



面向 21 世纪 课程 教材  
Textbook Series for 21st Century

# 基础物理学

下 册

梁绍荣 管 靖 主编



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材  
Textbook Series for 21st Century

# 基础物理学

下 册

梁绍荣 管 靖 主编

田晓岑 梁绍荣 管 靖 胡镜寰 编



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

## 内 容 提 要

本书是教育部“高等师范教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材.本书在体系和结构上都有较大的改革.全书以物理学导论为开端,适当精简了力学、加强了热学,并把波动光学提前,保证电磁学,增强了近代物理学的内容.在重视加强基础的同时,注意教学内容现代化和理论联系实际;删去了与中学物理重复的内容,提高了力学的起点,增加了一些物理学在现代高新技术领域的应用;突出了物理学研究问题的方法和教导学生如何思考问题,在重要问题后面安排“总结与评述”回顾物理学的发展.本书阐述清晰、科学严谨、语言简练、深入浅出,尽量用简单的数学知识,并有较宽的适用面.

全书共五篇,分上、下两册.上册为力学、波动光学、热学,下册为电磁学和量子物理学基础.

本书可作为高等师范院校理科非物理专业 100~140 学时的基础物理学课程的教材,也可供有关高校非物理专业选用或中学教师进修、自学使用.

### 图书在版编目 (C I P) 数据

基础物理学. 下册 / 梁绍荣, 管靖主编. — 北京:  
高等教育出版社, 2002

ISBN 7-04-010717-1

I. 基... II. ①梁... ②管... III. 物理学 - 高等学校 - 教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 037441 号

基础物理学 下册  
梁绍荣 管靖 主编

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号  
邮政编码 100009  
传 真 010-64014048

购书热线 010-64054588  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷 北京外文印刷厂

开 本 787×960 1/16  
印 张 23  
字 数 430 000

版 次 2002 年 8 月第 1 版  
印 次 2002 年 8 月第 1 次印刷  
定 价 24.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

责任编辑 陶 铮  
封面设计 张 楠  
责任绘图 陈钧元  
版式设计 韩丽娟  
责任校对 陶 铮  
责任印制 陈伟光

## 著名物理学家的教育思想

中国传统教育提倡按部就班的教学方法，认真的学习态度，这有利于学生打下扎实的基础，但相对来说，缺少创新意识；美国提倡“渗透式”的教育方法，其特点是学生在学习的时候，对所学的内容往往还不太清楚，然而就在这过程中已经一点一滴地学到了许多东西，这是一种“体会式”的学习方法，培养出来的学生有较强的独立思考和创造能力，易于很快地进入科学发展的前沿，但不如前者具有扎实的根基。中美两种教育方式各具特色，长短互补，若能将两者的优点和谐地统一起来，在教育方法上无疑是一个突破。

—— 杨振宁

发展独立思考和独立判断的一般能力，应当始终放在首位，而不应当把获得专业知识放在首位。

—— 爱因斯坦

教育的目标，不只限于知识的传授，尤其是高等教育，其主要任务是教导学生思考。

—— 吴大猷

进步道路上的绊脚石是，也一向是不容怀疑的传统。

—— 吴健雄

我们主张采取“既讲清楚，又不讲清楚”、“言犹未尽”的讲授方法。应该力求讲清一些基本概念，使大多数同学经过思考即可容易地掌握这些知识。但对于已经学过的内容，我们提倡让同学自己去“温故而知新”的工作；对于我们认为同学们经过思考可以掌握的内容、可以导出的公式，则留给同学们自己去做；有时我们留一些“伏笔”，过几章之后再作解答。

