



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

大学物理 下册

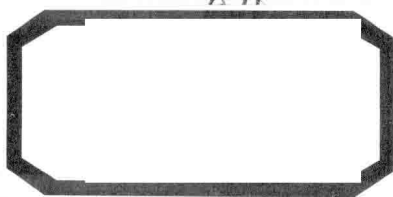
(第五版)

主 编 郝玉英 周希坚
副主编 康爱国 李孟春 黄 平



科学出版社





“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

大学物理

(第五版)

下 册

主 编 郝玉英 周希坚

副主编 康爱国 李孟春 黄 平

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是在《大学物理(第四版)》基础上,根据《理工科类大学物理课程教学基本要求》,按照21世纪人才培养模式的需要和课程体系、教学内容改革的要求编写而成的.全书分为上、下两册,上册包括力学、振动和波动、热物理学;下册包括电磁学、光学和量子物理基础.与本书配套的还有《大学物理(第五版)》电子教案.

本书可作为高等工科大学各专业和其他类院校非物理类专业本、专科学生的大学物理教材,也可用作成人教育的大学物理教材和教学参考书.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.下册/郝玉英,周希坚主编.—5版.—北京:科学出版社,2016.8

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-03-049603-4

I. ①大… II. ①郝… ②周… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第195878号

责任编辑:昌盛 王刚/责任校对:张凤琴

责任印制:白洋/封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年2月第 一 版 2016年8月第 五 版

2003年1月第 二 版 开本:720×1000 1/16

2007年8月第 三 版 印张:26 1/2

2011年1月第 四 版 字数:534 000

2016年8月第二十一一次印刷

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本教材自发行以来,深受广大师生的厚爱,并被多所院校选为教材或参考书.根据广大教师与读者反映的情况和提出的建议,结合教学改革和精品课程建设的最新成果,并考虑了当前学生的实际情况,对原书的内容进行了进一步修订,形成了《大学物理(第五版)》.

《大学物理(第五版)》仍覆盖了《理工科类大学物理课程教学基本要求》中的所有核心内容.修订中保持原有的风格和特点,包括重物理基础理论,重分析问题和解决问题能力的培养等.在此基础上,为了提高学生的综合科学素养及学习兴趣,我们做了以下修订:

(1)结合学生的实际学习情况,将教材体系稍作调整,将原下册的振动与波动、狭义相对论调整到上册,原上册的电磁学调整到下册.

(2)引入数字化教学资源,在不过多增加教材篇幅和教学负担的情况下,通过扫描二维码的方式,获得动画、物理演示实验、视频等,拓展大学物理的教学内容.

(3)精选例题,加大了例题的数量,更注重了解题思路和方法的引导.更换了近一半的习题,加强了贴近工程实际的习题类型.

(4)修改了若干知识内容的叙述,力求语言准确、简洁,提高可读性;同时增加和更换了部分插图和照片,力求版面的美化.

参加本书编写与修订的人员均为太原理工大学教师.分工如下:蔡冬梅编写第1章;刘红利编写第2章、第5章、第6章;杨毅彪编写第3章;贺晓宏编写第4章;张彩霞编写第7章;崔彩娥编写第8章;黄平编写第9、第10章、第12章;李孟春编写第11、第13章;王丽平编写第14章;康爱国编写第15章;刘瑞平编写第16、第17章及附录.王纪龙、杨毅彪、郝玉英、周希坚负责全书统校工作.

全书的数字资源由杨慧岩、张机源、郭竹远老师拍摄制作,在此深表感谢.

衷心感谢多年来使用并关心本教材的广大师生,并欢迎继续对本书中的不足或错误提出批评指正.

