

基 础 物 理 教 程 之 一

# 力 学

程稼夫 编

中国科学技术大学出版社

基础物理教程之一

# 力 学

程稼夫 编

中国科学技术大学出版社

1996·合肥

## 内 容 提 要

本书是中国科学技术大学尹鸿钧教授主编的《基础物理教程》第一分册。

本书简洁、系统地阐述了力学的基本内容，较好地反映了中国科学技术大学在教学中精、新、活的独特风格。本书篇幅不大，内容精炼，物理概念准确清晰；本书作者着力于用现代物理观点去处理、表述原理和规律，整理、优化、充实课程内容，注意了力学与其它学科的联系；书中例题内容丰富，取材广泛，既有利于读者对基本规律的理解，也培养了分析问题和解决问题的能力。

此书可作为综合性大学、理工类院校以及师范院校的普通物理力学教材，也可供大专院校、中学物理教师及教学研究人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

力学/程稼夫 编. —合肥：中国科学技术大学出版社，

1996 年 3 月

ISBN 7-312-00766-X

I 力学

II 程稼夫 编

III ①基础物理 ②力学

IV O

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽合肥市金寨路 96 号，邮编：230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本：850×1168/32 印张：11 字数：268 千

1996 年 3 月第一版 1996 年 3 月第一次印刷

印数：1—5000 册

ISBN 7-312-00766-X/O · 174 定价：8.20 元

## 《基础物理教程》编委会名单

主编：尹鸿钧

编委：程福臻

朱栋培

程稼夫

张玉民

吴 强

郭光灿

陈宏芳

# 《基础物理教程》

之一：力学

之二：热学

之三：电磁学

之四：光学

之五：原子物理学

# 前 言

中国科学技术大学正在积极进行着“面向 21 世纪教学内容和课程体系改革”的研究和探索。在深入研讨大学物理教学的目的、任务和改革方案时,我们深切感到必须从培养人才的全面素质,人才的培养规格、模式、方法等方面来思考和定向。我校提出的基础“宽、厚、实”,专业“精、新、活”,注意培养“全面素质”和注重培养“创新精神”的教学原则,应该在我校大学物理教学中得到充分体现。

我们在制定新的教育教学计划、课程设置、课程体系的过程中,按学科群组织实施教学,将大学物理分为三种类型。1. 物理学科群,按 18 学分课程设计,编写了《普通物理》教材共 5 册,已由高等教育出版社陆续出版;2. 非物理类学科群按 12 学分课程设计,编写了《基础物理教程》共 5 册,由中国科学技术大学出版社陆续出版;3. 经营管理、人文科学、社会科学类学科群,按 8 学分课程设计,编写了《基础物理简明教程》,也将由中国科学技术大学出版社出版。我校 95 级本科已经开始全面使用这三套教材,以期进一步取得教学实践的经验,深化我校大学物理的教学改革。

本套《基础物理教程》是非物理类学科群使用的教材,共 5 册:力学、热学、电磁学、光学、原子物理学。在编写过程中我们遵循以下两条基本原则:

1. 使学生对物理学的内容和方法,物理图象和概念,工作语言,历史、现状和前沿状况有一个整体的理解和掌握,力求将当今前沿科学和技术问题中的物理内核在基础层次上反映到教学内容中来。

