

高等院校非物理专业推荐教材

DAXUEWULIXUE

DAXUEWULIXUE

DAXUEWULIXUE

大学物理学

张小兵 杨宝胜 郭 儒 编著

(上册)

B



南开大学出版社

高等院校非物理专业推荐教材

大学物理学

(上册)

张小兵 杨宝胜 郭 儒 编著

南开大学出版社
天津

内容简介

《大学物理学》分上、下册。上册内容包括质点力学和质点系统的力学规律、刚体的运动规律、狭义相对论、振动和波、热平衡态的统计分布规律和热力学三大定律。

本书内容精练,注意增加现代物理学的内容及应用,力求经典内容现代化,并适当减少了习题的难度。

本书可作为高等院校理、工科非物理专业大学物理教材,也可供师范、专科院校的教师和学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上册 / 张小兵,杨宝胜,郭儒编著.
—天津:南开大学出版社,2004.4
ISBN 7-310-02062-6

I.大... II.①张...②杨...③郭... III.物理学
—高等学校—教材 IV.04.

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第002193号

出版发行 南开大学出版社

地址:天津市南开区卫津路94号 邮编 300071

营销部电话 (022)23508339 23500755

营销部传真 (022)23508542

邮购部电话 (022)23502200

出版人 肖占鹏

承印 南开大学印刷厂印刷

经销 全国各地新华书店

版次 2004年4月第1版

印次 2004年4月第1次印刷

开本 880mm×1230mm 1/32

印张 10

字数 401千字

印数 1—3000

定价 15.00元

前 言

物理学是研究物质结构及其运动形态的科学,物理学探索的是物质世界最普遍、最基本的规律。它所研究的范围包括小到电子、质子(10^{-15}m),大到类星体(10^{26}m);从 150 亿年前宇宙大爆炸直到今日的一切对象。物理学作为自然科学的基础,从 17 世纪以来,一直是创建边缘、交叉科学,推动相关学科发展的领头学科,特别是 20 世纪初建立的近代物理,几乎深入到各个领域内,并发挥着巨大和潜在的作用。

物理学与数学从一开始就有着密不可分的联系。由于物理学中涉及许多变量,为了研究各个变量之间的关系,就需要使用微积分学这一数学工具。事实上,牛顿正是基于研究物质运动规律的需要才创建微积分学的。此后的 300 多年间,物理学和数学之间一直是互相交融、彼此促进的。例如,自 20 世纪中叶以来,物理学家通过使用群论、微分几何等数学工具去研究物质世界中普遍存在的对称性规律,已取得了丰硕的成果;反过来,来自于这些物理问题的一些新的数学结构又为数学学科的发展注入了新的活力。物理学与化学之间也是互相交融、并肩前进的,例如,基于量子物理学的基本规律去深入研究化学现象的量子化学已成为化学学科的一个主流方向。物理学与生命科学的关系,由量子力学创始人薛定谔的一句名言“生命赖以负熵为生”而蕴含其中。生物分子学的发展,双螺旋结构 DNA 的确定,更显示出物理学在生命科学中的重要地位。申农引入信息熵,把信息科学和物理学有机地联系起来。物理学的这种特殊地位和作用,使它成为科学素质教育的必修课。

另一方面,物理学是理论与实践高度结合的科学。在物理学创建后的 300 多年中,物理学促成了三次技术大革命,从根本上改变了人类的生产力和生产方式。如 18 世纪中由于力学和热学的发展开创了蒸汽机动力时代,彻底结束了以人力、兽力为主的耕作时代;19 世纪 70 年代

电磁学理论开创了以电气化为主线的通信时代；20世纪中由于近代物理的发展，人们利用上了原子能，并步入了高科技信息时代。物理学的概念和精密的实验方法应用于各个领域，使许多人类梦想的东西成为当今现实，毫无疑问，在21世纪的科学技术进步中物理学仍扮演着不可替代的角色。