王纪龙

2015年12月于太原

目 录

第四篇 电 磁 学

第 9 章 真空中的静电场	3
9.1 电荷 库仑定律	3
9.2 电场 电场强度	8
9.3 电通量 静电场的高斯定理	19
9.4 静电场的环路定理 电势	31
9.5 等势面 *电势梯度	39
9.6 带电粒子在静电场中的运动	43
习题 9	48
第 10 章 导体和电介质中的静电场	52
10.1 静电场中的导体	52
10.2 电容和电容器	60
10.3 静电场中的电介质	65
10.4 静电场的能量	74
习题 10	77
第 11 章 真空中的稳恒磁场	81
11.1 稳恒电流 电流密度	81
11.2 基本磁现象 磁感应强度	84
11.3 毕奥-萨伐尔定律	88
11.4 磁通量 磁场的高斯定理	98
11.5 安培环路定理	101
11.6 磁场对载流导线和运动电荷的作用	109
11.7 带电粒子在电磁场中的运动实例	116
习题 11	121

第 12 章 介质中的磁场	129
12.1 磁介质及其磁化	129
12.2 磁介质中的磁场	135
12.3 铁磁质	139
习题 12	143
第 13 章 变化电磁场的基本规律	145
13.1 电源 电动势	145
13.2 电磁感应定律	147
13.3 动生电动势	151
13.4 感生电动势	155
13.5 自感 互感	162
13.6 磁场的能量	170
13.7 麦克斯韦电磁场理论	173
13.8 电磁波	178
习题 13	184

第五篇 光 学

第 14 章 波动光学	192
14.1 光的相干性	192
14.2 光程 光程差	195
14.3 双缝干涉实验	198
14.4 薄膜干涉	208
*14.5 迈克耳孙干涉仪	224
14.6 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	226
14.7 单缝和圆孔的夫琅禾费衍射	229
14.8 光栅衍射	241
*14.9 X 射线的衍射 布拉格方程	251
14.10 光的偏振性 自然光和偏振光	253
14.11 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	255
14.12 反射和折射时光的偏振	260
*14.13 光的双折射现象	262

*14.14 偏振光的干涉 波晶片 人为双折射	269
*14.15 旋光现象	274
习题 14	275

第六篇 量子物理基础

第 15 章 从经典物理到量子物理	283
15.1 黑体辐射 普朗克的能量子假说	283
15.2 光电效应 爱因斯坦的光量子论	291
15.3 原子结构和原子光谱 玻尔的量子论	302
习题 15	309
第 16 章 量子力学基础	311
16.1 实物粒子的波粒二象性 德布罗意波	311
16.2 波函数及其物理意义	314
16.3 不确定性原理	317
16.4 薛定谔方程	320
16.5 定态问题	324
16.6 氢原子	333
16.7 多电子原子和元素周期表	342
*16.8 应用专题	346
习题 16	369
*第 17 章 原子核和基本粒子简介	371
17.1 核的组成和基本性质	371
17.2 核力与原子核结构	374
17.3 原子核衰变	376
17.4 基本粒子简介	380
习题 17	387
1901~2015 年百年诺贝尔物理学奖获得者简况	389
习题参考答案	402

第四篇 电 磁 学

电磁学是研究物质间电磁相互作用，电磁场的产生、变化和运动规律的一门学科。在 20 世纪 30 年代人们已经认识到，自然界有四种不同性质的相互作用，即引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用。电磁相互作用是物质世界中最普遍的相互作用之一，这种相互作用既存在于宏观物体之间，也存在于分子和原子内。电磁力比万有引力强 10^{39} 倍，比弱相互作用和强相互作用的范围大 10^{20} 倍。20 世纪 70 年代末物理学家提出了电弱统一理论，在 1983 年为实验所证实。这一事实使物理学家进一步想到：自然界是否只有一种统一的相互作用？揭开这一谜团已成为摆在物理学家面前的又一新课题。

人类对电磁现象的认识可追溯到公元前 6、7 世纪，但是对电磁现象的定量研究则是从 18 世纪库仑定律的建立开始的。以后高斯、安培、法拉第等逐步建立了电和磁的各条重要定律，法拉第提出了电场和磁场的概念，麦克斯韦则站在法拉第和汤姆孙两位巨人的肩上，面对众说纷纭的电磁理论，以深邃的洞察力、高超的数学技巧，历经近 10 年的研究，于 1865 年创建了电磁场理论。通常把以麦克斯韦电磁场方程组为核心的电磁理论称为经典电磁学。对麦克斯韦的功绩，爱因斯坦在他的纪念麦克斯韦 100 周年的文集中给予了如下评价：“自从牛顿奠定理论物理学的基础以来，物理学的公理基础的最伟大的变革是法拉第和麦克斯韦在电磁现象方面的工作所引起的”。“这样一次伟大的变革是同法拉第、麦克斯韦和赫兹的名字永远联系在一起的。这次革命的大部分出自麦克斯韦。”

