

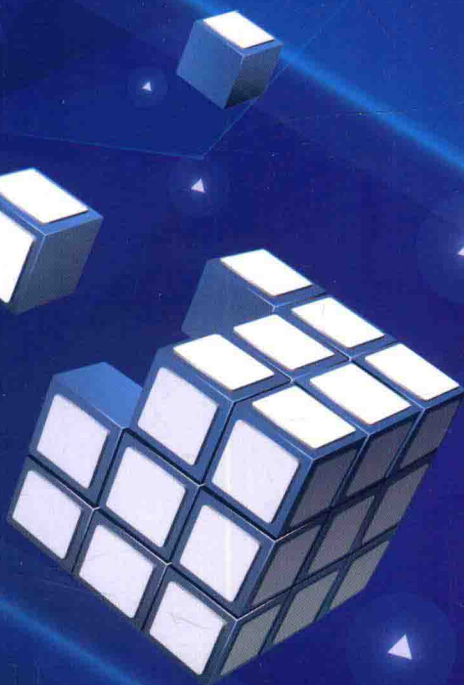


普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理学 (下册)

(第二版)

主 编 孙云卿 雷 雨
副主编 吴明和



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理学

(下册)

(第二版)

主 编 孙云卿 雷 雨

副主编 吴明和

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是根据教育部非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会新制订的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》编写的,并在涵盖基本要求的所有核心内容的基础上,进行了一定广度和深度的拓展和提高,使之既保持了传统教材基础知识扎实的特点,又突出了内容现代化的时代特征.全书分上、下两册,本书为下册,包括电磁学、波动光学和量子论.

本书可作为高等学校理工科非物理类专业本科生教材,也可供相关专业学生选用,并可供社会读者阅读.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下册/孙云卿,雷雨主编.—2版—北京:科学出版社,2017.1
普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-03-051326-7

I. ①大… II. ①孙…②雷… 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(2017)第 000292 号

责任编辑:窦京涛 / 责任校对:贾娜娜

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>

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年4月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年1月第 二 版 印张:24 3/4

2017年1月第八次印刷 字数:498 000

定价:46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

第三篇 电 磁 学

第 10 章 静电学	3
10.1 电场	3
10.2 电场的描述	6
10.3 高斯定理	15
10.4 静电场环路定理	23
10.5 静电场中的导体	33
10.6 电介质	46
10.7 电容和电容器	52
10.8 静电场的能量	54
阅读材料 热电体 压电体 铁电体和驻极体	58
思考题	64
习题	66
第 11 章 静磁学	71
11.1 磁场	71
11.2 磁场的描述	72
11.3 磁场的高斯定理	84
11.4 安培环路定理	85
11.5 运动电荷的磁场	89
11.6 磁场对运动电荷及电流的作用	92
11.7 磁介质	100
11.8 铁磁质	107
阅读材料 磁流体发电	109
思考题	112
习题	115
第 12 章 变化的电磁场	120
12.1 电磁感应定律	120
12.2 动生电动势与感生电动势	123
12.3 自感和互感	133
12.4 磁场能量	140

12.5 位移电流	143
12.6 麦克斯韦方程组	147
12.7 电磁波	150
阅读材料 超导电性和高温超导	155
人物小传 麦克斯韦(Maxwell, 1831~1879)	161
思考题	163
习题	168

第四篇 波动光学

第13章 光的干涉	175
13.1 光波的相干叠加	175
13.2 光程和光程差	178
13.3 双缝干涉实验 * 空间相干性	180
13.4 薄膜干涉	185
13.5 迈克耳孙干涉仪 * 时间相干性	192
阅读材料 光纤通信	194
思考题	199
习题	200
第14章 光的衍射	203
14.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	203
14.2 单缝的夫琅禾费衍射	204
14.3 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	209
14.4 光栅衍射	212
14.5 X射线的衍射	220
14.6 衍射光强的计算机模拟	221
阅读材料 二元光学	226
思考题	231
习题	232
第15章 光的偏振	235
15.1 光的偏振态	235
15.2 偏振片 马吕斯定律	237
15.3 反射和折射时的偏振光	239
15.4 光在晶体中的双折射	242
15.5 偏振光的干涉	247
* 15.6 人工双折射 旋光现象	250
阅读材料 量子光学	252

