

21世纪高等学校规划教材

湖南省物理学会推荐教材

主编 匡乐满

大学物理 (第二册)

DAXUE WULI



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

21 世纪高等学校规划教材
湖南省物理学会推荐教材

大学物理

(第二册)

主 编 匡乐满

副主编 罗益民 王振华 章湘平



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内容简介

本书是为适应当前教学改革的需要,根据教育部高等学校非物理专业物理基础课程教学指导分委员会在2004年12月审订的“非物理类理工学科学物理课程教学基本要求”,结合编者多年的教学实践和教改经验编写而成的教材。

全书分三册,共20章,其中经典物理内容占15章。教材编写力求简明凝练,内容的深度、难度适中,理论讲解追求够用、实用。同时本教材针对各学校及不同专业对物理知识要求的差异作了适当的安排,以适合他们不同的要求。

本书可作为高等学校非物理专业大学物理课程的教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.第二册/匡乐满主编. —北京:北京邮电大学出版社,2007

ISBN 978-7-5635-1582-0

I. 大… II. 匡… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第177379号

书 名 大学物理(第二册)
主 编 匡乐满
责任编辑 沙一飞
出版发行 北京邮电大学出版社
社 址 北京市海淀区西土城路10号(100876)
电话传真 010-62282185(发行部) 010-62283578(传真)
电子信箱 ctrd@buptpress.com
经 销 各地新华书店
印 刷 北京忠信诚胶印厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 17.75
字 数 385千字
版 次 2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-1582-0

定 价(一、二、三册):74.00元

(本册):26.00元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

本书是为适应当前教学改革的需要,根据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会在 2004 年 12 月审订的“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”,结合编者多年的教学实践和教学改革经验编写而成的.具有如下四个特点:

1. 简明 本教材力求文字简明凝练,内容精细紧凑.对某些专业需要可单独自行增补,而大多数学校又没有时间讲授的内容,如非线性物理,电、磁场的边界条件,电、磁场的相对性,色散、波包等,没有编入教材.这样处理,并不影响普通物理知识内容和体系的完整性.

2. 适中 本教材与其他同类教材相比,在内容的深度、难度上也作了适当地调整.主要表现为:一、在对矢量性和相对性的要求上作了适中的选择.例如在力学中,我们仍然引入“相对运动”以描述运动的相对性,但并不在动力学中的相关部分深化该问题的讨论;对“矢量性”只是作为物理概念讲述清楚,而不是刻意用矢量的方法去解算一些偏难的习题.二、对于数学工具的运用,在保证基本要求的前提下,尽量避免繁杂的数学推演.如在量子物理部分,教材不要求解算二元偏微分方程,而重在讨论方程解算的思路和理解解算结果的物理意义;对于例题和习题则尽量少编入偏难、偏深和思路奇特的内容.

3. 实用 本教材的编写原则是:精讲经典,加强近代,选讲现代.经典物理是工科各专业后续课程的必备基础知识,必须讲透,讲够.以篇幅而言,教材编有 20 章,其中经典内容占有 15 章.以训练而言,例题和习题也集中在经典部分.对于近代物理部分,主要是突出相对论的时空观和量子思想.除了讲清这些物理理论知识,注重启迪思维外,还引导学生学习前辈科学家勇于创新的进取精神.对于现代物理部分采取专题选讲的形式,重点在为高新科技的生长点打基础,突出物理理论与高新技术的结合.总之,教材编写的目标是:围绕基础,加粗主干,重在实用,重在基本训练,重在为后续课程打基础.因此在每章均列有内容提要 and 典型例题汇编为第三册.

4. 兼容 本教材的编写中,既考虑到物理体系的完整性和系统性,又要尽量考虑到各类学校及不同专业对物理知识要求的差异.因此在某些章节的内容前面加了“*”号,教师可以根据学校课程设置、教学专业特点和教学时数来取舍,也可以跳过这些带*号的内容,而不会影响

整个体系的完整性和系统性.教材即“一剧之本”满足教师在授课“舞台”有据可依的需要,又为教师提供了个性发挥的空间.