大量实验事实证明，物质间的相互作用不是超距的，而是由场传递的。正是场与实物间的相互作用，才导致了实物间的相互作用。场是物质存在的另一种形态。

场与由分子、原子构成的实物一样，都是物质，是两种不同的物质存在形态。场与实物相互作用时，显示出和实物一样具有质量、能量、动量等物质的属性。场与实物一样具有波粒二象性。

由于场与实物物质存在形态不同，所以场物质又与实物物质不同：场物质的基本特征是其静止质量为零，即 $m_0=0$ ，而实物物质的静止质量不为零，即 $m_0 \neq 0$ ；场的分布具有广延性，而实物物质则集中分布，任一实物只占据一定的空间；场的可叠加性和实物的不可加入性，即在同一空间可以同时存在若干同种或不同种的场，场与实物也可以共存于同一空间，但实物的原子、分子占据的空间不能同时被另外的分子、原子所占据；场分布的连续性和实物的分立性，场的分布是弥漫型的、连续的或分段连续的，而实物则分布在有限的范围内，各实物占据的空间不相互重叠，彼此有明显边界，互相分立，不连续；场与实物处于同一空间时将发生相互作用，在一定条件下可以相互转化，如高能光子可以转变为正负电子对，反之，正负电子对也可以转变为光子（湮灭）。

电磁学是以电磁场作为研究对象的，这是在本书中首次引入场的概念，并研究电磁场的产生、变化、运动的规律，它将为以后研究场物质打下必要的理论基础。同时，可以看到，由于场物质与实物物质的一系列差异，所以在研究场时将采用一系列与力学中完全不同的方法。例如，引入通量和环流来描述矢量场；用空间点函数来描述场的分布；用叠加原理求解场；用场线、等势面等几何方法形象地描绘场等。

电磁学部分主要介绍真空中的静电场、静电场中的导体与电介质、稳恒电流的磁场、磁场对电流的作用、磁介质、电磁感应、电磁场理论等内容。由于电磁学给出了关于电磁场的性质及其运动规律的完整理论和独特的研究方法，这对研究场具有普遍的意义；同时，电磁场理论也是学习其他物理理论，特别是原子、分子等微观理论和工程专业后续课程的重要理论基础，所以电磁学是大学物理课程中非常重要的一部分内容。

第9章 真空中的静电场

相对于观察者静止的电荷所激发的电场称为静电场. 静止的电荷只激发电场, 不产生磁场, 因此, 在这种情况下可以单独研究电场的性质和规律. 对静电场的研究是认识电磁运动规律的基础. 本章研究静止电荷在真空中所产生的静电场的基本性质和规律. 主要内容: 从库仑定律和场强叠加原理出发, 根据电场对电荷施力和电荷在电场中移动时电场力对电荷做功这两个基本属性, 定义了描述电场的两个物理量即电场强度和电势, 然后对静电场进行研究; 推证了反映静电场性质的两个基本定理, 即高斯定理和环流定理, 揭示了静电场是有源无旋场; 讨论了电场强度与电势之间的积分关系式与微分关系式.

9.1 电荷 库仑定律

9.1.1 电荷

人们对电现象的认识是从研究摩擦起电现象和自然界的雷电现象开始的. 一些物体被摩擦之后具有吸引轻小物体的性质, 我们就说它带了电荷, 处于带电状态的物体称为带电体. 带电体所带电荷的多少称为电量.

国际单位制中电量的单位是库仑(C).

1. 正电荷和负电荷

电荷有两种, 1747年美国科学家富兰克林在研究雷电现象时发现了电, 并命名了“正电”和“负电”. 电荷只有这两种, 现在仍沿袭着当初的约定: 用丝绸摩擦过的玻璃棒带正电荷, 用毛皮摩擦过的橡胶棒带负电荷.

电荷之间有相互作用: 同种电荷相互排斥, 异种电荷相互吸引.