思考题.....	256
习题.....	258
附录 几何光学.....	260

第五篇 量 子 论

第 16 章 早期的量子论	279
16.1 量子论的提出.....	279
16.2 卢瑟福的原子结构模型.....	281
16.3 爱因斯坦的光量子论.....	283
16.4 固体的比热.....	290
16.5 玻尔的原子量子理论.....	292
16.6 原子能级的实验验证——弗兰克-赫兹实验	301
16.7 康普顿效应.....	303
16.8 激光.....	307
人物小传 普朗克(Planck, 1858~1947)	312
思考题.....	314
习题.....	316
第 17 章 量子力学	318
17.1 物质的波粒二象性.....	318
17.2 不确定关系.....	323
17.3 薛定谔方程.....	327
17.4 一维无限深势阱.....	332
17.5 势垒贯穿.....	335
17.6 氢原子的量子力学处理.....	337
17.7 多电子原子.....	342
17.8 量子力学的理论体系.....	347
阅读材料 量子力学的本性之争.....	348
人物小传 玻尔.....	351
思考题.....	352
习题.....	354
第 18 章 固体的能带结构	355
18.1 晶体与非晶体.....	355
18.2 晶体中电子的能级结构.....	358
18.3 能带理论的主要应用.....	361
18.4 半导体的导电机制.....	363
18.5 半导体二极管.....	365

思考题.....	367
习题.....	367
第 19 章 粒子物理学简介	369
19.1 原子核简介.....	369
19.2 基本粒子分类.....	378
习题.....	382
第 20 章 软物质	383
20.1 什么是软物质.....	383
20.2 液晶.....	384
20.3 聚合物体系.....	387
20.4 胶体.....	389

第三篇 电 磁 学

电磁学是研究电磁现象的产生、运动及规律的学科,即研究电荷、电场与磁场的基本性质和基本规律及其相互联系的科学.它主要包括电现象和电荷相互作用规律的静电学、磁现象和运动电荷间相互作用规律的静磁学及变化电场与变化磁场间相互作用的电磁感应与电磁波三部分内容.

对于电磁现象的定量研究可追溯到 18 世纪库仑(Coulomb)定律的建立,其后由高斯(Gauss)、安培(Ampère)、法拉第(Faraday)等逐步确立了电和磁的各条规律.特别是,1831 年法拉第发现了电磁感应现象及其规律,并提出了场和力线的概念,进一步揭示了电与磁的内在联系.19 世纪中叶,麦克斯韦(Maxwell)在总结前人成果的基础上,再加上他极富创见的关于感应电场和位移电流的假说,建立了以一组电磁场方程为核心的完整的宏观的电磁场理论,称为经典电磁学.经典电磁学不仅可以解释当时所有的宏观的电磁现象,而且还预言了电磁波的存在,并指出光就是一定频率范围内的电磁波.它使人类对宏观电磁现象的认识达到了一个新的高度.麦克斯韦的这一成就就可以认为是从牛顿建立力学理论到爱因斯坦提出相对论的这段时期中物理学史上最重要的理论成果.

随着近代科学技术的发展和应用,经典电磁学理论已经不能解释微观和高速情况下的电磁现象.20 世纪初,量子理论和狭义相对论的诞生将宏观电磁理论推向一个新的台阶,建立了量子电动力学和相对论电动力学,使近代电磁理论的发展在观念上产生了巨大的飞跃.现在电磁理论在工农业生产、科学研究、军事武器、医学工程及日常生活等方面都有着极其广泛的应用.电磁理论已成为人类深入认识物质世界必不可少的基本理论.

作为电磁理论基础,本篇只介绍经典电磁学的内容.首先介绍电场的描述及其规律,再介绍磁场的描述及其规律,最后讨论电场和磁场相互联系的规律——电磁感应和电磁波.