—— 杨福家

想象力比知识更重要，因为知识是有限的，而想象力概括着世界上的一切，推动着世界前进，并且是知识进化的源泉。严格地说想象力是科学研究中的实在因素。

—— 爱因斯坦

# 目 录

<b>第四篇 电磁学</b> .....	<b>1</b>
<b>第十七章 真空中的静电场</b> .....	<b>2</b>
§17-1 电荷守恒定律 库仑定律 叠加原理 .....	2
§17-2 电场强度 .....	6
§17-3 高斯定理 .....	10
§17-4 环路定理 电势 .....	16
*§17-5 电势与场强的微分关系 .....	25
习题 .....	27
<b>第十八章 静电场中的导体和电介质</b> .....	<b>30</b>
§18-1 导体的静电平衡 静电屏蔽 .....	30
§18-2 电容 电容器 .....	39
§18-3 电介质及其极化 .....	44
§18-4 有介质存在时的高斯定理 .....	48
§18-5 静电场的能量 .....	50
习题 .....	52
<b>第十九章 稳恒电流和电路</b> .....	<b>55</b>
§19-1 稳恒电流和稳恒电场 .....	55
§19-2 不含源电路的欧姆定律 焦耳定律 .....	59
§19-3 电动势 一段含源电路的欧姆定律 .....	64
*§19-4 基尔霍夫方程组 .....	70
习题 .....	72
<b>第二十章 稳恒电流的磁场</b> .....	<b>73</b>
§20-1 基本磁现象 .....	73
§20-2 磁感应强度 洛伦兹力 .....	75
§20-3 毕奥 - 萨伐尔 .....	77
§20-4 磁通量 磁场的高斯定理 .....	82
§20-5 安培环路定理 .....	84
§20-6 带电粒子在磁场中的运动 .....	91
§20-7 磁场对载流导线的作用 .....	96
习题 .....	103
<b>第二十一章 磁介质</b> .....	<b>107</b>
§21-1 物质的磁性 .....	107
§21-2 磁化强度矢量 .....	109

§21-3 磁介质存在时的安培环路定理 .....	111
*§21-4 铁磁质 .....	117
习题 .....	120
<b>第二十二章 电磁感应 .....</b>	<b>121</b>
§22-1 电磁感应定律 .....	121
§22-2 动生电动势 .....	124
§22-3 感生电动势 .....	128
*§22-4 电磁场的相对论变换 .....	134
§22-5 自感 互感 .....	138
§22-6 磁场的能量 .....	144
习题 .....	146
<b>第二十三章 电磁场 电磁波 .....</b>	<b>150</b>
§23-1 位移电流 .....	150
§23-2 麦克斯韦方程组 平面电磁波 .....	155
§23-3 电磁波的辐射 .....	162
习题 .....	168
<b>第五篇 量子物理学基础 .....</b>	<b>169</b>
<b>第二十四章 早期量子论和量子力学的诞生 .....</b>	<b>172</b>
§24-1 黑体辐射 普朗克的能量子假说 .....	172
§24-2 光电效应 爱因斯坦的光量子理论 .....	176
§24-3 原子结构和原子光谱 玻尔的量子理论 .....	181
§24-4 康普顿效应 光的波粒二象性 .....	196
§24-5 德布罗意波 微观客体的波粒二象性 .....	201
§24-6 量子力学的建立 .....	209
习题 .....	211
<b>第二十五章 量子力学基础 .....</b>	<b>213</b>
§25-1 波函数的统计解释 .....	213
§25-2 薛定谔方程 .....	223
§25-3 一维无限深势阱 .....	226
*§25-4 线性谐振子 .....	229
*§25-5 势垒贯穿 隧道效应 .....	231
§25-6 氢原子 .....	233
§25-7 电子自旋 .....	245
§25-8 不确定关系 .....	248

---

§25-9 总结与评述 .....	253
习题 .....	255
<b>第二十六章 多电子原子 .....</b>	<b>257</b>
§26-1 碱金属原子 .....	257
§26-2 原子中电子的壳层结构 .....	267
§26-3 X 射线 .....	275
§26-4 激光 .....	280
习题 .....	285
<b>第二十七章 原子核物理学 .....</b>	<b>287</b>
§27-1 原子核的基本性质 .....	287
§27-2 原子核的放射性衰变 .....	296
§27-3 原子核反应 .....	310
§27-4 裂变和聚变 核能的利用 .....	316
习题 .....	326
<b>第二十八章 粒子物理学 .....</b>	<b>328</b>
§28-1 粒子物理学的发展概况 .....	328
§28-2 粒子间的相互作用 粒子的分类 .....	330
§28-3 粒子的基本性质 .....	334
*§28-4 对称性 守恒律 .....	339
§28-5 夸克模型 .....	346
习题 .....	350
<b>附录 常用物理常量及换算关系表 .....</b>	<b>351</b>
<b>习题答案 .....</b>	<b>352</b>



