理基础，他们广泛地接触了物理的基本概念，并可以熟练地运用初等数学的方法解决某些物理问题（尤其是力学），因而，按原有的教材授课，学生听起来感到内容与中学重复，提不起兴趣，处理物理问题时，又习惯于用初等数学的方法，故难以解决复杂的问题。

鉴于上述情况，作者依据多年教学的体会，在教材编写中采取了数学上以矢量和微积分为基础、物理上适当沟通普通物理和理论物理的内容，以求提高学生的理论水平和分析解决物理问题的能力。愿本书的编写能为普通物理的教材和教学改革尽微薄之力。

本卷的一些章节冠以“\*”号，删去这些内容不会影响本册的系统性。请使用本书的教师根据教学的具体情况，在保持课程完整性和科学性的前提下，作进一步的增减。限于编者的水平，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

本卷的1—7章由杨宣东、胡修愚编写，8—10章由周武光编写，最后由杨宣东负责定稿。

本卷由石展之教授审阅。

诚挚感谢在本书的编写和出版过程中给以帮助和关心的同志们。

编者

1992. 4. 1

# 目 录

绪 论.....	1
<b>第一章 质点运动学.....</b>	<b>7</b>
1—1 质点 参照系 坐标系.....	7
1—2 时间和空间.....	8
1—3 速度矢量.....	9
1—4 加速度矢量 .....	15
*1—5 参照系的变换 .....	25
习题 .....	36
<b>第二章 质点动力学 .....</b>	<b>38</b>
2—1 牛顿运动定律 .....	38
2—2 牛顿运动定律的应用 .....	43
*2—3 非惯性参照系中的动力学基本原理 .....	49
习题 .....	55
<b>第三章 功与能 .....</b>	<b>57</b>
3—1 功 功率 动能定理 .....	58
3—2 保守力和势能 .....	63
3—3 质点的机械能 机械能守恒 .....	67
*3—4 平衡问题的研究 .....	71



3—5 功能原理 .....	75
习题 .....	77
<b>第四章 动量 动量矩 .....</b>	<b>81</b>
4—1 动量定理和动量守恒定律 .....	81
4—2 球的碰撞 .....	90
4—3 动量矩定理和动量矩守恒定律 .....	96
4—4 万有引力 .....	106
习题 .....	120
<b>第五章 刚体的定轴转动 .....</b>	<b>125</b>
5—1 质心和质心运动定律 .....	126
5—2 刚体的平动和转动 .....	130
5—3 刚体的定轴转动 .....	132
5—4 刚体绕定轴转动的动能 力矩的功 .....	146
习题 .....	152
<b>第六章 振动 .....</b>	<b>156</b>
6—1 简谐振动 .....	156
6—2 简谐振动的旋转矢量表示法 .....	162
6—3 单摆和复摆 .....	163
6—4 简谐振动的能量 .....	166
6—5 简谐振动的合成 .....	167
6—6 阻尼振动 受迫振动 共振 .....	175
习题 .....	180
<b>第七章 机械波 .....</b>	<b>184</b>
7—1 机械波的产生和传播 .....	184
7—2 波长 波的周期和频率 波速 .....	186

7—3	简谐波的波动方程 波的能量	188
7—4	惠更斯原理和波的衍射	196
7—5	波的干涉	201
7—6	多普勒效应	211
	习题	214
<b>第八章 气体分子运动论</b>		217
8—1	分子运动论的基本概念	217
8—2	气体的状态参量 理想气体状态方程	222
8—3	理想气体的压强	227
8—4	理想气体的温度公式	230
8—5	能量按自由度均分原理理想气体的内能	233
8—6	气体分子速率的统计分布律	238
8—7	气体分子的平均碰撞频率和平均自由程	247
8—8	气体内的迁移过程	251
8—9	真实气体 范德瓦耳斯方程	255
	习题	260
<b>第九章 热力学基础</b>		263
9—1	热力学过程 功 热量	263
9—2	热力学第一定律	268
9—3	热容量 焓 气体的内能	271
9—4	热力学第一定律对理想气体的应用	276
9—5	循环过程 卡诺循环	286
9—6	热力学第二定律	296
9—7	热力学第二定律的统计意义	301
9—8	卡诺定理	303
9—9	态函数熵 可逆过程与不可逆 过程的熵变	305

*9—10 热力学第二定律的熵	
表述 熵与热力学几率 .....	314
习题 .....	319
·第十章 固体 液体 相变 .....	323
10—1 固体 .....	323
10—2 液体的微观结构 液体的热性质 .....	336
10—3 液体的表面性质 .....	341
10—4 相变 .....	349
习题 .....	357
附 录 .....	360
附录一 一些常用物理常数 .....	360
附录二 国际单位制 (SI) 的基本量 .....	361
附录三 国际制 (SI) 词冠 .....	362
附录四 矢量 .....	263
习题答案 .....	379