2. 对学生进行物理素质这一科学素质重要方面的培养,培养学生科学思维,逐步掌握正确的科学研究方法,具有提出和解决问题、探索自然规律的能力,并具有创新精神。

由于我们水平、能力、教学实践范围的限制,错误和不妥之处在所难免,欢迎使用本教材的老师和同学批评指正。

中国科学技术大学 副校长 尹鸿钧  
教 授

1996 年 1 月于合肥

# 目 次

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>第一章 时间、空间 .....</b> | <b>( 1 )</b> |
| 1.1 物体的运动 .....        | ( 1 )        |
| 1.2 时间及其量度 .....       | ( 2 )        |
| 1.2.1 时间 .....         | ( 2 )        |
| 1.2.2 时间的量度 .....      | ( 2 )        |
| 1.2.3 短的时间 .....       | ( 3 )        |
| 1.2.4 长的时间 .....       | ( 4 )        |
| 1.2.5 时间单位和标准 .....    | ( 5 )        |
| 1.3 空间及其量度: .....      | ( 6 )        |
| 1.3.1 大的长度测量 .....     | ( 6 )        |
| 1.3.2 小的长度测量 .....     | ( 8 )        |
| 1.3.3 长度单位 .....       | ( 9 )        |
| 1.4 时间、空间测量中的局限 .....  | ( 9 )        |
| <b>第二章 质点运动学 .....</b> | <b>(11)</b>  |
| 2.1 参照系 .....          | (11)         |
| 2.2 运动的描述 .....        | (12)         |
| 2.2.1 表格法 .....        | (12)         |
| 2.2.2 曲线法 .....        | (13)         |
| 2.2.3 解析法 .....        | (13)         |
| 2.3 位矢、速度和加速度 .....    | (14)         |
| 2.3.1 运动方程、轨迹 .....    | (14)         |
| 2.3.2 位移和速度 .....      | (15)         |
| 2.3.3 加速度 .....        | (19)         |
| 2.3.4 抛体运动 .....       | (21)         |



|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 2.3.5 圆周运动、内禀坐标 .....       | (24) |
| 2.4 平面极坐标中的速度、加速度表示 .....   | (28) |
| 2.4.1 平面极坐标 .....           | (28) |
| 2.4.2 位矢、速度、加速度的极坐标表示 ..... | (29) |
| 2.5 运动的相对性和伽里略变换 .....      | (32) |
| 2.5.1 相对运动 .....            | (32) |
| 2.5.2 伽里略变换 .....           | (34) |
| <b>第三章 牛顿质点动力学</b> .....    | (36) |
| 3.1 牛顿三定律 .....             | (36) |
| 3.2 动力学方程的含义 .....          | (38) |
| 3.2.1 动力学方程的含义 .....        | (38) |
| 3.2.2 方程的数值解 .....          | (40) |
| 3.2.3 数值分析方法的地位 .....       | (45) |
| 3.3 牛顿方程的对称性 .....          | (46) |
| 3.3.1 对称性 .....             | (46) |
| 3.3.2 牛顿方程的平移对称性 .....      | (47) |
| 3.3.3 牛顿方程的转动对称性 .....      | (48) |
| 3.3.4 矢量及其转动特性 .....        | (50) |
| 3.4 力及其特性 .....             | (51) |
| 3.4.1 质量的量度 .....           | (51) |
| 3.4.2 力及其特性 .....           | (52) |
| 3.4.3 几种具体的力 .....          | (53) |
| 3.5 单位制和量纲 .....            | (59) |
| 3.6 牛顿定律的应用 .....           | (61) |
| 3.7 加速参照系、惯性力 .....         | (65) |
| 3.7.1 平动加速参照系 .....         | (65) |
| 3.7.2 转动参照系 .....           | (70) |
| 3.7.3 例题 .....              | (73) |
| <b>第四章 万有引力</b> .....       | (82) |

|            |                     |             |
|------------|---------------------|-------------|
| 4.1        | 开普勒三定律 .....        | (82)        |
| 4.2        | 牛顿引力定律 .....        | (83)        |
| 4.3        | 开文迪许引力实验 .....      | (88)        |
| 4.4        | 引力的几何性 .....        | (89)        |
| 4.5        | 引力是什么 .....         | (91)        |
| 4.5.1      | 引力与电力的相似性 .....     | (92)        |
| 4.5.2      | 引力在天体领域中的主导作用 ..... | (93)        |
| 4.5.3      | 白矮星、中子星和黑洞 .....    | (93)        |
| 4.5.4      | 爱因斯坦引力观念 .....      | (95)        |
| <b>第五章</b> | <b>能量 .....</b>     | <b>(97)</b> |
| 5.1        | 能量守恒 .....          | (97)        |
| 5.1.1      | 能量守恒定律 .....        | (97)        |
| 5.1.2      | 重力势能 .....          | (98)        |
| 5.1.3      | 动能 .....            | (100)       |
| 5.1.4      | 弹性势能和其它能量形式 .....   | (101)       |
| 5.2        | 动能定理 .....          | (102)       |
| 5.2.1      | 动能定理与能量守恒 .....     | (102)       |
| 5.2.2      | 功 .....             | (105)       |
| 5.2.3      | 动能定理的实际使用 .....     | (106)       |
| 5.2.4      | 非惯性系中的动能定理 .....    | (107)       |
| 5.2.5      | 功与功率的单位 .....       | (107)       |
| 5.3        | 万有引力的功 .....        | (107)       |
| 5.4        | 弹性力的功 .....         | (109)       |
| 5.5        | 多质点引力系统的能量 .....    | (110)       |
| 5.5.1      | 质点系的动能定理 .....      | (110)       |
| 5.5.2      | 柯尼希定理 .....         | (111)       |
| 5.5.3      | 多质点引力系统的能量 .....    | (112)       |
| 5.6        | 保守力 .....           | (115)       |
| 5.6.1      | 保守力 .....           | (115)       |

