

物理学教程

夏学江 陈维蓉 张三慧 主编

# 力学与热学

上册

夏学江 陈维蓉 张三慧 编

清华大学出版社

清华大学教材

物理学教程

主编 夏学江 史弼星

力学与热学

(上册)

夏学江 陈惟蓉 张三慧 编

清华大学出版社

1984

## 内 容 简 介

《物理学教程》是清华大学新编的教材，分为《力学与热学》、《电磁学》、《波动与光学》、《量子物理》及《量子与统计力学基础》等五个分卷出版。

本书为《力学与热学》分卷的上册（力学部分），主要包括质点运动学、质点动力学、刚体力学基础和狭义相对论基础等内容。把某些基本内容在不带\*号的章节中用简明的方法讨论，又在带\*号章节中作较深入的讨论，并使不带\*号的章节能自行连贯以便供物理课学时较少的专业选用。

本书可作为理科和物理学时较多的工科各专业的大学物理教材，也可作为其他大学生、科技人员、中学物理教师的参考书和青年读者自学用书。

## 力 学 与 热 学

(上 册)

夏学江 陈惟蓉 张三慧 编



清华大学出版社出版

北京 清华园

清华大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售



开本：850×1168 1/32 印张：16 字数：428千字

1984年5月第一版 1984年5月第一次印刷

印数：1~30000

统一书号：15235·106 定价：1.95元

# 物理学教程

## 序 言

本书是参照我国通用的高等学校理科类与工科类物理课教学大纲,作为一套普通物理教材而编写的,希望它可供理、工科各专业使用或参考。本书的大部分内容曾在清华大学物理学时较多的几个专业以讲义的形式试用;现在经过修改、重写后分为《力学与热学》、《电磁学》、《波动与光学》、《量子物理》及《量子与统计力学基础》等五个分卷陆续出版。

本书编者的共同愿望是这套书能帮助读者较好地掌握物理学的基本内容。我们力图把物理学的基本定律、概念、方法准确地叙述清楚;力求帮助读者分清主次,克服学习难点;对于容易产生误解的地方也力图给予必要的说明。有些问题虽然在学生学习中容易产生疑问,但因属于细节问题,没有包括在教材中。本书对某些这样的问题也试图在小字段落、脚注、加\*号章节或附录中给以一些说明,供读者有余力时参考。

物理学是研究自然界最基本规律的一门科学,学习物理和世界观的建立有密切的联系,本书在内容的安排与阐述中力求贯彻辩证唯物主义思想,帮助读者获得对客观世界的正确认识。在人们对物理概念与规律的认识过程中,实验与理论的结合起着极重要的作用,本书在阐明原理概念时,特别是在说明近代物理概念的发展时,也希望能将这一情况反映出来,对于若干重要的实验以及它们与建立理论、发展概念的关系给予较详细的说明。

物理学日新月异的发展使它在现代科学技术领域中有着越来越

广泛和重要的应用。在着重阐明基本原理的基础上，我们也尽可能地 向读者介绍一些物理原理的应用和物理学新近发展的材料，使读者增加学习兴趣，开阔眼界和提高理解新技术及其应用的能力。

为了使本书有较大的适应性，我们把内容作了如下安排。凡是不带 \* 号的各章节属于最基本的内容，可独立于带 \* 号的章节学习。学时较少的各专业只需学习这些章节。理科专业或学时较多的工科专业则可用带 \* 号章节、小字段落、附录等作为补充内容。从全书看，五个分卷前三卷是基本教材，我们希望对于一般理科和工科各专业都能适用或可供参考；第四卷可作基本教材也可作选修课教材，视专业而定；最后一卷属于选修课教材。

在编写本书时，我们力图使它便于自学。我们的体会是：学生在学习中不仅应该获得知识与应用知识，还应该锻炼与提高学习的能力。因此在教学中必须注意培养与提高学生的学习能力，其中也包括培养与提高学生读书的能力。我们希望这套教材可供学生独立阅读，有助于培养学生的读书习惯与能力。另一方面，我们认为，如果教材便于自学，则明确了恰当的学习要求与份量后，就可以在课堂上详讲某些部分，略讲某些部分，再留一些部分给学生自学。这会有利于启发与指导学生，培养学生正确的学习习惯。此外，我们也希望这套书能供在职科技人员和自学的青年使用。