第 10 章 静 电 学

相对于观察者静止的电荷称为静电荷,由静电荷产生的场称为静电场,静止电荷之间的相互作用是通过电场来传递的.本章将介绍静止电荷间的相互作用和静电场的基本性质.

10.1 电 场

10.1.1 电荷

电荷是代表物质间发生电相互作用的一种属性.电荷与质量一样,同物质是不可分的.宏观物体通常是由等量的电子和质子构成的,只有当电子数和质子数的平衡被破坏时,即物体有了多余的电子或质子的情况下才显示出电荷的存在.很早以前,人们就发现有些物体,如玻璃棒和丝绒相互摩擦后,能够吸引轻小物体,这就是经过摩擦物体失去或获得电子而带上了电荷.通过对电荷的各种相互作用和效应的研究,现在认识到电荷的基本性质有以下几个方面.

1. 电荷的正负性

电荷有两种,同种电荷相斥,异种电荷相吸.1750年,美国物理学家富兰克林(Franklin)首先以正电荷、负电荷的名称来区分两种电荷.电子所带电荷为负电荷,质子所带电荷为正电荷,宏观带电体所带电荷种类取决于组成它们的微观粒子所带电荷的正负.

2. 电荷的量子性

电荷的量度称为电荷量,也称为电量.在自然界中,任何电荷的电量总是某一基本单元的整数倍,电荷的这一特性称为电荷的量子性.1897年,汤姆孙(Thomson)发现电子,电子是目前实验观测到的带有最小负电荷的粒子.电荷的基本单元就是一个电子所带电量的绝对值,以 e 表示

$$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$$

C 是电量的 SI 单位,称为库伦.

1913年,密立根(Millikan)进行了油滴实验,大量实验数据证实每个油滴上所带电量总是 e 的整数倍.1964年,盖尔曼(Gell-Mann)首先提出,一些粒子是由称为夸克和反夸克的更小粒子组成,并预计夸克和反夸克的电量应取 $\pm e/3$ 或 $\pm 2e/3$,然而

由于夸克禁闭而未能在实验中检测到单个自由夸克,不过即使得到实验证实,以 $e/3$ 为基本电荷,电荷仍然是量子化的.

3. 电荷的守恒性

实验指出,在一个孤立系统中,系统所具有的正负电荷的电量的代数和总保持不变,这一性质称为电荷守恒定律.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,但正、负电荷总是成对出现或成对消失,电荷守恒并未因此而遭到破坏.例如,一个高能光子与一个重原子核作用时,该光子可以转化为一个正电子和一个负电子(这叫电子对的“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(这叫电子对的“湮灭”).对于宏观带电体的起电、中和、感应和极化等现象,其系统所带电量的代数和也总保持不变.

4. 电荷的相对论不变性

实验证明,一个电荷的电量与它的运动状态无关.例如,加速器将电子或质子加速时,随着粒子速度的变化,它们质量的变化是很明显的,但电量却没有任何变化的迹象,这是电荷与质量的不同之处,这就是说,在不同的参考系中观察,同一带电粒子的电量不变,即粒子的电量与参考系无关,电荷的这一性质称为电荷的相对论不变性.

需要指出,今天人们对电荷的认识还是很不完全的,如不能解释为什么电量 e 能聚集在电子那样小的尺度内,而不会因巨大的斥力而崩溃.

10.1.2 库仑定律

在发现电现象后的 2000 多年的时期内,人们对电的认识一直停留在定性阶段,直到 18 世纪中叶才开始研究电荷之间作用力的定量规律.通过实验,人们发现带电体之间的作用力不仅与带电体的电量及它们之间的距离有关,还与带电体的形状和尺度、电荷的分布及周围介质的性质等有关.为简化问题,当带电体的尺度和形状与带电体间的距离相比可以略去时,就可以将它们视为点电荷.点电荷是电学中的一个理想模型,类似于力学中的质点模型.

最早对电荷间的作用力作定量研究的是法国科学家库仑.库仑在 1785 年通过实验总结出了库仑定律.