物理学的发展不仅改变了人类的物质生产，同时也改变着人类生存条件，影响着人类的精神生活和思维理念。物理学是一面标志着人类文明进步的大旗。

科教兴国、教育为本是我们的永久国策。如何培养面向21世纪人才是教育工作的首要任务。这个任务又主要体现在教材内容的建设和教学方法的改革这两个方面。作为自然科学基础的物理学，从17世纪以来一直是自然科学的领头学科。它与其他学科一起形成了交融共进的局。如何在非物理专业讲授大学物理学，并体现和促进这种关系的进一步发展，一直是我们的一个愿望。10年前我们曾为非物理专业学生编写过一套物理学教材，通过几年的实践使我们深感到它需要优化和更新，这正是编写这套教材的目的和动力。在编写中有幸拜读了近年来国内许多高校编写的优秀教材，它们为我们的编写工作提供了有益的借鉴和参考。这些著作中主要有：

赵凯华、罗蔚茵的《新概念物理教程》(高等教育出版社)

张三慧主编的《大学物理学》(第二版)(清华大学出版社)

杨福家的《原子物理学》(第三版)(高等教育出版社)

全书共分五个部分，包括力学和狭义相对论、热学、电磁学、波动光学和量子物理。具体编写分工如下：

张小兵编写力学和狭义相对论，杨宝胜编写振动和波，郭儒编写热学和量子物理，金庆华编写电磁学和波动光学，周宗文负责收集、挑选习题并作了相关的解答。由于编写人员水平所限，不妥和错误之处敬请指正。

编者

2003年于南开园

目 录

第一部分 力 学

| | |
|--------------------------|------|
| 第一章 力学引论 | (1) |
| §1 力学的研究对象 | (1) |
| §2 力学中的数学方法 | (3) |
| §3 力学中的基本物理量 | (5) |
| 3.1 基本量与导出量 单位 量纲 | (5) |
| 3.2 牛顿力学的适用范围 | (6) |
| 习 题 | (8) |
| 第二章 运动学 | (10) |
| §1 质点运动的矢量描述 | (10) |
| 1.1 位移和元位移 | (10) |
| 1.2 速度 | (12) |
| 1.3 加速度 | (13) |
| §2 质点运动的坐标描述(I) | (16) |
| 2.1 直角坐标系 | (16) |
| 2.2 质点运动的直角坐标描述 | (16) |
| §3 质点运动的坐标描述(II) | (21) |
| 3.1 平面极坐标系 | (21) |
| 3.2 圆周运动、角速度和角加速度 | (25) |
| 3.3 自然坐标系 | (29) |
| §4 运动描述的相对性 | (30) |

| | |
|-------------------|------|
| 4.1 绝对时空观..... | (31) |
| 4.2 运动描述的相对性..... | (31) |
| 4.3 伽利略变换..... | (33) |
| 习 题 | (35) |

第三章 动力学 (38)

§1 牛顿动力学..... (38)

1.1 惯性参考系..... (38)

1.2 质量 力..... (40)

1.3 牛顿定律解题示例..... (42)

1.4 牛顿动力学:从质点到质点系统 (46)

§2 动量、动量定理及动量守恒 (54)

2.1 动量的引入..... (55)

2.2 动量定理..... (57)

2.3 动量守恒定律..... (62)

§3 动能、势能及机械能守恒 (64)

3.1 动能、功和动能定理 (64)

3.2 保守力和势能..... (69)

3.3 功能原理和机械能守恒定律..... (73)

3.4 能量守恒定律..... (78)

§4 角动量、角动量定理及角动量守恒 (80)

4.1 角动量的引入..... (80)

4.2 角动量定理..... (84)

4.3 角动量守恒定律..... (86)

§5 质心参考系..... (89)

§6 非惯性参考系简介..... (95)

6.1 力学相对性原理..... (95)

6.2 非惯性参考系和惯性力..... (95)

6.3 转动参考系、惯性离心力和科里奥利力 (97)