## 第四篇 电 磁 学

电磁学研究的对象是宏观电磁场的基本规律及电磁场与带电物质之间的相互作用。电磁学是基础物理学的一个重要组成部分。学习电磁学可以掌握许多重要的基本知识以及与此有关的物理思想和数学方法。电磁学是以力学为基础的，但有自身独立的特性，这里仅强调两点：

### 1. 树立场的观念

物质包括实物与场两种，二者是物质存在的两种形态。电磁场是物质世界的重要组成部分，它与实物一样具有能量、动量和角动量，电场、磁场对带电粒子显示作用力。场随空间和时间变化，因而是四个变量  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $t$  的函数。电场、磁场是矢量场，描写场性质的是场方程，如静电场的场方程是高斯定理和环路定理。本篇主要是研究电磁场的基本规律。

电场和磁场的概念是法拉第 (M. Faraday, 1791--1867) 最先提出的，1865 年麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831--1879) 在前人的工作基础上建立了完整的电磁场理论——麦克斯韦方程组，它在电磁学中的作用与牛顿定律在力学中所起的作用是同等重要的。麦克斯韦从理论上推断出，光的本性是电磁波，从而建立了光学与电磁学的直接联系。狭义相对论的提出与麦克斯韦方程组的建立有密切关系。

在科学技术和生产实践领域内，存在着大量和电磁场有关的问题，如电力系统、电磁探矿、粒子加速器等。电磁波是迅变电磁场，如无线电报、雷达、热辐射、光波、X 射线等都是在不同波长范围内的电磁波，它们有共同的规律。

### 2. 注意代数数量的运用

在电磁学中代数数量很多，如电荷、电势等都有正负之分；电流的流向也由正负来表示；电动势、电场强度通量等也都可正可负。所以学习电磁学时，必须对这些代数数量的正、负的由来和所代表的意义给予充分的重视。

本篇从真空中静电场讲起，这一章是本篇的基础，它的理论、方法和所用的数学知识对后续部分都有直接的用途。静电场中的导体性质是本篇的重要应用，对静电场中的电介质则仅作简略讲述。对静磁场部分的讲述方法与此类似，但限于课程性质，对于定理的证明常以特例给出，不作严格推证。关于稳恒电流和电路部分，注意讲“场”与“路”的关系。电磁感应是本篇的又一重要组成部分，在此基础上再引入一个新概念，就建立了麦克斯韦方程组。最后，讲电磁波的基本性质。至此，初步阐述了电磁场理论的基本内容。

## 第十七章 真空中的静电场

相对于观察者静止的电荷激发的电场称为静电场，因而静电场不随时间而变。静电场的规律最简单，也最基本。它的理论基础是库仑定律和叠加原理。在此基础上将导出静电场的两个重要定理——静电场的高斯定理和环路定理。

电磁学主要研究场，即电场、磁场，而场本身分布在空间中，并可随时间变化。所以描述场的变量是  $x, y, z, t$ 。这四个自变量是彼此独立的。这与力学中描述质点的方法不同。质点力学中，质点在空间的位置用  $r$  表示， $v = \frac{dr}{dt}$  则表示质点的速度。而对于场而言，因四个自变量  $x, y, z, t$  彼此独立，一般说来  $\frac{dr}{dt}$  是无意义的。描述场的物理量都是空间各点和时间的函数。本章讲静电场，它不随时间变化，因而静电场强  $E = E(x, y, z)$ ，为矢量点函数，或称矢量场。静电势  $U = U(x, y, z)$ ，为标量点函数，或称标量场。本章中场量仅与空间变量有关。

### § 17-1 电荷守恒定律 库仑定律 叠加原理

#### 一、电荷守恒定律

用丝绸摩擦过的玻璃棒和用毛皮摩擦过的硬橡胶棒都具有吸引轻小物体的能力。人们就说它们带有**电荷**。电荷表示物质的一种属性，电荷的定量量度称为**电荷量**，以下简称**电量**。电量的单位为 C(库仑)。大量事实表明，在自然界仅有两种电荷。与用丝绸摩擦过的玻璃棒上所带电荷同性者叫**正电荷**，与用毛皮摩擦过的橡胶棒上所带电荷同性者叫**负电荷**。

将这两种电性的电荷分别称之为正电荷和负电荷，纯属历史的偶然。它们只是异性，并无优劣之分。电荷的一个重要特性是**同性相斥，异性相吸**。

电荷的另一个重要特性是它的**量子化**。自然界出现的电量总是元电荷  $e$  的整数倍。 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 。质子带电  $+e$ ，电子带电  $-e$ ，中子不带电。通常情况下，组成物质的原子中，原子核里的质子和核外电子分别带的正负电荷正好中和，故宏观上观察不到带电现象。当某物体有未被中和的净电荷出现时，则该物体带电。