# 绪 论

## 一、力学

力学是物理教学中的基础课程，是关于物体的机械运动和物体间的相互作用的学问。

根据所研究物体的性质，力学可分为质点力学、刚体力学和连续介质力学(包括弹性力学和流体力学)。根据所讨论的问题的性质又可分为运动学、静力学和动力学。本书不讨论连续介质力学和静力学。

牛顿三定律是力学的基础。在解决力学问题时，经常要用到动量、动量矩(角动量)和能量等概念及其守恒定律。所谓解决力学问题，最重要的是求运动方程；但是由于运动的相对性，必须指明所选用的参照系；我们不仅要研究物体在惯性参照系中的运动规律，而且要研究物体在非惯性参照系中的运动规律；不仅选用直角坐标，有时根据问题的不同性质，还选用极坐标、柱坐标或球坐标。

## 二、热学

本书的热学分为气体分子运动论、热力学基础和相变三部分。

气体分子运动论是从物质微观结构的观点出发，以气体为研究对象，运用统计的方法，研究大量气体分子热运动的规律。

热力学主要是从能量转化的观点来研究物质的热性质，它提示了能量从一种形式转换为另一种形式时遵从的宏观规律。热力

学是总结物质的宏观现象而得到的热学理论，它不涉及物质的微观结构和微观粒子的相互作用，因此是一种唯象的宏观理论。

相变这一章主要讨论固体和液体的微观结构，液体的热性质和表面性质，最后介绍固、液、气三种状态的相互转变。

### ·三、单位制 量纲方程

#### 1. 物理测量

物理实验的重要目的是为了描述所研究的现象，并找出各观测量之间的关系。这些描述或者关系可以是定性的，也可以是定量的。

定性关系：一个在真空中的自由落体的速度是随时间增长的；一个单摆的周期依赖于摆长和重力加速度。

定量关系：当一个物体在真空中自由下落时，其速度随时间成正比地增长，比例系数就是重力加速度，且等于  $9.8\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ；一个单摆的周期与摆长的平方根成正比，与重力加速度的平方根成反比，比例系数为  $2\pi$ 。

定性关系不能用来确定待测量的值，一个量的测量就是将它与另一个作为单位的量在同一空间中进行比较，看它是选用单位的多少倍。尽管单位的选择是任意的，但在确定不同量之间的关系时，它们的单位的选择应当遵循下述基本原理：

不同量之间的关系应当与单位的选用无关。

为了验证这个原理，一个用严密的方法构成的单位制，应满足下列条件：第一，立即判断出一个定律的表达式是否错误；第二，在一定的测量中，预见给定的问题中所考虑物理量之间的关系的形式（通过后面将要介绍的量纲方程来实现）。

#### 2. 有量纲量和无量纲量

我们先看二个例子：

一天作为一个量，它的测量值决定于所选用的时间单位（24小时，1440分钟或86400秒）。

一个圆的圆周与其直径之比( $\frac{l}{D} = \pi$ )作为一个量, 它的测量值与所选的长度单位无关。

由此, 我们得出定义: 测量值与所选单位有关的量称为有量纲量; 反之, 为无量纲量。

### 3. 基本单位和导出单位

物理量的种类很多, 如果每种物理量都选取一种单位, 不便于记忆和使用, 甚至造成混乱。人们根据物理量之间的相互联系, 选取了一些基本量, 其他的物理量都可以通过物理定律、定义与基本量联系起来。这些基本量的单位称为基本单位。在国际单位制(SI)中共有七个基本单位, 它们是: 长度单位——米, 质量单位——千克(公斤), 时间单位——秒, 电流单位——安培, 热力学温度单位——开尔文, 物质的量的单位——摩尔, 发光强度单位——坎德拉。它们的定义和代表符号见附录二。还有二个辅助单位: 平面角单位——弧度, 立体角单位——球面度。另外, 根据物理学定律或定义用基本单位来表达的物理量的单位称为导出单位。

此外, SI中还规定了一套单位词冠。所谓单位词冠是用来构成十进倍数单位和十进分数单位名称的构词, 词冠表示的因数见附录三。

### 4. 量纲和量纲公式

用基本量或其组合表达一个物理量的式子称为该物理量的量纲。例如, 四个常用基本量的量纲为: [长度] =  $L$ , [质量] =  $M$ , [时间] =  $T$ , [电流] =  $I$ 。等式左边的方括号表示求量纲。又如, 速度的量纲  $[v] = \frac{[\Delta x]}{[\Delta t]} = LT^{-1}$ , 加速度的量纲  $[a] = \frac{[\Delta v]}{[\Delta t]} = LT^{-2}$ , 力的量纲  $[F] = [m][a] = LMT^{-2}$ 。

例 0—1 求真空中介电常数  $\epsilon_0$  的量纲。

解 由真空中的库仑定律:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

且有  $[q] = IT^{-1}$

$$\text{因此 } [e_0] = \left[ \frac{4\pi Fr^2}{q_1 q_2} \right] = \frac{MLT^{-2}L^2}{I^2T^{-2}} = ML^3I^{-2}$$

注意：量纲与所采用的单位制无关。例如，速度的单位可以是  $m \cdot s^{-1}$ ，也可以是  $cm \cdot s^{-1}$ ，但是其量纲  $[v] = LT^{-1}$  不变。