作习题是学习理论的重要环节。本书各分卷中都附有一定数量的复习思考题和习题。除基本的习题外，我们还选编了若干有一定难度的题以反映提高的要求（有的题是参考了国内外研究生入学试题选编的）。书末附有习题答案。

本书各分卷一律采用国际单位制。物理量的名称和符号也尽可能地符合国际标准化组织（ISO）提出的国际标准。

在本书的编写过程中得到了许多同志的热情帮助。刘绍唐教授审阅了全部内容，从编写的指导思想到具体内容都提出了宝贵的意见；清华大学物理系的许多位年长同志如孟昭英、徐璋本、何成

钧、徐亦庄、张礼等教授分别承担了本书某些分卷或某些部分的审阅工作；还有许多同志分别在各分卷中为编写习题、核对答案、制图、抄稿、出版等各方面作了大量的工作；在此对他们表示衷心的感谢。

在编写本书各分卷时，都参考了若干现有的教材，在许多地方得到启发与教益。这里难于一一指出，在此一并致谢。

由于编者能力有限，编写时间仓促，书中一定有不少缺点、错误，欢迎批评指正。

夏学江

史斌星

1982 年于清华大学

## 编者的话

本书是清华大学编写的《物理学教程》中《力学与热学》分卷的上册（力学部分），主要包括质点运动学、质点动力学、刚体力学基础和狭义相对论基础等内容。

力学是物理学中最基本的内容，也是最早得到发展的内容。学习这一部分内容可以使读者在感性知识最丰富的自然现象中学到基本规律，并受到深入掌握原理概念，进行科学思维，在具体问题的分析中学会应用原理概念的训练，因而不但能使读者学到知识而且在提高学习能力上也有十分重要的作用。同时，因为在大学中学习物理课时首先就要学力学，所以这部分内容的学习也应能帮助读者及早适应大学的学习，改进学习方法，以便逐步完成从中学到大学，从低年级到高年级在学习习惯上的转变。

在编写本书时，一方面考虑到学科的系统性，内容上包括了质点力学和刚体力学的各个基本概念和原理，阐述力求明确详细，便于自学；另一方面也注意到逐步使概念深化，力求有助于培养分析能力。对于读者在中学已学过的那些内容，着重于物理概念的引入与深化，并对某些容易产生误解的地方特别给予说明。希望读者不要满足于已经知道了结论，而只注意于模仿性的作题。在本书的举例中也注意对问题的物理内容作出分析，指明运用基本概念原理的根据，以期引导读者注重理解概念原理，提高分析能力。

在内容的讨论方法与安排上，本册中作了一种尝试，把某些基本内容在不带\*号的章节中用简明的方法讨论，又在带\*号章节中作较深入的讨论，并使不带\*号的章节能自行连贯，可以选出来供物理课学时较少的专业或需要快速学习的读者使用。在第四章功与能

和第五章刚体力学基础中都有这种尝试的例子。在带\*号的章节中，有的是独立的，例如第六章狭义相对论基础；也有的具有连贯性，例如若选学第四章中功、能的计算和参照系的选择这一节，应先学第三章中有关质心参照系的内容，若选学第五章中刚体的平面运动一节，应先学第三章中关于质心及角动量守恒定律的内容，等等。本册中，有关带\*号章节内容的思考题与习题也加了\*号。

为了开阔思路，提高处理综合问题的能力，本书在阐述机械运动和机械力的同时，也介绍了电磁力以及带电粒子在均匀磁场中的运动和在点电荷的电场中的散射。这部分内容可供有余力的读者自学。

为了使本书中力学内容贯穿一气，把关于国际单位制和量纲的讨论放在附录中，但需要指出，这段内容（特别是关于量纲），必须归入教学的基本要求之内。

学习本册内容的读者应先学过微积分和矢量代数。尚未学过矢量代数的读者可阅读附录 I。

本册前五章由陈惟蓉执笔，第六章由张三慧执笔；夏学江作了核订并编写了若干段落。

刘绍唐同志审阅了本书的各次修改稿，何成钧同志也审阅了本书的初稿，他们的宝贵意见对本书的定稿起了很重要的作用。邬淑婉同志和向义和同志选编了许多习题，核对了全部习题和答案，并校核了书后的常数表。王建纬同志绘制了本书的绝大部分插图。对他们的指导和大力支持在此一并表示衷心的感谢。