根据同性相斥的原理可以制成检验电量多少和电荷正负极性的装置——验电器，如图 17-1-1 所示。金属棒上端连着一个金属小球，其下端连着两个金属薄片。金属棒被绝缘的塞子



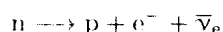
图 17-1-1

固定在玻璃瓶内。当带电体与金属小球接触，把电荷传给金属棒时，金属薄片因带同种电荷互相排斥而张开。电量越多，张角越大。

用验电器可以演示同种电荷相加，张角变大；异种电荷相加，开始张角会变小，直至零，继而张角再变大的现象。

电荷守恒定律可以表述为：**任何孤立体系的电量，即其正负电荷的代数和，在任何物理过程中保持不变。**例如摩擦起电或静电感应时，总是有等量异号的电荷同时产生。电荷守恒定律严格的数学表述将在第十九章 (19.1.5) 式给出。

电荷守恒定律是物理学的一条基本定律。在微观领域它也精确成立，任何核反应式或粒子反应式，反应前后的总电量必定保持不变。例如，单个的中子是不稳定粒子，其平均寿命大约只有 15.3 min，它将发生  $\beta^-$  衰变：



即生成带正电的质子、带负电的电子和一个不带电的反中微子。反应前后的总电量都为零。

电子是最轻的带电粒子，比它轻的粒子只有中微子和光子，它们都是电中性的。因此电子的稳定性正是对电荷守恒定律的最简明而又最有说服力的一个验证。

根据物质导电性能的不同，可以把物质分为三类：**导体、绝缘体和半导体**。允许电荷通过的叫导体；不允许电荷通过的叫绝缘体，也叫电介质；导电性能介于二者之间的叫做半导体。物体导电性能的不同可由物质的电结构来解释。金属之所以导电，是因为其内部存在许多摆脱了原子核束缚的自由电子，它们能在金属内部自由运动。电解液和电离气体之所以导电，是因为其内部存在许多能自由运动的正负离子。而在绝缘体内部，由于电子受到原子核的束缚，基本上没有自由电子，因此有绝缘性质。通常把作宏观运动的带电粒子称为载流子。在半导体中载流子可以是带负电的电子，也可以是带正电的空穴。载流子主要为电子的半导体称为 n 型半导体，载流子主要为空穴的半导体称为 p 型半导体。

## 二、库仑定律

1785 年库仑 (C. A. Coulomb, 1736—1806) 提出了两个静止点电荷之间相互作用力的规律——库仑定律。所谓点电荷，是当带电体的线度  $l$  远小于它到其它带电体的距离时，即将此带电体用点模型表示，称点电荷。

库仑定律表述如下：**两个静止点电荷  $q_1$ 、 $q_2$  间的相互作用力的方向沿着它们的连线，同性相斥，异性相吸；作用力的大小与电量  $q_1$  和  $q_2$  的乘积成正比，与它们之间距离  $r$  的平方成反比。**

现在用矢量形式将库仑定律表述如下:

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{q_1 q_2 \mathbf{r}_{12}}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{q_1 q_2 \mathbf{e}_{r12}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (17.1.1)$$

其中  $\mathbf{F}_{12}$  是点电荷  $q_1$  对点电荷  $q_2$  的作用力,  $\mathbf{r}_{12}$  是由  $q_1$  所在点到  $q_2$  所在点的径矢, 如图 17-1-2 所示,  $\mathbf{e}_{r12} = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r}$  是  $\mathbf{r}_{12}$  的单位矢,  $\epsilon_0$  称真空电容率 (也称真空介电常数), 其单位为  $\text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  (库<sup>2</sup>·牛<sup>-1</sup>·米<sup>-2</sup>),  $1 \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ C}^2 \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = 1 \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ , 其量纲为:  $\dim \epsilon_0 = \text{L}^{-3} \text{M}^{-1} \text{T}^4 \text{I}^2$ . 在国际单位制中, 电流强度是基本量, 它的量纲用 I 表示.  $\epsilon_0$  的大小约为  $8.85 \times 10^{-12}$ . 计算中常用  $1/4\pi\epsilon_0 \approx 9 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{F}^{-1}$ .