|            |                        |       |
|------------|------------------------|-------|
| 5.6.2      | 势能和势能曲线 .....          | (116) |
| 5.7        | 非保守力、功能原理 .....        | (120) |
| 5.7.1      | 非保守力存在吗? .....         | (120) |
| 5.7.2      | 功能原理 .....             | (121) |
| 5.8        | 势与场 .....              | (122) |
| 5.8.1      | 场强度与势函数 .....          | (122) |
| 5.8.2      | 势与场关系式 .....           | (123) |
| <b>第六章</b> | <b>动量</b> .....        | (125) |
| 6.1        | 牛顿第三定律与动量守恒 .....      | (125) |
| 6.2        | 质点系动力学方程 .....         | (126) |
| 6.2.1      | 动力学方程 .....            | (126) |
| 6.2.2      | 质心运动定理 .....           | (127) |
| 6.2.3      | 质心位置及其求法 .....         | (128) |
| 6.3        | 再论动量守恒 .....           | (131) |
| 6.4        | 动量定理、冲量 .....          | (135) |
| 6.5        | 动量与能量 .....            | (137) |
| 6.6        | 变质量物体的运动 .....         | (139) |
| 6.7        | 碰撞 .....               | (142) |
| 6.7.1      | 正碰撞 .....              | (143) |
| 6.7.2      | 质心系中的正碰撞 .....         | (146) |
| 6.7.3      | 弹性斜碰撞 .....            | (147) |
| <b>第七章</b> | <b>振动</b> .....        | (151) |
| 7.1        | 简谐振动 .....             | (151) |
| 7.1.1      | 谐振子 .....              | (151) |
| 7.1.2      | 简谐运动和圆周运动——旋转矢量法 ..... | (154) |
| 7.1.3      | 谐振子能量 .....            | (157) |
| 7.2        | 无阻尼受迫振子 .....          | (157) |
| 7.3        | 有阻尼受迫振子 .....          | (160) |
| 7.3.1      | 稳态响应 .....             | (160) |

|            |                      |       |
|------------|----------------------|-------|
| 7.3.2      | $\rho^2-\omega$ 曲线宽度 | (161) |
| 7.3.3      | 品质因数                 | (162) |
| 7.3.4      | 共振现象实例               | (163) |
| 7.4        | 能量损耗、贮能和 Q 值         | (166) |
| 7.5        | 阻尼自由振动               | (168) |
| 7.6        | 简谐振动的迭加              | (172) |
| 7.6.1      | 同方向、同频率简谐振动的合成       | (172) |
| 7.6.2      | 同方向、不同频率简谐振动的合成、拍    | (173) |
| 7.6.3      | 互相垂直的简谐振动的合成         | (174) |
| <b>第八章</b> | <b>波动</b>            | (176) |
| 8.1        | 基本概念                 | (176) |
| 8.1.1      | 机械波的形成               | (176) |
| 8.1.2      | 描述波动的几个物理量           | (177) |
| 8.1.3      | 波的几何描述               | (177) |
| 8.2        | 平面简谐波的运动方程           | (178) |
| 8.3        | 波动方程                 | (181) |
| 8.3.1      | 声波的波动方程              | (181) |
| 8.3.2      | 波动方程的几个性质            | (185) |
| 8.3.3      | 声速                   | (186) |
| 8.4        | 波动的能量和能流             | (187) |
| 8.4.1      | 波动的能量                | (187) |
| 8.4.2      | 能量密度和能流密度            | (189) |
| 8.5        | 两列波的迭加               | (189) |
| 8.5.1      | 波在空间上的干涉(干涉)         | (189) |
| 8.5.2      | 波在时间上的干涉(拍)          | (191) |
| 8.5.3      | 群速度                  | (191) |
| 8.6        | 驻波和波模                | (194) |
| 8.6.1      | 从波的反射看驻波、波模          | (194) |
| 8.6.2      | 约束波                  | (196) |