本教材由匡乐满教授主编,参加编写与讨论的人员有罗维治、黎培德、杨友田、龚志强、罗益民、赵近芳、王振华、付茂林、吴烨、孙越胜、吴松安、方家元、黄小益、蔡新华、曾爱华、唐英、卢卯旺、卢德华、游开明、章湘平、刘朝辉、李玉珍、邓曙光、施毅敏、陈昌永、唐世洪、黄祖洪、王瑜、蒋练军、荆继良、李科敏、孔永红、陈雪娟、刘琼等.全书编写过程中,得到了北京邮电大学出版社的大力支持,他们组织各高校教师和湖南省物理学会的专家、同行与参编人员进行了多次讨论,提出了许多宝贵的意见和建议;更得到了中南大学、湖南大学、湖南师范大学、湘潭大学、长沙理工大学、南华大学、湖南科技大学、中南林业科技大学、湖南工业大学等高校物理老师的帮助和指导,编者在此一并表示衷心的感谢.

由于我们水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正.

编 者

2007 年 11 月

目 录

第三篇 电磁学

第 8 章 真空中的静电场	(2)
§ 8.1 电场强度	(2)
§ 8.2 静电场中的高斯定理	(12)
§ 8.3 静电场的环路定理 电势	(19)
§ 8.4 等势面 电场强度和电势梯度的关系	(26)
习题	(29)
第 9 章 静电场中的导体和电介质	(31)
§ 9.1 静电场中的导体	(31)
§ 9.2 静电场中的电介质	(37)
§ 9.3 电位移矢量 电介质中的高斯定理	(41)
§ 9.4 电容 电容器	(43)
§ 9.5 静电场的能量	(46)
* § 9.6 压电效应 铁电体 驻极体	(50)
习题	(53)
第 10 章 稳恒磁场	(55)
§ 10.1 电流 电流密度	(55)
§ 10.2 磁场 磁感应强度 磁场中的高斯定律	(57)
§ 10.3 毕奥-萨伐尔定律及其应用	(60)
§ 10.4 安培环路定理	(67)
§ 10.5 磁场对运动电荷和载流导线的作用	(72)
§ 10.6 磁力的功	(87)
习题	(89)
第 11 章 磁场中的磁介质	(93)
§ 11.1 磁介质的分类	(93)
§ 11.2 顺磁质与抗磁质的磁化	(94)

§ 11.3 磁场强度 磁介质中的安培环路定理	(95)
§ 11.4 铁磁质	(99)
习题	(103)
第 12 章 电磁感应 电磁场	(104)
§ 12.1 电磁感应的基本定律	(104)
§ 12.2 动生电动势	(107)
§ 12.3 感生电动势和感生电场	(110)
§ 12.4 自感应 互感应	(115)
§ 12.5 磁场的能量	(119)
§ 12.6 位移电流和全电流定律	(122)
§ 12.7 麦克斯韦方程组	(126)
§ 12.8 电磁波	(127)
§ 12.9 电磁场的物质性	(133)
习题	(136)

第四篇 光学

第 13 章 光的干涉	(143)
§ 13.1 光源 光的相干性	(143)
§ 13.2 分波阵面干涉	(146)
§ 13.3 分振幅干涉	(153)
§ 13.4 迈克耳孙干涉仪	(160)
* § 13.5 光的时间相干性和空间相干性	(162)
习题	(167)
第 14 章 光的衍射	(170)
§ 14.1 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理	(170)
§ 14.2 单缝夫琅禾费衍射	(172)
§ 14.3 衍射光栅	(177)
§ 14.4 圆孔衍射 光学仪器的分辨率	(184)
§ 14.5 X 射线的衍射	(187)
* § 14.6 全息照相	(189)
习题	(194)
第 15 章 光的偏振	(196)
§ 15.1 自然光和偏振光	(196)
§ 15.2 起偏和检偏 马吕斯定律	(199)
§ 15.3 反射光与折射光的偏振 布儒斯特定律	(201)
§ 15.4 光的双折射	(204)

* § 15.5 偏振光的干涉	(205)
* § 15.6 旋光现象	(207)
习题	(208)