(17.1.1) 式已将  $q_1$ 、 $q_2$  同性时为斥力, 异性时为引力表述清楚, 可见矢量表达式的优越之处. 实验表明, 库仑定律在大于  $10^{-15} \text{ m}$  的力程范围严格成立.

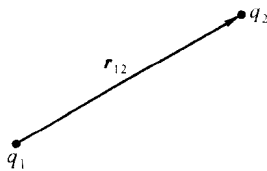


图 17-1-2

对库仑定律作几点说明:

(1) 点电荷模型是当带电体的线度  $l$  远小于带电体之间的距离  $r$  时所用的一个理想模型. 当  $r$  很小, 即带电体靠得很近时, 点电荷模型即失效, 应回到电荷体分布的实际情形考虑.

$$(2) \mathbf{F}_{21} = \frac{q_1 q_2 \mathbf{r}_{21}}{4\pi\epsilon_0 r^3} = -\mathbf{F}_{12} \quad (\text{因 } \mathbf{r}_{12} = -\mathbf{r}_{21}).$$

此式反映两静止点电荷之间的静电力满足牛顿第三定律.

(3) 库仑定律本是由两静止点电荷的情况得出的. 实验发现它可以推广到施力点电荷静止而受力点电荷运动的情况. 至于施力点电荷高速运动的情况 (其速度与真空中的光速可比), 因其电场不再是静电场, 需要用相对论处理. 而施力点电荷低速运动的情况可近似地用库仑定律来处理.

**例题 17-1-1** 求两个  $\alpha$  粒子 (即氦核  ${}^4_2\text{He}$ ) 之间的库仑力与万有引力之比.

**解**  $\alpha$  粒子带电  $+2e$ , 质量  $m \approx 4m_p \approx 6.68 \times 10^{-27} \text{ kg}$ , 万有引力常量  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ . 因为

$$F_e = \frac{(2e)^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad F_G = G \frac{m^2}{r^2}$$

所以

$$\frac{F_e}{F_G} = \frac{(2e)^2}{4\pi\epsilon_0 G m^2} = \frac{9 \times 10^9 \times (2 \times 1.6 \times 10^{-19})^2}{6.67 \times 10^{-11} \times (6.68 \times 10^{-27})^2} = 3.1 \times 10^{35}$$

可见, 与电力相比, 万有引力在微观领域可以忽略. 而根据我们日常生活经验, 重力与电力相比并不弱, 是何原因? 这是因为:

(1) 我们处在地球这个大引力场之中。

(2) 正负电荷在通常情况下精确中和，显示不出其威力。

**例题 17 1-2** 1 mol 的氢原子含  $6.022 \times 10^{23}$  个氢原子，每一个原子有一个质子和一个电子。假定所有的电子都集中为一个点电荷，所有的质子都集中为另一个点电荷，两点电荷的距离等于地球的直径，问它们的静电吸引力多大？

解

$$F_e = \frac{9 \times 10^9 \times (6.022 \times 10^{23} \times 1.6 \times 10^{-19})^2}{(1.28 \times 10^7)^2} \text{ N} = 5.1 \times 10^5 \text{ N}$$

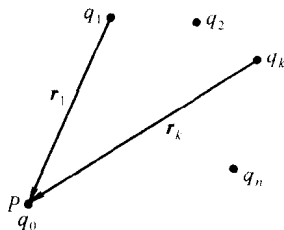
足见电力之强大！通常情况下其锋芒未露，正是因为正负电荷之间非凡的精确相消，使得电力作用显示不出来。

由于物质由带电粒子组成，因而静电力在物质结构的所有方面起中心和主导作用：将原子核和电子结合为原子，将原子结合为分子，维持固体的结晶点阵，固体、液体的不可压缩性，液体的表面张力等等都取决于电磁力。但是仅有电磁力不能解释原子核的结构。原子核由中子和质子组成。质子之间的电磁力为斥力，而原子核却组成一个密度很高的稳定体系。其原因是这里还有核力——强相互作用在起作用，其强度比电磁力大两个数量级。核力的特点是它的短程性，仅在  $10^{-15} \text{ m}$  的力程范围内起作用。