编者

1982年10月



# 目 录

<b>第一章 质点运动学</b> .....	1
§ 1.1 参照系 质点.....	1
1.1.1 参照系和坐标系.....	1
1.1.2 质点.....	3
1.1.3 质点的位置矢量 (矢径) .....	4
§ 1.2 速度.....	5
1.2.1 位移.....	5
1.2.2 速度.....	7
§ 1.3 加速度.....	9
1.3.1 加速度.....	9
1.3.2 直线运动.....	12
1.3.3 匀速率圆周运动 向心加速度.....	13
1.3.4 一般曲线运动 切向加速度和法向加速度.....	16
§ 1.4 用直角坐标系描述运动.....	21
1.4.1 直角坐标系中速度和加速度的解析式.....	22
1.4.2 匀加速直线运动公式的推导.....	27
1.4.3 抛射体运动.....	31
1.4.4 质点的空间运动.....	34
§ 1.5 相对运动.....	35
复习思考题一.....	40
习题一.....	42
<b>第二章 牛顿运动定律</b> .....	51
§ 2.1 牛顿运动定律.....	51

§ 2.2 几种常见的力	56
2.2.1 万有引力	57
*2.2.2 电磁力	64
2.2.3 弹性力和摩擦力	67
§ 2.3 牛顿定律的应用 (一)	74
2.3.1 应用牛顿定律的基本方法	75
2.3.2 牛顿定律对圆周运动的应用	85
§ 2.4 牛顿定律的应用 (二)	89
2.4.1 质点在常力作用下的运动	89
2.4.2 有流体阻力时的运动	92
*2.4.3 在弹簧的弹性力作用下的运动	100
*2.4.4 带电粒子在均匀磁场中的运动	102
§ 2.5 惯性参照系和非惯性参照系 惯性力	107
2.5.1 惯性参照系	107
2.5.2 非惯性系中的惯性力	110
2.5.3 重力	116
复习思考题二	122
习题二	126
<b>第三章 动量与角动量</b>	<b>136</b>
§ 3.1 动量定理	136
3.1.1 动量	136
3.1.2 动量定理	138
§ 3.2 动量守恒定律	146
3.2.1 质点系 内力和外力	146
3.2.2 质点系的动量与动量定理	147
3.2.3 动量守恒定律	150
3.2.4 火箭飞行原理	155
§ 3.3 质心与质心的运动	159

3.3.1 质心	159
3.3.2 质心运动方程	166
*3.3.3 质心参照系	170
*§ 3.4 角动量与角动量守恒定律	173
3.4.1 角动量	173
3.4.2 质点的角动量定理与角动量守恒定律	177
3.4.3 质点系的角动量定理与角动量守恒定律	187
复习思考题三	192
习题三	194
<b>第四章 功与能</b>	<b>202</b>
§ 4.1 功 动能	202
4.1.1 功	203
4.1.2 功率	211
4.1.3 动能 动能定理	214
§ 4.2 保守力 势能	221
4.2.1 保守力与非保守力	221
4.2.2 势能 势能曲线	224
4.2.3 由势能函数和势能曲线求保守力	236
§ 4.3 功能原理 能量转化与守恒定律	240
4.3.1 质点系的动能定理	241
*4.3.2 一对作用力、反作用力的功	242
*4.3.3 质点系的势能	245
4.3.4 功能原理	246
4.3.5 机械能守恒定律	252
4.3.6 普遍能量转化与守恒定律	263
*4.3.7 功、能的计算和参照系的选择	265
§ 4.4 碰撞	269
4.4.1 正碰（对心碰撞）	270