|            |                          |       |
|------------|--------------------------|-------|
| 8.6.3      | 有限自由度的波模 .....           | (200) |
| 8.7        | 多普勒效应 .....              | (202) |
| 8.8        | 非线性响应 .....              | (204) |
| 8.8.1      | 整流、谐波 .....              | (205) |
| 8.8.2      | 调制、和频、差频 .....           | (205) |
| <b>第九章</b> | <b>角动量</b> .....         | (207) |
| 9.1        | 二维平面转动 .....             | (207) |
| 9.1.1      | 力矩 .....                 | (207) |
| 9.1.2      | 角动量和角动量定理 .....          | (209) |
| 9.2        | 三维空间转动 .....             | (210) |
| 9.2.1      | 力矩是一个三维矢量 .....          | (210) |
| 9.2.2      | 转动方程的矢量表示 .....          | (212) |
| 9.3        | 质点系角动量定理和角动量守恒定律 .....   | (214) |
| 9.3.1      | 惯性系中的角动量定理、角动量守恒定律 ..... | (214) |
| 9.3.2      | 质心系中的角动量定理 .....         | (215) |
| 9.4        | 有心力 .....                | (216) |
| 9.4.1      | 有心力场中的基本方程 .....         | (216) |
| 9.4.2      | 有效势能 .....               | (218) |
| 9.5        | 偏心率矢量 .....              | (223) |
| 9.5.1      | 偏心率矢量守恒 .....            | (223) |
| 9.5.2      | 引力场中的轨道方程 .....          | (225) |
| 9.5.3      | 能量与半长轴的关系 .....          | (227) |
| 9.5.4      | 开普勒第三定律 .....            | (227) |
| 9.5.5      | 例题 .....                 | (228) |
| <b>第十章</b> | <b>刚体</b> .....          | (232) |
| 10.1       | 概述 .....                 | (232) |
| 10.1.1     | 刚体的自由度 .....             | (232) |
| 10.1.2     | 刚体运动的类型 .....            | (233) |
| 10.2       | 刚体的定轴转动 .....            | (235) |

|             |               |              |
|-------------|---------------|--------------|
| 10.2.1      | 定轴转动运动学       | (235)        |
| 10.2.2      | 定轴转动动力学       | (237)        |
| 10.3        | 刚体的平面平行运动     | (245)        |
| 10.3.1      | 动力学方程         | (245)        |
| 10.3.2      | 动能定理          | (245)        |
| 10.3.3      | 滚动            | (246)        |
| 10.3.4      | 例题            | (249)        |
| 10.4        | 回转仪           | (255)        |
| 10.4.1      | 回转仪的进动        | (255)        |
| 10.4.2      | 回转仪的章动        | (258)        |
| 10.4.3      | 角动量和角速度的关系    | (259)        |
| <b>第十一章</b> | <b>物体的弹性</b>  | <b>(262)</b> |
| 11.1        | 基本原理          | (263)        |
| 11.1.1      | 杨氏模量          | (263)        |
| 11.1.2      | 泊松比           | (264)        |
| 11.1.3      | 迭加原理          | (264)        |
| 11.2        | 容变和剪切         | (265)        |
| 11.2.1      | 容变            | (265)        |
| 11.2.2      | 剪切            | (267)        |
| 11.3        | 圆棒的扭转、切变波     | (270)        |
| 11.3.1      | 圆棒的扭转         | (270)        |
| 11.3.2      | 切变波及其波速       | (272)        |
| 11.4        | 梁的挠曲          | (275)        |
| 11.5        | 压杆的弯折         | (280)        |
| <b>第十二章</b> | <b>流体力学基础</b> | <b>(283)</b> |
| 12.1        | 干水的流动         | (283)        |
| 12.1.1      | 流体静力学         | (283)        |
| 12.1.2      | 动力学方程         | (286)        |
| 12.1.3      | 动力学方程的几种常用形式  | (289)        |