### 三、叠加原理

实验发现，同时有  $n$  个点电荷存在时，作用于某一试探点电荷  $q_0$  的总静电力，等于这  $n$  个点电荷各自单独存在时，对该试探点电荷的静电力的矢量和(见图 17-1-3)，即

$$\mathbf{F} = \sum_{k=1}^n \mathbf{F}_k = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{q_k \mathbf{r}_k}{r_k^3}$$



这称为力的叠加原理。

图 17-1-3

因为叠加原理成立，我们有可能将库仑定律用于任何复杂的电荷分布情形。

叠加原理在电磁学中随处可见，可以说，离开叠加原理，电磁学将寸步难行。叠加原理的成立，既有大量的实验事实做依据，又有其深刻的理论根源，这就是电磁学的基本方程都是线性方程。这一点，从后面第二十三章中讲的麦克斯韦方程组 [(23.2.3) 式]，将明显地看出来。

## § 17-2 电场强度

## 一、电场

在法拉第提出电场概念以前, 很长一个时期人们曾误以为静电力是一种超距作用——静电力的传递既不需要中间媒质, 也不需要时间, 从一个带电体即可直达另一个带电体.

近代物理学的理论和实验证明, 电磁场是一种客观存在的特殊物质, 它也具有能量、动量、角动量. 在考虑能量守恒、动量守恒、角动量守恒时, 电磁场是不可忽略的研究对象. 场的概念已成为近代物理学中最重要的基本概念之一.

任何电荷在其周围空间都要激发电场, 任何运动电荷则在其周围空间还要激发磁场. 电磁力只能通过电磁场来传递, 而任何电磁扰动都以有限的光速传播, 因此电磁力决不是超距作用.

静电场对在其内的带电体将施加静电力. 当带电体在此静电场中移动时, 电场所施静电力将对带电体作功. 这表明, 静电场的确具有能量.

## 二、电场强度

既然电荷之间的相互作用是通过电场来实现的, 下面便根据电场对电荷的作用力来定义一个描述电场强弱的物理量——电场强度.

静止电荷在其周围空间激发静电场, 其基本特征就是对位于场中任一场点  $P(x, y, z)$  的试探点电荷  $q_0$  会施加静电力  $\mathbf{F}$ . 能否用  $\mathbf{F}$  来描写电场呢? 不行! 因  $\mathbf{F}$  不仅与  $P(x, y, z)$  点位置有关, 还与  $q_0$  有关,  $\mathbf{F}$  随  $q_0$  的电性和大小而变, 但该点的电场却没变. 可以看出, 比值  $\mathbf{F}/q_0$  与  $q_0$  无关. 因此, 定义该点的 **电场强度**(简称 **场强**) 为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (17.2.1)$$

可见, **电场强度**是一个矢量, 它的大小等于单位电荷在该点所受电场力的大小, 它的方向为正电荷在该点所受电场力的方向. 但应注意, 试探电荷的线度要小, 以便精确定义空间各点的电场强度; 试探点电荷的电量要小, 以免影响原来的场强分布. 在满足上述要求的情况下, 比值  $\mathbf{E} = \mathbf{F}/q_0$  与  $q_0$  的大小和电性无关, 的确可用以表征电场特性.

由 (17.2.1) 式可得电场强度的单位为  $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$  (牛 · 库<sup>-1</sup>),  $1 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1} = 1 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  (伏 · 米<sup>-1</sup>), 电场强度的量纲为:  $\dim E = \text{LMT}^{-3}\text{I}^{-1}$ .

### 三、点电荷及点电荷组的电场强度

如图 17-2-1 所示, 将点电荷  $Q$  置于坐标原点, 将试探点电荷  $q_0$  置于场点  $P$ ,  $P$  点的径矢为  $r$ . 由库仑定律可得点电荷  $Q$  在  $P$  点的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{Q\mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{Q\mathbf{e}_r}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (17.2.2)$$

显然, 点电荷  $Q$  的电场分布是球对称的. 在半径为  $r$  的球面上, 各点场强等大, 当  $Q > 0$  时,  $\mathbf{E}$  与  $\mathbf{r}$  同向; 当  $Q < 0$  时,  $\mathbf{E}$  与  $\mathbf{r}$  反向.