习 题..... (100)

| | |
|--------------------------|-------|
| 第四章 刚体的运动规律 | (105) |
| § 1 刚体的平动和定轴转动 | (105) |
| 1.1 刚体平动的运动描述 | (105) |
| 1.2 刚体定轴转动的运动描述 | (106) |
| § 2 刚体对定轴的转动惯量 | (108) |
| 2.1 转动惯量的引入 | (108) |
| 2.2 转动惯量的计算 | (110) |
| § 3 刚体定轴转动定律 | (113) |
| § 4 刚体绕定轴转动的动能定理 | (117) |
| 4.1 力矩的功 | (117) |
| 4.2 刚体绕定轴转动的动能定理 | (118) |
| § 5 刚体的平面平行运动 | (121) |
| 5.1 刚体的一般运动 | (121) |
| 5.2 刚体的平面平行运动 | (123) |
| 习 题 | (127) |
| | |
| 第五章 狭义相对论 | (131) |
| § 1 狭义相对论的基本假设 | (131) |
| 1.1 伽利略变换的失效 | (131) |
| 1.2 狭义相对论的基本假设 | (133) |
| § 2 相对论运动学 | (134) |
| 2.1 绝对时空观的失效 | (134) |
| 2.2 洛伦兹变换 | (137) |
| 2.3 狭义相对论的时空观 | (141) |
| § 3 相对论动力学 | (145) |
| 3.1 动量和相对论质量 | (145) |
| 3.2 相对论动能 | (147) |
| 3.3 相对论能量 质能关系 | (148) |
| 习 题 | (152) |
| | |
| 第六章 振动和波 | (153) |
| § 1 简谐振动 | (153) |

| | | |
|-------|---|-------|
| 1.1 | 周期 T 、频率 ν 、圆频率 ω | (154) |
| 1.2 | 相位和初相位 | (155) |
| 1.3 | 振幅 A 和初相位 φ 的计算 | (155) |
| 1.4 | 速度和加速度 | (156) |
| 1.5 | 能量 | (156) |
| 1.6 | 相图 | (157) |
| 1.7 | 简谐振动的旋转矢量(或振幅矢量)表示法 | (158) |
| § 2 | 阻尼振动及其 Q 值 | (161) |
| 2.1 | 阻尼弹簧振子 | (162) |
| * 2.2 | 阻尼振动系统的 Q 值 | (164) |
| § 3 | 受迫振动 共振 | (165) |
| 3.1 | 受迫弹簧振子 | (165) |
| 3.2 | 共振 | (167) |
| § 4 | 简谐振动的合成 | (170) |
| 4.1 | 同方向、同频率两个简谐振动的合成 | (170) |
| 4.2 | 同方向、不同频率两个简谐振动的合成 | (172) |
| 4.3 | 两个互相垂直的同频率简谐振动的合成 | (174) |
| 4.4 | 两个互相垂直的不同频率简谐振动的合成 李萨如图形 | (177) |
| 4.5 | 振动的分解 | (179) |
| § 5 | 从单摆到混沌 | (181) |
| 5.1 | 无阻尼($\beta=0$), 无周期性外力($f=0$) | (181) |
| 5.2 | 有阻尼, 无周期性外力 | (182) |
| 5.3 | 有阻尼, 有周期性外力 | (183) |
| § 6 | 波的基本概念 | (184) |
| 6.1 | 机械波在弹性介质中的形成 | (184) |
| 6.2 | 纵波和横波 平面波和球面波 | (185) |
| 6.3 | 波速 | (187) |
| 6.4 | 波的周期、频率和波长 | (188) |
| § 7 | 平面简谐波 | (190) |
| 7.1 | 平面简谐波的表达式(波函数) | (190) |

| | | |
|------|-------------------|-------|
| 7.2 | 波动方程 | (195) |
| 7.3 | 波的能量 | (196) |
| 7.4 | 能量密度和能流密度 | (198) |
| § 8 | 惠更斯原理、波的叠加原理、波的干涉 | (200) |
| 8.1 | 惠更斯原理 | (200) |
| 8.2 | 波的叠加原理 | (201) |
| 8.3 | 波的干涉 | (202) |
| § 9 | 驻波 | (205) |
| 9.1 | 驻波 | (205) |
| 9.2 | 半波损失 | (208) |
| 9.3 | 简正模式 | (209) |
| § 10 | 多普勒效应 | (211) |
| 10.1 | 声波的多普勒效应 | (212) |
| 10.2 | 激波(冲击波) | (215) |
| 10.3 | 电磁波的多普勒效应 | (215) |
| § 11 | 波的群速 | (216) |
| 11.1 | 相速和群速 | (216) |
| 11.2 | 孤波和孤子 | (218) |
| 习 题 | | (219) |