|             |                |              |
|-------------|----------------|--------------|
| 12.1.4      | 定常流动——伯努利定理    | (293)        |
| 12.1.5      | 应用实例           | (295)        |
| 12.2        | 粘滞流体的流动        | (297)        |
| 12.2.1      | 流体的粘滞性         | (297)        |
| 12.2.2      | 粘滞系数的测定        | (299)        |
| 12.2.3      | 粘滞性不可压缩的流体方程   | (300)        |
| 12.2.4      | 雷诺数、马赫数        | (301)        |
| 12.2.5      | 实例             | (304)        |
| <b>第十三章</b> | <b>狭义相对论基础</b> | <b>(307)</b> |
| 13.1        | 相对性原理          | (308)        |
| 13.1.1      | 对伽里略相对性原理的挑战   | (308)        |
| 13.1.2      | 洛仑茨变换的意外成功     | (309)        |
| 13.1.3      | 狭义相对论的基本原理     | (310)        |
| 13.2        | 迈克尔逊-莫雷实验      | (311)        |
| 13.3        | 相对论时空观         | (313)        |
| 13.3.1      | 时间膨胀           | (314)        |
| 13.3.2      | 洛仑茨收缩          | (316)        |
| 13.3.3      | 同时的相对性         | (317)        |
| 13.4        | 速度合成律          | (319)        |
| 13.5        | 质量的相对论效应       | (323)        |
| 13.5.1      | 相对论性质量         | (323)        |
| 13.5.2      | 相对论力学          | (325)        |
| 13.5.3      | 质能公式           | (326)        |
| 13.6        | 空间、时间关系        | (329)        |
| 13.6.1      | 四维矢量           | (329)        |
| 13.6.2      | 时空间隔           | (332)        |
| 13.6.3      | 类空间隔、类时间隔      | (333)        |
| 13.6.4      | 四维动量矢量         | (334)        |

# 第一章 时间、空间

## 1.1 物体的运动

物理学是一门实验科学,它依赖于定量的观察。唯有通过定量的观察,以及采用抽象、假设、物理推理等手段,人们才能得到定量的关系,而这些关系构成了整个物理学的核心内容。

人们常常把约 400 年前伽里略所做的工作看成是物理学的开端,因为在此之前对物体运动的研究是哲学家们的事情,许多论据是由亚里斯多德以及其他希腊哲学家头脑中想象出来的,并被人们普遍认为是“正确”的,是“已经证明”了的。伽里略采取怀疑态度,关于物体的运动做了著名的斜面实验。他让一个小球沿一斜面滚下,对其运动进行观察,并进行了定量测量:在多长时间段内小球跑了多远一段距离。

当时,测量距离的方法早已被人们掌握。但是对于时间的测量还没有精确的方法,特别是对短时间的测量。伽里略在做第一次运动实验时是用他的脉搏来数出等间隔的时间的。当小球沿斜面滚下时,一边伽里略数着自己的脉搏:“一、二、三、……”,一边由他的助手标上小球所在的位置 1, 2, 3, …。实验结果,如果小球从释放时刻算起,离记号的距离正比于 1, 4, 9, …。这就是今天我们知道的结论:距离与时间的平方成正比: $s \propto t^2$ 。

下面就伽里略斜面实验中所接触到的时间和距离分别加以进一步的讨论。



## 1.2 时间及其量度

### 1.2.1 时 间

时间可以说是人们最为熟悉、最为平凡的一个概念了,但是人们对时间的种种定义仍难以令人满意。有人说,时间很可能是我们不能定义的事物之一。但这样的事实并不妨碍物理学中对时间的使用。我们干脆说时间是表示事物之间的一种顺序与间隔。

对于物理学,重要的不是去追究其“准确”的定义,而是应当了解时间是怎样量度的,即如何去测量它。

### 1.2.2 时间的量度

测量时间的一种方法是利用具有周期性发生的过程或现象作为测量时间的一种钟。太阳的升没、月亮的盈亏、四季的循环,以及人体的脉搏、分子的振动、单摆的摆动等等都可以作为测时工具。

以太阳升没的一个昼夜作为例子,昼夜是周而复始地重复出现的,然而昼夜是否真正周期性重复呢? 每一天是否都同样长? 就平均而言,一天的日子确实大致一样长。有什么办法可以检验每一天的长短相同与否? 一个办法是把它同某个别的周期性现象作比较。我们可以用一个沙漏来作这种比较,每当最后一粒沙掉下之后,立即把沙漏倒转过来,这样就人为地制造了一个周期性事件。如果我们计算每天太阳升起到下一天太阳升起倒转沙漏的次数,大概会发现每一天的倒转次数并不完全相同。就此,我们会怀疑这两个事件的某一件或两者的周期性。如果我们改一下,计算从一个中午到下一个中午沙漏的倒转次数(中午指太阳在其最高点的时刻),这次发现两者是相等的。若把沙漏倒转一次称为经历了一个“小时”,那么现在就较有把握认为“小时”和“昼夜”具有一种有规则的周期