由力的叠加原理, 可得出  $n$  个点电荷在  $P(x, y, z)$  点产生的场强为

$$\mathbf{E} = \sum_{k=1}^n \mathbf{E}_k = \sum_{k=1}^n \frac{Q_k \mathbf{r}_k}{4\pi\epsilon_0 r_k^3} \quad (17.2.3)$$

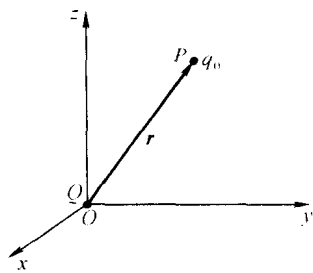


图 17-2-1

其中  $\mathbf{r}_k$  是由  $Q_k$  所在点到场点  $P$  的径矢, 见图 17-1-3. 上式称为 **场强的叠加原理**.

### 四、电荷连续分布产生的电场强度

#### 1. 电荷为体分布情形

定义电荷体密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} \quad (17.2.4)$$

其中  $\Delta V$  为物理无限小体元, 即宏观上足够小, 但仍包含亿万分子, 因而不至于暴露微观电荷分布的起伏, 所以  $\rho$  仍为宏观量. 电荷体密度  $\rho(x, y, z)$  是一个标量场, 它的单位为  $\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$  (库·米<sup>-3</sup>).

如图 17-2-2 所示, 体电荷元  $dq = \rho dV$  在  $P$  点产生的场强为

$$d\mathbf{E} = \frac{\mathbf{r}dq}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{\mathbf{r}\rho dV}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

其中  $\mathbf{r} = \mathbf{R} - \mathbf{R}'$  是由电荷元指向场点  $P$  的径矢. 根据场强叠加原理, 分布在区域  $V$  内的全部电荷在  $P$  点产生的总场强, 可由下述矢量积分式而得:

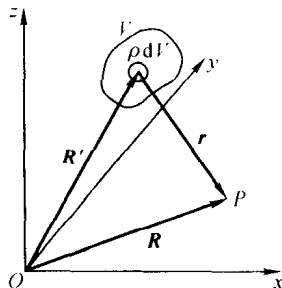


图 17-2-2

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_V \frac{\mathbf{r}dq}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_V \frac{\mathbf{r}\rho dV}{r^3} \quad (17.2.5)$$

## 2. 电荷为面分布情形

设  $r$  为源点到场点的距离, 当带电面的厚度  $\delta$  满足  $\delta \ll r$  时, 可采用面电荷模型. 定义电荷面密度为

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} \quad (17.2.6)$$

其单位为  $\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$  (库·米<sup>-2</sup>). 则面电荷元的电量  $dq = \sigma dS$ .

如图 17-2-3 所示, 分布于  $S$  面上的面电荷在  $P$  点的总场强用类似的方法可得

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_S \frac{\mathbf{r}\sigma dS}{r^3} \quad (17.2.7)$$

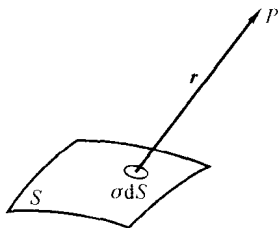


图 17-2-3

## 3. 电荷为线分布情形

带电线的横截面线度  $\delta \ll r$  时, 可采用线电荷模型. 定义电荷线密度为

$$\eta = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} \quad (17.2.8)$$

其单位为  $\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$  (库·米<sup>-1</sup>). 则线电荷元的电量  $dq = \eta dl$ .

如图 17-2-4 所示, 分布于曲线  $L$  上的线电荷在  $P$  点产生的总场强为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_L \frac{\mathbf{r}\eta dl}{r^3} \quad (17.2.9)$$

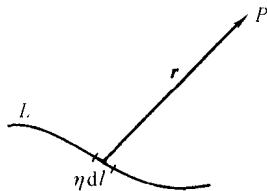


图 17-2-4

$\rho$ 、 $\sigma$ 、 $\eta$  都是宏观量. 应记住它们与电荷元  $dq$  的对应关系分别为

$$dq = \rho dV \text{ 或 } dq = \sigma dS \text{ 或 } dq = \eta dl \quad (17.2.10)$$

上式中的  $q$  都是标量, 其单位都是库仑. 记住了电荷元的对应关系 (17.2.10) 式, 便可将 (17.2.5) 式方便地化为面积分式 (17.2.7) 或线积分式 (17.2.9). 真实电荷分布大多为体分布, 但引入点模型、线模型、面模型可以简化问题, 方便计算. 模型的方法在电磁学中有大量应用.