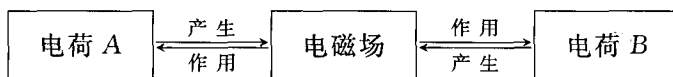
第五篇 量子物理基础

第 16 章 量子力学基础	(211)
§ 16.1 热辐射和普朗克量子假设	(211)
§ 16.2 光电效应 爱因斯坦光子假设	(215)
§ 16.3 康普顿效应	(218)
§ 16.4 玻尔的氢原子理论	(221)
§ 16.5 德布罗意的物质波假设 波粒二象性 不确定关系	(225)
§ 16.6 波函数及其统计意义 薛定谔方程	(230)
§ 16.7 一维无限深势阱 一维谐振子 一维势垒 隧道效应	(235)
§ 16.8 氢原子的量子理论	(239)
§ 16.9 电子自旋 原子的壳层结构	(241)
习题	(245)
第 17 章 激光和固体物理简介	(247)
§ 17.1 激光原理	(247)
§ 17.2 固体的能带结构	(254)
§ 17.3 半导体	(259)
§ 17.4 超导电性	(263)
习题	(269)
部分习题参考答案	(270)

第三篇 电磁学

电磁运动是物质的一种重要运动形式,电磁相互作用是物质间四种基本相互作用之一,电磁力是原子得以存在的基础,研究电磁现象及其规律的学科称为电磁学.电磁学理论不仅普遍应用于科学技术各个领域,而且已日益成为新技术的理论基础.

两个静止电荷之间存在电力,两个运动电荷间存在电力和磁力.关于这些相互作用力的产生机制,历史上曾有过“超距作用”的观点,即认为电磁力可以超越空间任何距离,无需中间传递媒质,也不需要传递时间.然而,随着科学技术的发展,这种观点逐步为近距作用观点所代替,近距作用观点认为:电磁相互作用力和其他相互作用力一样,既需要传递媒质,也需要传递时间.电荷在其周围空间激发电磁场,以电磁场为媒质和周围空间的其他电荷发生相互作用,这种相互作用以光速在电磁场中传播,其作用方式如下:



本篇将在实验事实的基础上,分别建立静电场、稳恒磁场和交变电磁场的描述体系,研究电磁场的产生、传播和相互作用规律.

第8章 真空中的静电场

相对于观察者静止的电荷所产生的电场称为**静电场**(electrostatic field), 电场强度和电势是描述电场性质的两个物理量, 库仑定律是静电场的基本实验定律. 本章从库仑定律出发, 导出静电场的高斯定理和环路定理, 并阐明静电场是有源场和保守场(无旋场). 其主要内容有: 库仑定律、电场及电场强度、高斯定理、环路定理、电势以及电场强度和电势梯度的关系等.

§ 8.1 电场强度

一、电荷及其性质

自然界只存在两种电荷——正电荷和负电荷, 且同种电荷互相排斥, 异种电荷互相吸引. 在正常状态下, 物体内部正负电荷量值相等, 对外不显电性, 称为**电中性**(electric neutrality), 使物体带电的过程就是使它获得或失去电子(electron)的过程, 获得电子的物体带负电, 失去电子的物体带正电. 因此, 物体带电的过程实际上就是把电子从一个物体(或物体的一部分)转移到另一个物体(或物体的另一部分)的过程.

实验表明, 在一个与外界没有电荷交换的系统内, 正负电荷的代数和在任何物理过程中保持不变, 称为**电荷守恒定律**(law of conservation of charge). 它是物理学中最普遍的规律之一. 电荷守恒定律表明, 电荷既不能被创造, 也不能被消灭.

1913年, 密立根(R. A. Millikan)用油滴法测定了电子的电荷, 首先从实验上证明了微小粒子带电量的变化是不连续的, 它只能是某个基元电荷 e (电子或质子所带电量)的整数倍, 这称为**电荷量子化**(charge quantization). 通常, 由于宏观带电体所带电量都远远大于 e , 电荷的量子性显现不出来, 因此可认为电荷的变化是连续的. 近代物理从理论上预言基本粒子由若干种夸克(quark)或反夸克(antiquark)组成, 每一个夸克或反夸克可能带有 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的电量. 然而, 单独存在的夸克, 至今尚未在实验中发现.

实验还表明: 一个电荷的电量与其运动状态无关. 例如在不同的参考系中观察, 同一带电

粒子的运动速度可能不同,但其电量不变.电荷的这一特性叫做电荷的相对论不变性(relative invariance of electric charge).