在真空中,两个静止点电荷间的相互作用力,其方向沿两个点电荷的连线,同种电荷相斥,异种电荷相吸;其大小与两电荷的电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比.库仑定律可用矢量公式表示为

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (10.1.1)$$

式中, $\mathbf{F}$ 表示 q_2 对 q_1 的作用力; r 表示 q_1 、 q_2 间的距离; $\mathbf{e}_r$ 表示从 q_2 指向 q_1 的单位

矢量(图 10.1.1); k 是比例系数,依公式中各量所选的单位而定.

显然,当 q_1 与 q_2 同号时, $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 同向,表明电荷 q_1 受 q_2 的斥力;当 q_1 与 q_2 异号时, $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 反向,表明电荷 q_1 受 q_2 的吸力.

在 SI 单位中,距离用米(m),力用牛顿(N),电量用库仑(C)作单位,并由实验测得比例系数

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 8.9875 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \quad (10.1.2)$$

式中, ϵ_0 称为真空的介电常量(或真空电容率)

$$\epsilon_0 = 8.854187818 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2) \quad (10.1.3)$$

库仑定律还可表示为

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (10.1.4)$$

库仑定律当时从实验得到 r 的幂为 2,误差约为 10^{-2} . 现代可用更精密的测量方法证实 r 的幂取 2 的误差不超过 10^{-9} , 而且在 r 从 10^{-15} m 到 10^7 m 的范围内都证明库仑定律是正确有效的.

例 10.1.1 氢原子中电子和质子的距离为 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$, 求此二粒子间的静电力和万有引力各为多大.

解 电子的电荷是 $-e$, 质子的电荷是 $+e$, 电子的质量是 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 质子的质量是 $m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

由库仑定律,求得两粒子间的静电力大小为

$$F_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 8.1 \times 10^{-8} (\text{N})$$

由万有引力定律,求得两粒子间的万有引力

$$\begin{aligned} F_g &= G \frac{m_e m_p}{r^2} \\ &= \frac{6.7 \times 10^{-11} \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.7 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 3.7 \times 10^{-47} (\text{N}) \end{aligned}$$

由计算结果可以看出,氢原子中电子与质子的相互作用的静电力远较万有引力大,前者约为后者的 10^{39} 倍. 显然,在微观粒子的相互作用中,万有引力完全可以略去.

10.1.3 电力叠加原理

实验表明,点电荷之间的相互作用力满足叠加性. 当空间存在多个点电荷时,其中某一点电荷受到的静电力等于其余各点电荷单独作用的静电力的矢量和,这一结论称为电力叠加原理.

设有由 n 个静止的点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成的电荷系,其中第 i 个点电荷 q_i 受

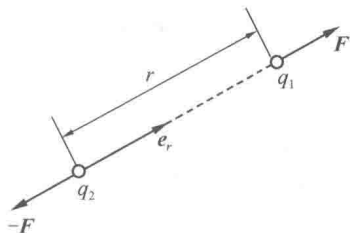


图 10.1.1 电荷间的相互作用

到的静电力

$$\mathbf{F} = \sum_{j \neq i}^n \mathbf{F}_j \quad (10.1.5)$$

式中, $\mathbf{F}_j$ 是第 j 个点电荷对 q_i 的作用力, 由库仑定律式(10.1.4)可得

$$\mathbf{F} = \sum_{j \neq i}^n \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 r_j^2} \mathbf{e}_j \quad (10.1.6)$$

式中, r_j 表示从 q_j 到 q_i 的距离; $\mathbf{e}_j$ 为从 q_j 指向 q_i 的单位矢量.

10.1.4 电场

库仑定律给出了两个静止点电荷之间电相互作用力的定量公式, 但并没有说明这种相互作用是如何通过真空从一个电荷作用于另一个电荷的. 历史上曾经有过两种观点, 一种观点认为无论两电荷相距多远, 它们间的相互作用力是瞬间到达的, 不需要什么中间介质传递, 是一种超距作用. 在 19 世纪 30 年代, 法拉第提出另一种观点, 认为一个电荷周围存在着传递电力的中间物质, 称为电场. 两电荷之间的作用力实际上是一个电荷的场对另一个电荷的作用, 而且电力的传递不是瞬时的. 这种近距离作用方式可以表示为

$$\text{电荷} \longleftrightarrow \text{电场} \longleftrightarrow \text{电荷}$$

近代物理学的理论和实验完全证实了场的观点的正确性. 电场及磁场已被证明是一种客观实在, 它们运动(或传播)的速度是有限的, 这个速度就是光速. 电场、磁场与实物一样具有能量、质量和动量. 场与实物是物质存在的两种不同形式.