**例题 17-2-1** 求半径为  $R$ 、电量  $q$  均匀分布其上的细圆环在其轴线上的场强.

**解** 取圆环面在  $Oxy$  面, 圆环轴线为  $z$  轴, 如图 17-2-5 所示.

取一段线电荷元  $\eta dl$  如图中所示, 它在  $P$  点的场强  $d\mathbf{E}$  可分解为轴向分量  $dE_z \mathbf{k}$  和垂直于轴向的分量  $d\mathbf{E}_\perp$ . 由对称性可知, 各线电荷元的  $d\mathbf{E}_\perp$  将相互抵消, 结果  $P$  点的总场强沿  $z$  方向, 数值为  $dE_z$  的积分, 即



$$\begin{aligned}
 E = E_z &= \int_L dE_z = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_L \frac{\eta dl \cos \alpha}{r^2} \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_L \frac{dq z}{r^2 r} = \frac{z}{4\pi\epsilon_0 r^3} \int_L dq \\
 &= \frac{qz}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{qz}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + z^2)^{3/2}}
 \end{aligned}$$

本题的对称性分析也可如下得出：由于电荷分布对  $z$  轴具轴对称性，即绕  $z$  轴旋转不变，因而场强分布也具轴对称性，故  $z$  轴上任一场点  $P$  的场强必沿  $z$  轴，否则将破坏轴对称性。

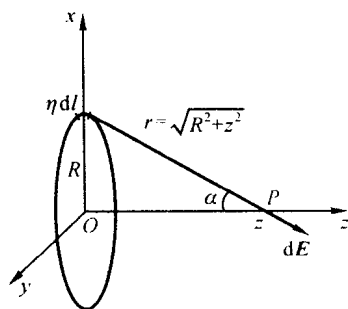


图 17-2-5

讨论：

(1) 当  $z = 0$  时， $E = 0$ 。即均匀带电圆环圆心处场强为零。这由图 17-2-5 对  $Oxy$  面的镜像对称性也可验证。

(2)  $z \gg R$  时， $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 z^2}$ ，即在远区它相当于点电荷的场强，显然合理。

**例题 17-2-2** 设有一均匀带电直线，长度为  $L$ ，电荷线密度为  $\eta$ 。线外一点  $P$  到直线的垂直距离为  $a$ ， $P$  点和带电直线两个端点的连线与直线的夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ，如图 17-2-6 所示，求  $P$  点的电场强度。

**解** 建立直角坐标系  $Oxz$  如图示，原点  $O$  为  $P$  到直线的垂足。距  $O$  点  $z$  处取线元  $dz$ ，由电荷元  $\eta dz$  在  $P$  点产生的场强为

$$\begin{aligned}
 d\mathbf{E} &= \frac{(r \cos \alpha \mathbf{i} - r \sin \alpha \mathbf{k})}{4\pi\epsilon_0 r^3} \eta dz \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(a\mathbf{i} - z\mathbf{k})\eta dz}{(z^2 + a^2)^{3/2}}
 \end{aligned}$$

积分可得

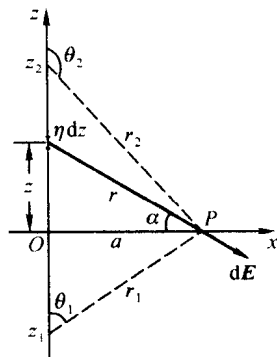


图 17-2-6

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E} &= \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0} \left[ \int_{z_1}^{z_2} \frac{a}{(z^2 + a^2)^{3/2}} dz \mathbf{i} - \int_{z_1}^{z_2} \frac{z dz}{(z^2 + a^2)^{3/2}} \mathbf{k} \right] \\
 &= \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{z}{a\sqrt{z^2 + a^2}} \Big|_{z_1}^{z_2} \mathbf{i} + \frac{1}{\sqrt{z^2 + a^2}} \Big|_{z_1}^{z_2} \mathbf{k} \right] \\
 &= \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{a} \left( \frac{z_2}{r_2} - \frac{z_1}{r_1} \right) \mathbf{i} + \frac{1}{a} \left( \frac{a}{r_2} - \frac{a}{r_1} \right) \mathbf{k} \right] \\
 &= \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} \left[ (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \mathbf{i} + (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \mathbf{k} \right] \quad (17.2.11)
 \end{aligned}$$