二、库仑定律

点电荷间相互作用的基本规律,称为库仑定律(Coulomb law),可表述如下:真空中两个静止的点电荷之间的作用力(称为静电力),与它们所带电量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比,作用力的方向沿着这两个点电荷的连线.其数学表达式为

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0$$

式中, k 为比例系数, $\mathbf{r}_0 = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}}$ 为 q_1 和 q_2 连线方向上的单位矢量(见图8-1), $\mathbf{F}_{12}$ 表示 q_2 对 q_1 的静电力, $\mathbf{F}_{21}$ 表示 q_1 对 q_2 的静电力.在国际单位制中, $k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$.通常引入另一常数代替 k ,两者关系为

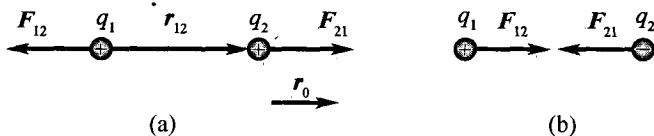


图 8-1 两个点电荷之间的作用力

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

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

ϵ_0 称为真空中的介电常量(dielectric constant)或真空电容率,于是,真空中的库仑定律可写成

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0$$

若 q_1 和 q_2 同号,则 $\mathbf{F}_{21}$ 与 $\mathbf{r}_0$ 的方向相同,说明同种电荷互相排斥;若 q_1 与 q_2 异号,则 $\mathbf{F}_{21}$ 与 $\mathbf{r}_0$ 方向相反,说明异种电荷互相吸引.

点电荷 q_1 和 q_2 间的静电力实质上是电场力,传递静电力的中间物质即为静电场.由 q_1 产生的电场对 q_2 施加电场力 $\mathbf{F}_{21}$,由 q_2 产生的电场对 q_1 施加电场力 $\mathbf{F}_{12}$.通常,略去下标,而将库仑定律写为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r} \quad (8-1)$$

在库仑定律中以 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 代替 k ,虽然库仑定律的形式因出现 4π 因子而略显复杂,但可使由库仑定律导出的其他公式(如高斯定理)不含 4π 而变得简单.

三、电场强度

1. 电场强度的定义

电荷的周围存在电场, 电场有强弱、方向的不同, 为定量地描述电场, 需要引入一个物理量, 该物理量能同时反映电场的强弱和方向。

把试验点电荷 q_0 放在电场中不同位置, 不管 q_0 的符号和大小如何变化, 比值 F/q_0 是一个确定的常矢量。一般说来, 当 q_0 的位置改变时, 该矢量的大小和方向也随之改变。我们用矢量 F/q_0 来定量描述电场的性质, 称为电场中各点的电场强度 (electric field intensity), 简称场强, 用 E 表示, 即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (8-2)$$

由 (8-2) 式可知, 在电场中每一点, 可引入一个可观测量电场强度 E , 其量值等于单位电荷在该处所受到的电场力, 方向与正电荷在该处所受的电场力方向相同。

如果电场中各点场强大小和方向都相同, 则该电场称为匀强电场。一般情况下, 电场中的不同点, 其场强的大小和方向各不相同, 要整体地描述电场, 必须知道空间各点的场强分布, 即 $E = E(x, y, z)$, 故场强 E 是空间的点函数。

2. 场强叠加原理

若空间电场是由 n 个分立的点电荷激发的, 将试验电荷 q_0 放在电场中的任一点, 根据力的叠加性, 它所受到的电场力 F 可表示为

$$F = F_1 + F_2 + \cdots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i$$

式中 $F_1, F_2, \cdots, F_n$ 分别是 $q_1, q_2, \cdots, q_n$ 单独存在时施于 q_0 的电场力。根据场强的定义, q_0 所在处的场强

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{F_1}{q_0} + \frac{F_2}{q_0} + \cdots + \frac{F_n}{q_0} = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{q_0}$$

上式右边各项分别为各点电荷单独存在时在 q_0 所在处产生的场强 $E_1, E_2, \cdots, E_n$, 则

$$E = E_1 + E_2 + \cdots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i \quad (8-3)$$

(8-3) 式说明, 一组点电荷所激发的电场中某点的电场强度等于各点电荷单独存在时在该点激发的电场强度的矢量和, 这一结论称为场强叠加原理 (superposition principle of electric field)。

3. 场强的计算

如果已知电荷的分布,根据场强叠加原理,从点电荷的场强公式出发,原则上可求出电场中各点的场强分布.下面讨论几种不同的情况.

(1) 点电荷的场强

在真空中有一点电荷 q , 设在该电荷产生的电场中的任意位置 P 处放置一试验电荷 q_0 , 按照库仑定律, q_0 所受的力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \mathbf{r}_0$$

根据定义, q_0 处的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8-4)$$

若 $q > 0$, $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{r}_0$ 同向; 若 $q < 0$, $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{r}_0$ 反向, 如图 8-2 所示.