宏观物体所带电荷种类的不同, 根源在于构成宏观物体的微观粒子所带电荷种类的不同. 在一般情况下, 每个原子中带正电的质子数与带负电的电子数是相等的, 物体对外不显示电性; 当物体受到摩擦等作用时, 就会造成物体上的电子过多或不足, 这时物体就显示了电性. 当电子过多时, 物体带负电; 当电子不足

时, 物体带正电.

2. 电荷的量子化

1897年, 英国物理学家汤姆孙发现了电子. 电子是具有最小静止质量, 带最小负电荷的粒子, 其电量的近似测量值为

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

1913年, 美国实验物理学家密立根进行了著名的“油滴实验”, 测定带电油雾滴的电量, 大量实验数据证实每个油滴上所带电量总是 e 值的整数倍, 即带有整数个电子. 1919年发现了质子, 确定它是带电量为 $+e$ 的粒子, 实验证实质子的正电荷与电子的负电荷在电量上是相等的.

在自然界中, 带电体所带电荷的电量总是基本电荷电量 e 的整数倍, $q = ne$, n 可取正的或负的整数. 带电体的电荷量是不能任意取值的, 而只能取基本电荷量的整数倍, 这种现象称为电荷的量子化.

1964年, 美国物理学家盖尔曼首先提出, 一些基本粒子是由称为夸克和反夸克的更小粒子组成的, 并预言了夸克和反夸克的电量应取 $\pm e/3$ 或者 $\pm 2e/3$. 现已在一些粒子物理实验中找到了夸克存在的依据. 到1977年, 实验上已经发现了五味夸克, 1995年3月2日随着第六味夸克的发现, 实验上已找到了全部六味夸克存在的依据, 但由于夸克禁闭, 至今未能检测到单个自由夸克. 即使将来获得了单个自由夸克, 也不会改变电荷量子化这一结论, 只不过基本电荷变成了 $\pm e/3$ 而已.

当某一物理量不能取连续变化的数值而只能取一些分立的数值时, 我们就说这个物理量是“量子化”的. 在近代物理中, “量子化”是一个很基本的概念, 量子化现象在微观领域中是普遍存在的.

由于电荷的基本量 e 极小, 而宏观带电体所带的电荷量远大于基本电荷量, 因此电荷量子化一般在宏观现象中表现不出来. 例如, 在220 V、15 W的灯泡中, 每秒就有 4.3×10^{17} 个电子的电荷量通过灯丝, 对于这一宏观电流来说, 电荷量子化的事实完全被掩盖了. 在宏观电磁学的范围内不必考虑电荷量子化, 可以认为带电体的电荷量取连续变化的数值. 事实上, 物理学中的量子化现象在宏观领域中一般都表现不出来, 但在微观领域中却是普遍存在的.

3. 电荷守恒定律

实验指出, 无论是摩擦起电过程还是其他方法使物体带电, 正负电荷总是同

时出现的,而且这种电荷的量值一定相等.当两种异号电荷相遇时,则相互中和,物体就不带电了.可见,当一种电荷出现时,必有等量异号电荷同时出现;当一种电荷消失时,必有等量异号电荷同时消失.在一个与外界没有电荷交换的孤立系统中,无论发生怎样的物理过程,系统内正负电荷量的代数和保持不变.这就是从实验中总结出来的电荷守恒定律,它是自然界中最基本的守恒定律之一.不仅在宏观尺度上,而且在微观粒子尺度上,电荷守恒定律均成立.

现代物理研究已表明,在粒子的相互作用过程中,电荷是可以产生和消失的,然而电荷守恒并未因此而破坏.例如, γ 射线穿过铅块时可产生一个负电子和一个正电子,这实际上是 γ 光子转换成正负电子对的反应过程(电子对的产生).而一个正电子和一个负电子在一定条件下相遇,又会同时消失而产生两个或三个光子(电子对的湮灭).由于光子不带电,正、负电子带等量异种电荷,因此这种电荷的产生和消失并不改变系统中的电荷数的代数和,因而电荷守恒定律仍然保持有效.