通常将产生电场的电荷称为源电荷. 当源电荷静止而且电量不随时间改变时, 它产生的电场称为静电场. 静电场对电荷的作用表现在两个方面: ①场中任何电荷都要受到电场的作用, 这种作用力称为电场力; ②当电荷在电场中移动时, 电场力将对其做功. 下面将根据电场对电荷的作用, 引入两个物理量: 电场强度和电势来研究静电场的性质.

10.2 电场的描述

10.2.1 电场强度

假设有一静止不变的电荷(可以是点电荷、点电荷系或带电体)在空间产生一静电场. 下面根据电场对其他电荷作用的电场力来定量地分析电场. 为此, 在电场中放入一检验电荷 q_0 , 首先, q_0 的电量必须很小, 以避免由于它的引入而对源电荷的分布产生影响; 其次, q_0 的几何尺度也必须很小, 满足点电荷理想模型的要求, 使之能细致地反映出电场中各点的性质.

一般把电场空间中某考察点叫场点. 置于电场某场点上的试验电荷 q_0 将受到电场力 $\mathbf{F}$ 的作用. 实验证明, 比值 $\mathbf{F}/q_0$ 无论大小还是方向都与试验电荷无关, 是一个

仅由场点决定的物理量,用这个物理量作为描写电场的场量,称为**电场强度**(简称场强),通常用 $\mathbf{E}$ 表示场强,其定义是

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (10.2.1)$$

式(10.2.1)表明,电场中某场点上的电场强度等于置于该点的单位正电荷所受的电场力.在静电场中,各场点的场强可能不同,因此 $\mathbf{E}$ 一般是场点坐标的矢量函数,即 $\mathbf{E}(x, y, z)$ 或 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$.

在 SI 单位中,场强的单位为牛顿每库仑(N/C)或伏特每米(V/m).

表 10.1.1 列出了某些带电物体产生的场强值.

表 10.1.1 某些典型的场强值(单位:V/m)

室内电线附近	约 3×10^{-2}	X 光管内	约 5×10^6
地面附近	约 120	氢原子的电子所在处	6×10^{11}
雷雨云附近	约 10^4	脉冲星的表面处	约 10^{14}
电视显像管内	约 2×10^5	铀核的表面处	2×10^{21}
高压电器击穿空气处	约 3×10^6		

10.2.2 电场强度的计算

1. 点电荷的场强

设空间有一静止点电荷 q ,现计算该源电荷产生的场强.设想在距 q 为 r 的场点 P 放置检验电荷 q_0 ,根据库仑定律, q_0 受到的电场力为

$$\mathbf{F} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r$$

式中, $\mathbf{e}_r$ 为从场源电荷 q 指向场点 P 的单位矢量.

由场强定义式(10.2.1), P 点场强为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (10.2.2)$$

这就是点电荷场强分布公式.若 $q > 0$,则 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 同向,即在正电荷周围的电场中,任意点的场强沿该点矢径方向(图 10.2.1(a));若 $q < 0$,则 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 反向,即在负电荷周围的电场中,任意点的场强沿该点矢径的反方向(图 10.2.1(b)).式(10.2.2)还说明静止的点电荷的电场具有球对称性.