4.4.2 碰撞过程中动能的损失 (改变)	276
*4.4.3 斜碰	279
*4.4.4 在质心系中讨论碰撞问题	282
*§ 4.5 两体问题	289
复习思考题四	293
习题四	297
<b>第五章 刚体力学基础</b>	<b>310</b>
§ 5.1 刚体绕定轴转动的描述	310
5.1.1 刚体	310
5.1.2 平动和转动	311
5.1.3 转动时的角速度和角加速度	313
5.1.4 角速度矢量与角加速度矢量	316
5.1.5 定轴转动刚体中任一点的速度和加速度	318
§ 5.2 刚体的转动定律	321
5.2.1 力对转轴的力矩	321
5.2.2 刚体的定轴转动定律	323
5.2.3 转动惯量	329
*5.2.4 平行轴定理	333
§ 5.3 刚体对固定转轴的角动量定理和角动量守恒定律	338
5.3.1 刚体对固定转轴的角动量定理	338
5.3.2 对固定转轴的角动量守恒定律	340
§ 5.4 转动刚体的功能关系	343
5.4.1 刚体的转动动能	343
5.4.2 力矩的功	344
5.4.3 定轴转动刚体的动能定理与刚体的机械能	346
*§ 5.5 质点系的角动量定理在刚体定轴转动中的应用	352
*§ 5.6 刚体的平面运动	360
5.6.1 刚体平面运动的分解	360

5.6.2 刚体平面运动的运动方程	366
5.6.3 平面运动时刚体的能量	372
*§ 5.7 回转仪和进动	377
复习思考题五	384
习题五	387
<b>*第六章 狭义相对论基础</b>	<b>398</b>
§ 6.1 力学相对性原理和伽里略变换	399
§ 6.2 爱因斯坦相对性原理和光速不变	402
§ 6.3 洛仑兹变换	404
§ 6.4 时间膨胀	409
§ 6.5 长度缩短	414
§ 6.6 相对论速度变换	416
§ 6.7 相对论质量	421
§ 6.8 相对论动量变化率	424
§ 6.9 相对论能量	428
6.9.1 相对论动能	428
6.9.2 相对论能量	431
6.9.3 相对论动量和能量的关系	436
复习思考题六	437
习题六	439
<b>习题答案</b>	<b>443</b>
<b>附录 I 矢量的运算</b>	<b>455</b>
I.1 矢量的意义和表示	455
I.2 矢量的相加和相减	456
I.3 矢量分解 正交分解和解析表示式	459
I.4 两个矢量的标量积 (点积)	465
I.5 两个矢量的矢量积 (叉积)	469
<b>附录 II 单位制和量纲</b>	<b>472</b>

I .1	基本量和导出量 单位制.....	472
I .2	国际单位制.....	472
I .3	量纲.....	476
附录 III	均匀球体的万有引力.....	479
III .1	均匀薄球壳对壳外质点的万有引力.....	479
III .2	均匀球体对球外质点的万有引力.....	481
III .3	两个均匀球体之间的万有引力.....	482
附录 IV	用平面极坐标系描述运动.....	484
附录 V	质点在二次方反比律力场中的运动轨道.....	491
附录 VI	有关地球、月球、太阳的数据.....	496

# 第一章 质点运动学

力学中运动学的任务是描述机械运动，即说明物体的位置随时间变化的情况，而不涉及这种变化的原因。本章介绍质点运动学的基本概念；首先讨论两个基本的物理量——速度和加速度，着重阐明它们的矢量性和瞬时性；然后用它们讨论物体的几种最基本的机械运动形式。

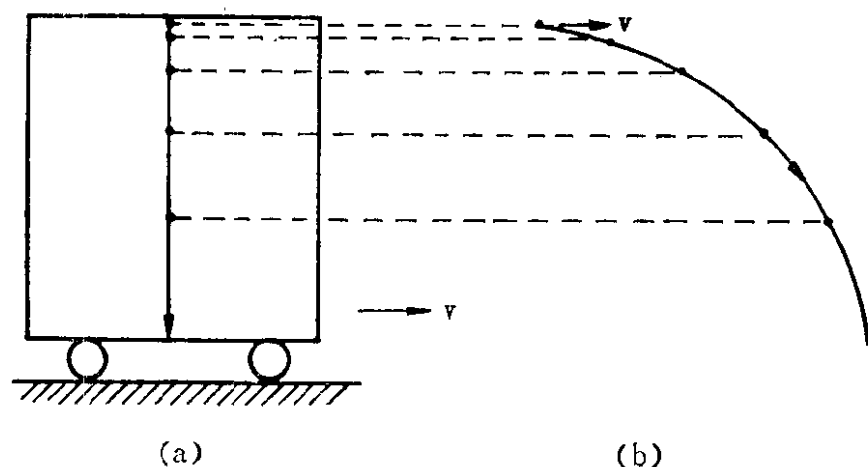
## § 1.1 参照系 质点

### 1.1.1 参照系和坐标系

我们生活在一个永恒地运动着的物质世界中，即使从简单的机械运动，即物体的位置变动来看，也是如此。行驶着的车辆、行云、流水都相对于地面有位置的变动，而看来“静止”的建筑物则随着地球自转和地球绕太阳的公转相对于太阳运动着；太阳和它的九大行星，其中包括地球，又在绕着银河系中心快速地旋转；而我们所在的银河系整体也还朝着麒麟座方向奔驰；……。这些事实表明：运动是绝对的，而“静止”只有相对的意义。