9.1.2 库仑定律

1. 点电荷

静止的带电体之间的电性作用力称为静电力.这种力与带电体的形状、大小、电荷分布、相对位置以及周围的介质等因素都有关系,通过实验测出静电力对以上各因素的依赖关系是困难的.但是,实验发现:当一个带电体的线度远小于其到其他带电体的距离时,这个带电体的形状、大小对静电力的影响可以忽略,此时带电体可视为点电荷.对于点电荷,可以简单地用一个点来表示它的位置,这个点上集中了带电体的全部电荷量.点电荷是一个理想模型.

2. 库仑定律

1785年,法国物理学家库仑通过扭秤实验直接测定了两个带电小球之间的静电力,并在实验基础上提出了两个点电荷之间相互作用的规律:真空中两个静止点电荷之间静电力的大小与两个点电荷电量乘积成正比,与两个点电荷之间距离平方成反比;作用力的方向沿着两个点电荷的连线,同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引.这个规律称为库仑定律,其数学表达式为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (9.1a)$$

式中, k 是比例系数.在国际单位制中,实验测得

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

为了同时表示 $\mathbf{F}$ 的大小和方向, 可将上式写成矢量式

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (9.1b)$$

式中, $\mathbf{r}$ 为由施力电荷指向受力电荷的位置矢量; $\mathbf{r}^0 = \frac{\mathbf{r}}{r}$ 表示从施力电荷指向受力电荷方向的单位矢量. 如果 q_1 、 q_2 是同种电荷, 则 $\mathbf{F}$ 沿 $\mathbf{r}$ 方向, 表明点电荷之间是斥力; 如果 q_1 、 q_2 是异种电荷, 则 $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{r}$ 方向相反, 表明点电荷之间是吸引力.

为了使许多由库仑定律推导出来的电磁学公式形式简单, 通常用另一个常数 ϵ_0 替换 k , 它与 k 的关系是

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

其中, $\epsilon_0 = 8.8538 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 称为真空介电常量, 也称为真空电容率.

因此, 两个点电荷之间的静电力又可表示为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (9.2)$$

9.1.3 静电力的叠加原理

实验证明: 一个点电荷受到两个以上点电荷的作用力, 等于各个点电荷单独存在时对该点电荷作用力的矢量和. 静电力遵守力的矢量叠加原理. 如果用 $\mathbf{F}_1$, $\mathbf{F}_2$, $\dots$, $\mathbf{F}_n$ 分别代表点电荷 q_1 , q_2 , $\dots$, q_n 单独存在时对 q_0 的作用力, 那么 q_0 受到各个点电荷的静电力的合力为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n \quad (9.3)$$

库仑定律只适应于点电荷, 两个点电荷间的距离 r 不能趋于零, 否则点电荷这一模型就失去存在的前提. 求有限大小带电体之间的作用力, 可将其分割成许多可看成点电荷的电荷元, 用库仑定律求出每一对电荷元间的作用力, 再应用力的叠加原理, 可计算出两个带电体间的静电力.

例 9-1 在氢原子的玻尔模型中, 电子与质子之间的平均距离为 $r = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$, 试分别估算静电力和万有引力.

解 电子的电荷是 $-e$, 质子的电荷是 $+e$, 取 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, 电子的质量

$m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 质子的质量 $m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 由库仑定律求得两粒子间的静电力的大小为

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

由万有引力定律求得两粒子间的万有引力的大小为

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{9.1 \times 10^{-31} \times 1.7 \times 10^{-11}}{(5.3 \times 10^{-10})^2} \text{ N} = 3.7 \times 10^{-47} \text{ N}$$

静电力与万有引力之比为

$$\frac{F_c}{F_g} \approx 2.3 \times 10^{39}$$

由此可见, 在原子内部讨论问题, 万有引力完全可以忽略不计。

例 9-2 三个点电荷 q_1 、 q_2 和 q_3 所处位置如图 9-1 所示, 位置分别是 $(0, 0.3)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(0.4, 0)$, 它们所带电量分别为 $-q_1 = q_2 = 2.0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $q_3 = 4.0 \times 10^{-6} \text{ C}$, 求 q_3 所受的静电力。