第二部分 热 学

| | | |
|-----|-------------------|-------|
| 第一章 | 热学基本概念、热力学第零定律和温度 | (226) |
| § 1 | 热学的一些基本概念 | (226) |
| 1.1 | 热力学系统 | (226) |
| 1.2 | 平衡态 | (227) |
| 1.3 | 平衡态的状态参量和态函数 | (227) |
| § 2 | 热力学第零定律 温度 | (228) |
| 2.1 | 热平衡 | (228) |
| 2.2 | 热力学第零定律 温度 | (228) |
| § 3 | 理想气体状态方程和理想气体温标 | (229) |
| 习 题 | | (233) |

| | |
|--------------------------------|-------|
| 第二章 热平衡态的统计分布规律简介 | (235) |
| § 1 理想气体的压强公式 | (235) |
| 1.1 理想气体的微观模型 | (235) |
| 1.2 理想气体压强公式的推导 | (236) |
| § 2 温度的微观意义 | (238) |
| § 3 能均分定理 | (239) |
| 3.1 自由度 | (239) |
| 3.2 能量按自由度均分定理 | (241) |
| § 4 玻耳兹曼分布律 | (242) |
| 4.1 统计规律与分布函数的概念 | (242) |
| 4.2 玻耳兹曼分子密度分布 | (245) |
| § 5 麦克斯韦速度分布律 | (247) |
| 5.1 麦克斯韦速度分布律 | (247) |
| 5.2 麦克斯韦速率分布律 | (248) |
| 5.3 麦克斯韦速度分量分布律 | (250) |
| § 6 气体的输运过程 | (254) |
| 6.1 分子平均自由程和碰撞频率 | (254) |
| 6.2 输运过程的宏观规律 | (257) |
| 6.3 输运过程的微观描述 | (258) |
| 习 题 | (261) |

| | |
|-----------------------------|-------|
| 第三章 热力学第一定律 内能 | (264) |
| § 1 热力学第一定律 内能 | (264) |
| 1.1 能量守恒和能量转化定律 | (264) |
| 1.2 热力学准静态过程 | (265) |
| 1.3 热力学第一定律的数学表述 | (265) |
| § 2 热力学第一定律对理想气体的应用 | (266) |
| 2.1 理想气体的内能 | (266) |
| 2.2 理想气体热容量 | (269) |
| 2.3 等温过程 | (270) |
| 2.4 绝热过程 | (271) |

| | |
|----------------------------------|-------|
| 2.5 多方过程 | (275) |
| § 3 循环过程和卡诺循环 | (277) |
| 3.1 循环过程 | (277) |
| 3.2 理想气体的卡诺循环及其效率 | (279) |
| 3.3 内燃机的理想循环 | (281) |
| 习 题 | (282) |
| 第四章 热力学第二定律和热力学第三定律 | (286) |
| § 1 热力学第二定律的文字表述 | (286) |
| § 2 卡诺定理及其应用 | (288) |
| 2.1 卡诺定理 | (288) |
| 2.2 卡诺定理的应用 | (290) |
| § 3 热力学第二定律数学表述 熵增原理 | (293) |
| 3.1 态函数熵 | (293) |
| 3.2 熵变的计算 | (296) |
| 3.3 熵增原理 | (300) |
| § 4 熵的微观意义 | (301) |
| § 5 热力学第三定律 | (305) |
| 5.1 能斯特定理 | (305) |
| 5.2 热力学第三定律 | (305) |
| 习 题 | (306) |
| 附 录 | (307) |

第一部分 力 学

第一章 力学引论

物理学作为一门独立学科,其兴起是始于牛顿力学的。1687年,牛顿的《自然哲学的数学原理》的发表标志着力学的创建。在此后的三百多年中,物理学得到了长足的发展,大大超越了牛顿力学的水平。但是,牛顿时代已开始的对物质运动及相互作用的探求,至今仍然是物理学的主旋律和基本问题;牛顿力学中使用的概念和方法,仍然在物理学中被广泛使用或借鉴。