根据用 SI 基本单位表示的式子，很容易求出其相应的量纲。例如磁通的单位为  $m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$ ，则  $[\Phi_m] = L^2MT^{-2}I^{-1}$ 。依此类推，对于绝大部分的物理量，我们有：

$$[\text{物理量}] = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta$$

这就是量纲公式。

对于长度，有  $L = L^1 M^0 T^0 I^0$

可求得  $\alpha = 1, \beta = \gamma = \delta = 0$ 。

对于磁通，显然有  $\alpha = 2, \beta = 1, \gamma = -2, \delta = -1$ 。

## 5. 量纲公式的应用

### a. 单位换算

物理量的单位随着基本量单位的改变而改变。根据基本单位的换算倍数，由量纲公式就可得到导出单位的换算倍数。

例 0—2 将力的单位由 SI 制换成 CGS 制

解 已知  $1m = 10^2cm$   $1kg = 10^3g$

且有  $[F] = LMT^{-2}$

所以  $1 \text{ 牛顿} = 1m \cdot kg \cdot s^{-2} = 1 \times 10^{-2}cm \times 10^3g \times s^{-2}$   
 $= 10^5cm \cdot g \cdot s^2 = 10^5 \text{ 达因}$

### b. 检验公式

量纲公式给我们提供了一种检验推导的公式或计算结果是否正确的方法，因为只有量纲公式相同的量才能相加、相减或相等。

例 0—3 一个质量为  $m$  的物体在重力场中下落了一个高度  $h$ ，若导出重力所作的功为

$$W = mgh^2 \quad (g \text{ 为重力加速度})$$

试讨论这一结论。

解 分别写出等式两边的量的量纲

$$[W] = ML^2T^{-2} \quad [mgh^2] = ML^3T^{-2}$$

显然  $[W] \neq [mgh^2]$

这个结论是不对的。

值得注意的是，上列量纲法则的逆向规律是不成立的；即“凡是量纲相等的公式一定正确”的说法是不成立的。如上例中功的表达式若为：

$$W = mg \frac{h^2}{h_0} \quad (h_0 \text{ 为物体在起始点的高度})$$

从量纲上看是没有问题的，但这也是一个错误的结论。

c. 用量纲法则探讨规律

量纲公式在某些情况下可以用来推导物理现象所遵循的规律。

例 0—4 一个质量为  $m$ ，摆长为  $l$  的单摆，设该地区的重力加速度为  $g$ ，起始摆幅为  $\alpha$ ，试推导其周期公式。

解 设周期仅与  $m$ 、 $l$ 、 $g$  和  $\alpha$  有关(可以通过实验检验)，因此有  $T = f(m, l, g, \alpha)$ ，这四个量中只有  $\alpha$  是无量纲量，因而取

$$f(m, l, g, \alpha) = m^a l^b g^c \varphi(\alpha)$$

式中  $a$ 、 $b$  和  $c$  是一些实数， $\varphi$  是某种函数。由量纲公式

$$T^1 = [m^a l^b g^c] = M^a L^b (L \cdot T^{-2})^c = M^a L^{b+c} T^{-2c}$$

公式两边对应的指数应该相等，于是有

$$a = 0$$

$$b + c = 0$$

$$-2c = 1$$

解上列方程得  $a = 0 \quad b = \frac{1}{2} \quad c = -\frac{1}{2}$

代入  $T$  的表达式

$$T = f(m, l, g, \alpha) = \sqrt{\frac{l}{g}} \cdot \varphi(\alpha)$$

无量纲量  $\varphi(\alpha)$  不能通过量纲公式求得，只能通过理论或实验



确定.

## 习 题

0—1 试根据安培定律  $dP = IdlB\sin\varphi$  求磁感应强度  $B$  的量纲, 式中  $dl$  为一小段导线的长度,  $dP$  为  $dl$  所受的力,  $\varphi$  为  $B$  与  $dl$  之间的夹角.

0—2 已知一无限长载流直导线的磁感应强度

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{a} \quad (a \text{ 为一距离})$$

求真空中的磁导率  $\mu_0$  的量纲.

0—3 普朗克提出物质辐射的能量是不连续的, 它只能是一个最小能量单位 ( $h\nu$ ) 的整数倍,  $\nu$  是辐射的频率, 求普朗克常数  $h$  的量纲.

0—4 1927 年海森堡提出: 一个电子的动量和位置不能同时精确地测定, 即一个电子的动量和位置的乘积永远不能准确到小于  $\frac{h}{2\pi}$  的程度 ( $h$  为普朗克常数), 这就是著名的海森堡测不准关系. 设动量的不确定范围为  $\Delta P$ , 位置的不确定范围为  $\Delta x$ , 则有

$$\Delta P \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$$

试用量纲公式来判断这个不等式的正确性.

0—5 If the velocity of light  $c$ , the constant of Gravitation  $G$  and Plank's constant  $h$  be chosen as fundamental units, find the dimensions of mass, length and time in the new system.