解 由库仑定律求得 q_1 对 q_3 的作用力 F_1 和 q_2 对 q_3 的作用力 F_2 , F_1 与 F_2 的合力 F 就是 q_3 所受的静电力。

$$F_1 = k \frac{q_1 q_2}{r_1^2} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{2.0 \times 10^{-6} \times 4.0 \times 10^{-6}}{0.5^2} \text{ N} = 0.29 \text{ N}$$

$$F_{1x} = F_1 \cos(\pi - \alpha) = -F_1 \cos \alpha = -0.23 \text{ N}$$

$$F_{1y} = F_1 \sin(\pi - \alpha) = F_1 \sin \alpha = 0.17 \text{ N}$$

$$F_2 = k \frac{q_2 q_3}{r_2^2} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{2.0 \times 10^{-6} \times 4.0 \times 10^{-6}}{0.4^2} \text{ N} = 0.45 \text{ N}$$

$$F_{2x} = 0.45 \text{ N}, \quad F_{2y} = 0$$

根据静电力的叠加原理, 作用于电荷 q_3 上的合力为

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} = 0.22 \text{ N}, \quad F_y = F_{1y} + F_{2y} = 0.17 \text{ N}$$

合力的大小为

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 0.28 \text{ N}$$

F 与 x 轴的夹角为

$$\theta = \arctan \frac{F_y}{F_x} = 38^\circ$$

上述结果也可表示为

$$\mathbf{F} = (0.22\mathbf{i} + 0.17\mathbf{j}) \text{ N}$$

$\mathbf{i}$ 和 $\mathbf{j}$ 分别为沿图 9-1 所示 x 、 y 坐标轴方向的单位矢量。

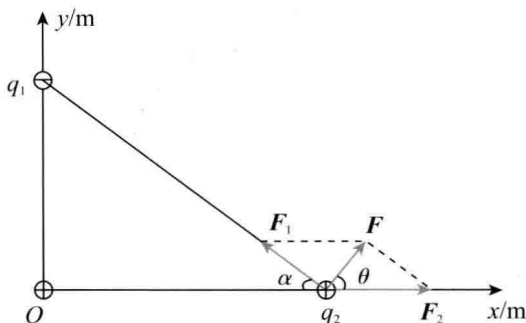


图 9-1 点电荷 q_1 、 q_2 对点电荷 q_3 的作用

9.2 电场 电场强度

9.2.1 电场

电荷之间的相互作用是怎样发生的？关于这个问题曾有两种不同的观点：一种观点认为电荷之间的作用力不需要媒质传递，也不需要任何传递时间，而是从一个带电体直接作用到另一个带电体上的，这种观点称为“超距作用”观点；另一种观点认为任一电荷都会在自己周围空间激发电场，带电体之间的相互作用是通过电场来传递的，这种观点称为“近距作用”观点，又称为“场的观点”。大量的科学实验证明，“场的观点”是正确的。

电场虽然不像由原子、分子组成的实物那样看得见摸得着，但它是确实存在的，因而能被我们所感知。静电场的对外表现主要有：

- (1) 引入电场中的任何带电体都将受到电场所作用的力；
- (2) 电场能使引入电场中的导体或电介质分别产生静电感应现象或极化现象；
- (3) 当带电体在电场中移动时，电场所作用的力将对带电体做功，这表明电

场具有能量.

场与实物是物质存在的两种不同形式, 它们都具有质量、动量、能量等物质的基本属性. 但电场与实物又有不同之处; 电场的可叠加性是电场与实物的重要区别之一. 场的可叠加性是指, 在同一个空间可以存在多个不同的电场, 并通过矢量叠加产生出一个可视为新的独立的电场. 一般的普通物质都要占据一定的空间, 并且在占据的空间里不能再存在其他普通物质. 而电场不同, 相同的空间可以加上无数个不同的电场.

本章研究相对于观察者静止的电荷所激发的电场, 即静电场.

9.2.2 电场强度

电荷之间的作用力实质上是电场对电荷的作用力, 称为电场力. 电场对置于场中的其他电荷施加力的作用是电场的基本性质之一, 我们可以从这一性质出发, 在电场中引入一个试验电荷 q_0 , 通过研究 q_0 在电场中不同点的受力情况, 对静电场进行定量的分析讨论. 为保证测量的准确性, 要求试验电荷所带的电量必须足够小, 以致它的引入几乎不影响原来电场在空间的分布, 同时要求试验电荷的几何限度必须充分小, 以保证能反映出空间任一点电场的性质. 试验电荷是一个电量足够小的点电荷.