本章的目的是使读者建立起对牛顿力学的整体印象,以便有针对性地学习下面各章的内容。

§ 1 力学的研究对象

日常生活中,我们经常体验到物体在运动。宏观物体相对于其他物体位置的变动,或物体各部分之间相对位置的变动,称为机械运动。力学就是研究物体机械运动的学科。其基础理论主要包括以下几个方面:

(1) 研究如何描述物体的运动,称为运动学;

(2) 研究物体为什么运动, 探讨物体运动和物体间相互作用的联系及规律, 称为动力学。鉴于静止是运动的一种特殊形态, 研究物体在相互作用下的平衡问题(称为静力学)也可视为动力学中的一个课题;

(3) 描述一个物体的运动, 首先要指出它是相对于哪个物体而言的。选定作为参考的物体或物体群, 称之为参考系。相对于不同的参考系, 同一物体的运动描述和动力学规律是否相同? 这一问题, 是力学中的一个重要课题;

(4) 运动总是在一定空间里进行的, 运动过程经历了一段时间, 对时间和空间的认识(称为时空观)也是力学的一个课题。

物体具有一定大小和形状, 物体各部分的运动往往又各不相同, 因此物体的机械运动一般来说是复杂的。让我们从最简单的情况入手: 在物体的形状、大小可以忽略的情况下, 将它处理为一个具有一定质量的几何点, 称之为质点。这样, 在一定条件下, 若实际物体可用质点这一物理模型来代表, 则实际物体的运动可由质点运动学加以描述(详见第二章), 其动力学规律可由质点动力学给出(详见第三章 § 1)。

需要指出的是, 质点是通过抽象而形成的物理模型, 能否把物体处理为质点必须依问题的性质而定。例如考虑地球绕太阳的公转时, 由于地球半径(约 6.37×10^6 米)相对于地球和太阳的距离(约 1.49×10^{11} 米)可看作是很小的量, 此时把地球处理为质点是较好的近似。但在考虑地球上的物体的运动情况或地球的自转问题时, 就不能再把地球当作质点处理了。

当所研究的物体不能用质点模型处理时, 原则上我们总可以把物体细分成很多部分, 并使得每一部分都可能视为质点。这样, 整个物体被考虑为由许多质点组成的一个质点系统。鉴于质点系统的一般性, 在质点力学的基础上进一步研究质点系统的运动规律是力学的中心内容(详见第三章)。

特别地, 若物体中各部分(可视为若干质点)之间的相对位置保持不变, 则物体可用刚体这一物理模型描写。刚体是在物体的形状和大小不可忽略, 但其形状和大小的改变可以忽略的情况下, 对足够坚硬的物体抽象而形成的另一个物理模型。将质点系统运动规律应用于刚体的

具体讨论详见第四章。

此外,对于必须考虑物体的形状改变的情况,要引进弹性体这一物理模型,相关的讨论详见第六章。

§ 2 力学中的数学方法

解决物理问题离不开数学方法。历史上,牛顿正是为了能确切地表述运动定律才创建了微积分学。解决问题的数学方法不单是一个技术问题或工具问题,其中往往还包含着重要的物理意义,它对于理解物理概念和确定物理规律是必不可少的。下面我们以质点位置的描述为例来说明一个物理问题是如何数学化的。

参考系是一个重要的物理概念,谈到质点运动时必须指明它是相对于哪个参考系而言的。当选定参考系上一个指定的几何点时,质点在某一时刻的位置就已确定,参考系上这一指定的点称为参考原点。现在我们考虑这个位置应如何用数学方法描述。用通常意义的“数”并不能描述质点位置,原因是通常所用的“数”只有大小,而不反映方向。例如,选择图 1-1 中 O 点为参考原点,设质点在某一时刻位于 P 处。显然,仅靠线段的长度这一通常意义的数并不能惟一地确定 P 点的位置。