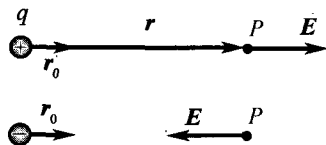


图 8-2 点电荷电场中场强的方向

由(8-4)式可知, r 相同的点, $\mathbf{E}$ 的大小相等, 说明点电荷的电场具有球对称性, 方向沿半径方向.

(2) 点电荷系的场强

若真空中场强是由 n 个点电荷所共同产生的, P 点为电场中的任一点, 各点电荷到 P 点的矢径分别为 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n$, 根据场强叠加原理可得 P 点场强

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_{i0} \quad (8-5)$$

上式为矢量求和, 计算较为复杂, 具体运算时, 通常采用分量式

$$E_x = \sum_{i=1}^n E_{ix}, E_y = \sum_{i=1}^n E_{iy}, E_z = \sum_{i=1}^n E_{iz} \quad (8-6)$$

(3) 任意带电体的场强

若不能将带电体视为点电荷时, 我们可以认为该带电体是由许多无限小的电荷元组成的, 每个电荷元都可当作点电荷处理.

电荷元 dq 在场中任一点 P 产生的场强为

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r}$$

P 点总场强为组成该带电体的所有 dq 在该点产生的场强矢量和, 即

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} \quad (8-7)$$

上式为矢量积分, 具体运算时, 通常采用投影的方式, 先求得 $\mathbf{E}$ 的各方向分量

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

最后得总场强为

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

(8-7)式中, dq 的计算视电荷分布而定, 若电荷连续均匀分布在一体积内, 其体密度为 ρ , 则 $dq = \rho dV$. 同理, 若电荷连续分布在一平面或曲面上, 则 $dq = \sigma dS$; 若电荷连续分布在一条细长线上, 则 $dq = \lambda dl$. 其中 σ, λ 分别为电荷面密度和线密度.

例 8-1 两个等值异号的点电荷 $+q$ 和 $-q$ 组成的点电荷系, 当它们之间的距离 l 比所讨论问题中涉及的距离小得多时, 这一对点电荷称为电偶极子(electric dipole), 由负电荷 $-q$ 到正电荷 $+q$ 的矢量 $\mathbf{l}$ 称为电偶极子的轴. q 与 $\mathbf{l}$ 的乘积称为电偶极矩, 简称电矩(electric moment), 用 $\mathbf{p}$ 表示, 即 $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$.

下面我们来计算电偶极子轴延长线上的 A 点和轴中垂线上的 B 点的场强.

解 选取如图 8-3 所示的坐标, O 为电偶极子轴的中点, 先计算 A 点的场强, 设由 O 到 A 的距离为 r , 点电荷 $+q$ 和 $-q$ 在 A 点产生的场强大小分别为

$$E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r - \frac{l}{2})^2}$$

$$E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r + \frac{l}{2})^2}$$

E_+ 的方向沿 x 轴正向, E_- 的方向沿 x 轴负向, 所以 A 点的总场强大小为

$$\begin{aligned} E_A &= E_+ - E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{(r - \frac{l}{2})^2} - \frac{1}{(r + \frac{l}{2})^2} \right] \\ &= \frac{2qrl}{4\pi\epsilon_0 r^4 (1 - \frac{l}{2r})^2 (1 + \frac{l}{2r})^2} \end{aligned}$$

因为 $r \gg l$, 故

$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}$$

E_A 的方向沿 x 轴正向, 与电矩 $\mathbf{p}$ 的方向相同. 故上式可用矢量表示

$$\mathbf{E}_A = \frac{\mathbf{p}}{2\pi\epsilon_0 r^3} \quad (8-8)$$

下面计算 B 点的场强, 由 O 到 B 的距离仍用 r 表示, 则点电荷 $+q$ 和 $-q$ 在 B 点产生的场强大小分别为

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

其方向如图 8-3 表示, 根据场强叠加原理, B 点的总场强 $\mathbf{E}_B = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-$. 因 $\mathbf{E}_+, \mathbf{E}_-$ 方向不同, 可先将 $\mathbf{E}_+$ 和 $\mathbf{E}_-$ 分别投影到 x, y 方向后再叠加. 由于对称性, $\mathbf{E}_+$ 和 $\mathbf{E}_-$ 的 y 方向分量大小相等、方向相反, 故 B 点总场强在 x 和 y 方向的分量值分别为