实验发现: 在电场中不同点, 试验电荷所受电场力的大小和方向一般是不相同的; 在电场中任意一个确定的点, 试验电荷所受的电场力 $\boldsymbol{F}$ 与试验电荷的电荷量 q_0 成正比, q_0 增大几倍, $\boldsymbol{F}$ 的大小也增大几倍, 而 $\boldsymbol{F}$ 的方向不因 q_0 的增大而改变; 若把 q_0 换成等量异号电荷, 则力的大小不变, 方向相反. 因此, 对于电场中任意一个确定点来说, 比值 $\boldsymbol{F}/q_0$ 是一个无论大小和方向都与试验电荷无关的矢量, 它是反映电场本身性质的. 我们把该比值定义为电场强度, 简称场强, 用 $\boldsymbol{E}$ 表示, 即

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q_0} \quad (9.4)$$

由上式可知, 电场中某点的电场强度是一个矢量, 它的大小等于静止于该点的单位正电荷所受的电场力的大小, 其方向与正电荷在该点所受电场力的方向相同.

在国际单位制中, 电场强度的单位是 $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$, 也可以写作 $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$.

一般来说, 空间各处的电场强度 $\boldsymbol{E}$ 的大小和方向并不相同, $\boldsymbol{E}$ 是空间坐标的

矢量函数. 若 $\mathbf{E}$ 的大小和方向均与空间坐标无关, 则这种电场称为匀强电场.

9.2.3 点电荷和点电荷系的电场强度

1. 点电荷的电场强度

在点电荷 q 激发的电场中任取一点 P (称为场点), 由 q 指向 P 的位置矢量为 $\mathbf{r}$, 根据真空中的库仑定律, 把试验电荷 q_0 放置在 P 点处所受的电场力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \mathbf{r}^0$$

式中, $\mathbf{r}^0$ 是位矢 $\mathbf{r}$ 的单位矢量. 由式 (9.4) 可知, P 点的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (9.5)$$

式 (9.5) 是点电荷在真空中的电场强度的表示式, 它也是计算任意电荷分布所产生的场强的基础. 式 (9.5) 表明, 以点电荷为中心, 以 r 为半径的球面上各点的电场强度的大小均等于 $\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$, 方向如图 9-2 所示.

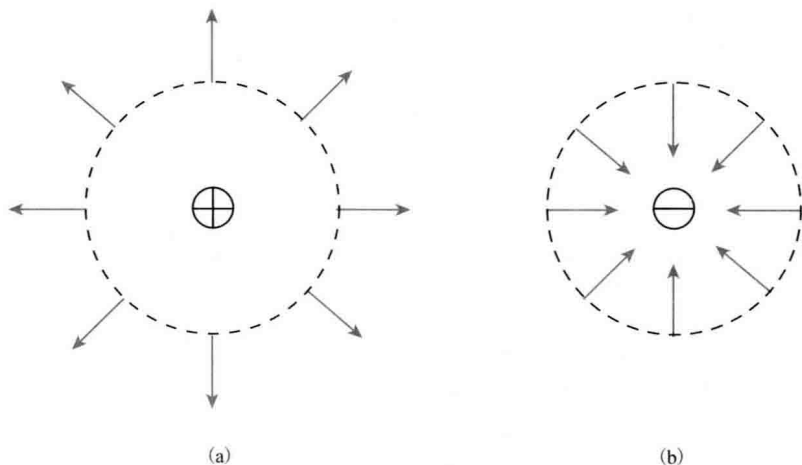


图 9-2 正、负点电荷的场强

2. 点电荷系的电场强度

设电场是由 n 个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 共同激发的, 这些电荷的总体称为电荷系. 根据电场力的叠加原理, 试验电荷 q_0 在点电荷系的电场中任一点 P 所受到的电场力等于各个点电荷单独存在时对 q_0 作用的电场力的矢量和, 即