2. 电荷离散分布的带电体的场强

若电场是由 n 个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 共同激发的,根据电力叠加原理,放在场点 P 处的试验电荷

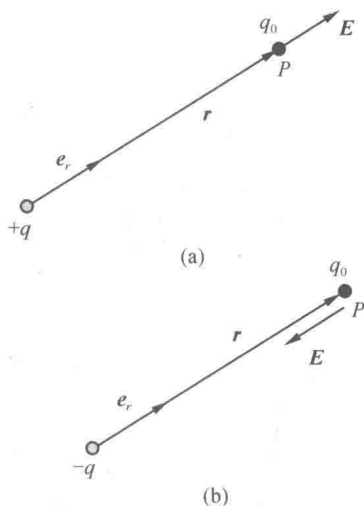


图 10.2.1 静止点电荷的电场

q_0 受到的电场力为

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = \sum_{i=1}^n \frac{q_i q_0}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{e}_i$$

由场强定义式(10.2.1), P 点场强为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{F}_i}{q_0} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{e}_i = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i \quad (10.2.3)$$

式中, r_i 为从 q_i 到场点 P 的距离; $\mathbf{e}_i$ 为从 q_i 指向场点 P 的单位矢量. 式(10.2.3)表明, 点电荷系产生的电场中某点的电场强度等于各个点电荷单独存在时在该点产生的电场强度的矢量和, 这一结论称为**场强叠加原理**. 场强叠加原理似乎是电力叠加原理的推论, 但从场的观点看, 遵从叠加原理应属于电场的-一个基本性质, 正是电场遵从叠加原理才导致电力遵从叠加原理.

3. 电荷连续分布的带电体的场强

如果场点距带电体较近, 带电体就不能作为点电荷处理, 必须考虑带电体本身的尺度和形状. 任何带电体的电荷都是由分立的电子或质子聚集而成, 总是具有不连续的结构, 但由于宏观物体所带电量远远大于电荷单元 e , 可以认为电荷连续地分布在带电体上. 对于电荷连续分布的带电体, 可将其分割为许多线度无限小的电荷元 dq , 而每个电荷元都可以当作点电荷处理. 根据式(10.2.2) 电荷元 dq 在空间场点 P 的场强为

$$d\mathbf{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r$$

式中, r 为从电荷元 dq 到场点 P 的距离; $\mathbf{e}_r$ 为这一方向上的单位矢量. 整个带电体在 P 点所产生的总场强可用积分计算

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (10.2.4)$$

积分遍及整个带电体. 必须指出式(10.2.4)是矢量积分, 只有当所有电荷元 dq 在场点 P 的场强 $d\mathbf{E}$ 的方向相同时, 才能写成标量式直接进行积分. 通常情况下, 各电荷元在场点的场强 $d\mathbf{E}$ 的方向不同, 这时需把矢量积分转换成标量积分. 如在直角坐标系下, 电荷元的电场 $d\mathbf{E}$ 可表示为

$$d\mathbf{E} = dE_x \mathbf{i} + dE_y \mathbf{j} + dE_z \mathbf{k}$$

然后对每个分量进行积分

$$E_x = \int dE_x, \quad E_y = \int dE_y, \quad E_z = \int dE_z$$

于是 P 点的场强

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k}$$

由上述可知, 对于由许多电荷组成的电荷系(带电体)来说, 如果电荷分布为已知, 那么根据场强叠加原理, 并利用点电荷场强公式, 就可求出电场中任意点的场强,

也就是求出电场的空间分布.

例 10.2.1 求电偶极子中垂线上任一点的电场强度.

解 两个大小相等的正负电荷 $+q$ 和 $-q$, 当两者之间的距离 l 比从它们到所讨论的场点的距离小得多时, 这个电荷系统就称为**电偶极子**, 如图 10.2.2 所示. 从负电荷到正电荷的矢径 l 的方向作为轴线的正方向, 电量 q 与矢径 l 的乘积称为**电偶极矩**或**电矩**, 电矩是矢量, 用 p 表示, 即 $p = ql$.