但是，要描述物体的运动时（这里及以后说到运动时，如无特别说明，都是指机械运动），我们却发现，对于同一个物体的运动，相对于不同的参考物体可以得出完全不同的结论。例如，在一辆水平匀速前进的火车中，车厢顶棚上有一滴水滴下。相对于车厢，这滴水是沿竖直线自由降落的，而相对于地面，水滴却沿一条抛物线运动，如图 1.1.1。因此，描述一个物体的运动时，必须指明是

相对于哪一个物体或物体组(相对保持静止的几个物体)而言的。这个被选作参考的物体或物体组叫做**参照系**。参照系不同,对物体的运动做出的描述就不同,这叫做**运动描述的相对性**。



(a) 相对于车厢,水滴竖直下降 (b) 相对于地面,水滴沿抛物线运动

图 1.1.1 运动描述的相对性

从描述运动的角度看,参照系可以任意选择,看问题的性质和计算的方便而定。例如,当我们描述太阳系的行星运动时,如果用太阳参照系(见下文),则行星作椭圆运动。但是,如果用地球参照系(见下文),它们将作复杂的曲线运动。因此,以太阳为参照系描述行星的运动比较简单方便。

为了定量地表示出一个物体在各时刻相对于参照系的位置,还需要选择一个坐标系,固定在做为参照系的物体或物体组上,所讨论的这个物体的位置就由它在坐标系中的坐标决定。因此,对于描述物体的位置变化来说,坐标系起着刻度标尺的作用。

常用的参照系有太阳—恒星参照系、地球—恒星参照系、地面参照系、质心参照系,等等。太阳—恒星参照系是以太阳和其它恒星为一组物体构成的参照系,把坐标原点放在太阳中心,坐标轴指向恒星就得到一个固定于这个参照系上的坐标系。这个参照系简称为太阳参照系,描述行星的运动时常用这一参照系。地球—恒星参



照系或简称地心参照系是由坐标原点在地球中心，坐标轴指向远处恒星的坐标系所确定的参照系，描述地球卫星的运动时常用这一参照系。地面参照系指地面和地上的静止物体，坐标系固定于地面上随地球一起运动。当我们考察地面附近的物体的运动时，一般选用地面参照系。以下各章节中，讨论地面上物体的运动时，如无特殊说明，都是以地面为参照系。关于质心参照系将在 \*§3.3.3 中介绍。

最常用的坐标系有直角坐标系、平面极坐标系、球坐标系，等等。

参照系确定之后，坐标系的类型、坐标原点位置、坐标轴方向都可以根据需要进行选择，但参照系一经确定，所描述的某个物体运动的快慢、轨道的形状等就是确定的，不会因坐标系的选择不同而有所不同。在图 1.1.1 的例子中，我们只指明了由于参照系不同而得到的水滴运动描述的不同，而并未提及坐标系的选择，道理就在于此。

### 1.1.2 质点

实际物体总有其大小和形状，而且一般说来，它们在运动中可以同时有旋转、变形等等，运动情况可以很复杂，要精确描述物体的运动并不容易。但是，如果物体的大小和形状在所研究的问题中不起作用或作用很小，就可以忽略物体的大小和形状，而把物体抽象为只有质量的几何点，这样的点叫质点。

从运动学的角度看，当物体的大小和它运动所经历的空间范围相比很小时，或在所讨论的问题中不必考虑物体的转动和变形时，就可以不计物体的大小而把它看作是质点。例如，地球一方面绕太阳公转，一方面绕地轴自转，严格讲地球上各点的运动都不相同。但如果研究的是整个地球相对于太阳的公转运动，则由于地球半径（约为六千四百公里）与地球公转的轨道半径（约为一亿五千万公