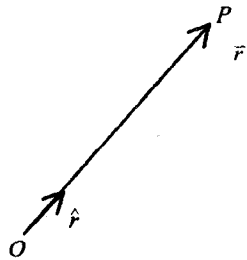


图 1-1

数学上,把既有大小又有方向的量称为矢量。利用矢量这一工具,图 1-1 中质点的位置可以表示为从参考原点到质点所在位置 P 点的有向线段。它被称为位置矢量,简称位矢,记为 \vec{r} (这里用箭头 \rightarrow 代表矢量)。

如图 1-1 所示,位置矢量(位矢)的大小即线段的长度,记为 $r = |\vec{r}|$,这里符号 $||$ 代表对矢量求其大小(而不是指其绝对值);位矢的方向由 P 点相对于 O 点的空间方位给出。若将位矢改写为

$$\vec{r} = r\hat{r} \quad (1.1)$$

其中 $\hat{r} = \vec{r}/r$ 是一个大小为 1 的矢量,称之为单位矢量,它集中反映了质点的方向。

质点在运动时,它的位矢是随时间改变的。为反映质点的运动,我们考虑以标量 t 为变量的矢量函数

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \quad (1.2)$$

(1.2)式称为质点的运动方程。

对于以后学习中遇到的这种既有大小、又有方向的物理量,我们都要使用矢量这一工具加以描述。值得注意的是,矢量的基本运算和通常标量的运算法则完全不同。例如,两个矢量的加(减)法应由平行四边形(三角形)法则给出,两个矢量的乘(除)法更为复杂,常用的矢量乘法有标量积(或称点乘)、矢量积(或称叉乘)等。关于矢量运算的具体内容可参阅高等数学教材。

为了描述质点的位置,我们还可以参考原点 O 点为坐标原点,在参考系上建立一个坐标系。例如,在图 1-2 所示的直角坐标系中, P 点就可以用一组标量 (x, y, z) 来表示, (x, y, z) 称为位矢的坐标。一般来说,如果一个物理量可用一组标量来描述,该物理量即为矢量,相应的这样一组标量称为其坐标。相应地,在直角坐标系中,质点的运动方程(1.2)式可以写为

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t).$$

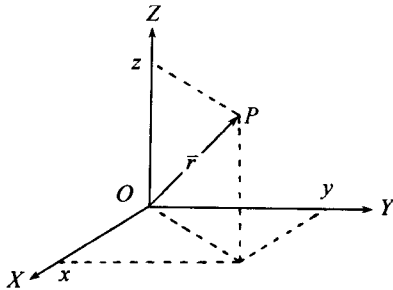


图 1-2

上式称为(1.2)式的直角坐标形式。

为使大家对将要用到的数学方法重视,表 1-1 给出后续两章中主要物理概念和对应的数学内容,尽早掌握这些数学工具,对于整个大学物理学的学习都是必要的。

表 1-1

| 章 名 | 物 理 概 念 | 数 学 内 容 |
|-------|-----------|---------------------------|
| 二、运动学 | 位移、速度、加速度 | 矢量加(减)法、矢量微积分、坐标系及矢量的坐标表示 |
| | 角速度 | 矢量的叉乘(矢量积) |
| | 相对运动 | 坐标变换 |
| 三、动力学 | 力 | 矢量加(减)法 |
| | 力矩、角动量 | 矢量的叉乘(矢量积) |
| | 功 | 矢量的点乘(标量积)、线积分 |

§ 3 力学中的基本物理量

3.1 基本量与导出量 单位 量纲

物理规律是在观察和实验的基础上,对物理量之间的关系给出的表述。因此,我们可以选定某些物理量作为基本物理量,其他物理量则可利用物理规律导出,称为导出物理量。基本物理量最终必须落实在测量上,测量给出的公认的标准就可以作为该物理量的单位。只要基本物理量的单位给定,导出量的单位随之可以给出,一组基本量的单位就决定了一个单位制。

在力学中,通常将长度、时间和质量选取为基本物理量。力学中常用的单位制是国际单位制。在国际单位制中,长度、时间和质量分别以米(记为 m)、秒(记为 s)和千克(记为 kg)为单位。这样,力学中其他物理量的单位就可以确定。例如,力的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,称为牛顿(记为 N);能量或功的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,称为焦耳(记为 J);频率的单