令中垂线上 P 点到电偶极子的中心 O 的距离为 r ($r \gg l$). $+q$ 和 $-q$ 在 P 点所产生的场强 E_+ 和 E_- 的大小分别为

$$E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + l^2/4}, \quad E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + l^2/4}$$

方向分别在 $+q$ 和 $-q$ 到 P 点的连线上, 前者背向正电荷, 后者指向负电荷. 设连线与电偶极子轴线之间的夹角为 α , 可知 P 点的总场强 E_P 的大小为

$$E_P = E_+ \cos\alpha + E_- \cos\alpha$$

因

$$\cos\alpha = \frac{l}{2\sqrt{r^2 + l^2/4}}$$

所以

$$E_P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{(r^2 + l^2/4)^{3/2}}$$

由于 $r \gg l$, 得

$$E_P = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

写成矢量式

$$\mathbf{E}_P = -\frac{\mathbf{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

负号表明电偶极子中垂线上距离电偶极子中心较远处各点的电场强度与电偶极子的电矩方向相反.

例 10.2.2 有一均匀带电直线, 长为 L , 电量为 q , 设线外任一场点 P 离开直线的垂直距离为 a , P 点和直线两端的连线与直线之间的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 , 求 P 点的场强.

解 此类题可按下列步骤求解.

(1) 选定便于计算的坐标系, 确定电荷元. 取坐标如图 10.2.3 所示, 在距原点 O

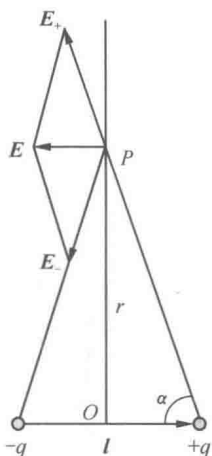


图 10.2.2 电偶极子的电场

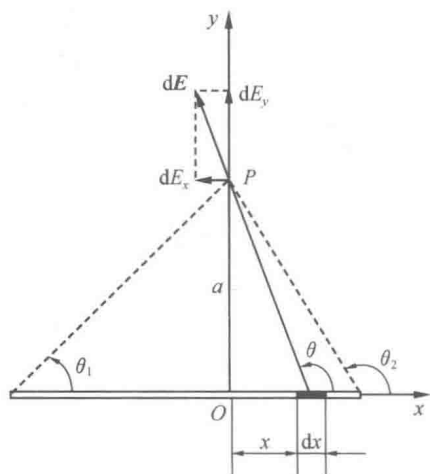


图 10.2.3 例 10.2.2 所建坐标

为 x 处取长为 dx 的线元, 则相应的电荷元

$$dq = \frac{q}{L} dx = \lambda dx, \quad \lambda = \frac{q}{L}$$

(2) 将 dq 作为点电荷, 列出它在 P 点的场强 dE , 其大小

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

不同位置的电荷元在 P 点产生的场强 dE 有不同的方向, 它们在 x 轴和 y 轴的两个分量为

$$dE_x = dE \cos\theta$$

$$dE_y = dE \sin\theta$$

(3) 统一积分变量, 定积分限, 完成积分, 得到所求场强分量

$$E_x = \int dE_x = \int dE \cos\theta = \int \frac{\lambda dx}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos\theta$$

$$E_y = \int dE_y = \int dE \sin\theta = \int \frac{\lambda dx}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sin\theta$$

在上述积分的被积函数中, r 、 θ 和 x 均为变量, 用

$$r = \frac{a}{\sin\theta}, \quad x = -a \cot\theta, \quad dx = \frac{a d\theta}{\sin^2\theta}$$

代入, 将被积函数化简为单一变量函数(这里化为 θ 的函数), 并确定积分限(这里是 θ_1 和 θ_2), 再进行积分, 得到

$$E_x = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \cos\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\sin\theta_2 - \sin\theta_1)$$

$$E_y = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \sin\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

于是 P 点的场强

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j}$$

讨论

(1) 若 $a \ll L$, 即 P 点极其靠近直线, 这时带电直线可看作无限长, 用 $\theta_1 = 0$ 和 $\theta_2 = \pi$ 代入得

$$E_x = 0$$

$$E_y = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 a}$$

(2) 对于 $a \rightarrow 0$, 则有两种情形, 一是 P 点趋(位)于带电直线上, 二是 P 点处于带电直线的延长线上. 这两种情形都不能直接应用上述计算结果. 在第一种情形中得到无限大的场强, 所以是无意义的; 在第二种情形中得不到确定的结果, 必须由