$$E_x = E_{+x} + E_{-x} = 2E_{+x} = 2E_+ \cos\theta$$

$$E_y = E_{+y} - E_{-y} = 0$$

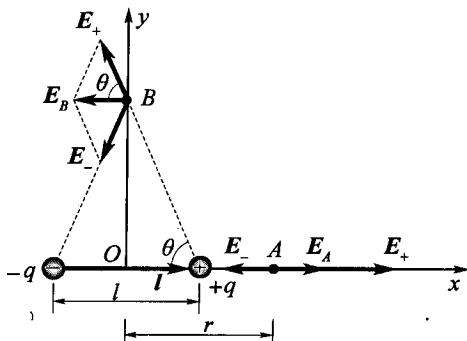


图 8-3 电偶极子的场强

式中, θ 是 B 点与电荷连线和电偶极子轴的夹角

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

所以

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

$$\approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}$$

考虑到 E_B 的方向沿 x 轴负向, 即与电矩 p 的方向相反. 可将上式写成矢量式

$$E_B = -\frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (8-9)$$

以上计算表明, 电偶极子的场强与电矩 p 的大小成正比, 与距离 r 的三次方成反比.

电偶极子的物理模型, 在后面研究电介质极化、电磁波发射时都要用到.

例 8-2 真空中有一均匀带电直线长为 L , 总电量为 q , 试计算距直线距离为 a 的 P 点的场强. 已知 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 , 如图 8-4 所示.

解 选取如图 8-4 所示的坐标轴, 在直线上距原点 O 为 x 处取一线元 dx , dx 上的元电荷 $dq = \lambda dx$, $\lambda = q/L$. 设 P 点到 dq 的距离为 r , 则 dq 在 P 点产生的场强 dE 的大小为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{r^2}$$

dE 的方向如图 8-4 所示, dE 与 x 轴正向夹角为 θ , 直线上各 dq 在 P 点产生的 dE 的方向不同, dE 沿 x 轴和 y 轴方向的分量分别为

$$dE_x = dE \cos\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{r^2} \cos\theta$$

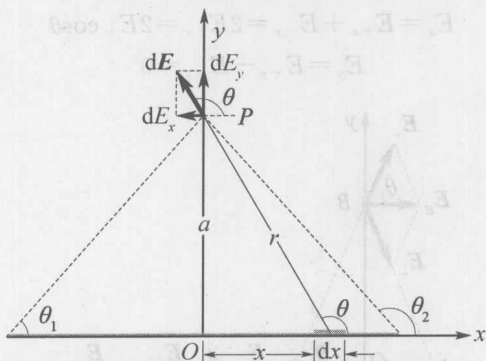


图 8-4 均匀带电直线外任一点的场强

$$dE_y = dE \sin \theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{r^2} \sin \theta$$

式中 r 、 θ 、 x 都是变量, 为便于积分, 统一选取 θ 为变量, 由图中几何关系可知

$$x = a \tan(\theta - \frac{\pi}{2}) = -a \cot \theta$$

$$dx = a \csc^2 \theta d\theta$$

$$r^2 = a^2 + x^2 = a^2 (1 + \cot^2 \theta) = a^2 \csc^2 \theta$$

所以

$$dE_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \cos \theta d\theta$$

$$dE_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \sin \theta d\theta$$

将以上两式分别积分得

$$\begin{aligned} E_x &= \int dE_x = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \cos \theta d\theta \\ &= \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \end{aligned} \quad (8-10)$$

$$\begin{aligned} E_y &= \int dE_y = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \sin \theta d\theta \\ &= \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \end{aligned} \quad (8-11)$$

最后由 E_x 和 E_y 求出总场强 E 的大小和方向, 请读者自己完成.

如果带电直线为无限长, 或者 P 点离直线的距离很近, 即 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi$, 代入 (8-10) 和 (8-11) 式可得

$$E_x = 0$$

$$E = E_y = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 a} \quad (8-12)$$

当 $\lambda > 0$ 时, 则 $E_y > 0$, E 的方向垂直带电直线向外; 当 $\lambda < 0$ 时, 则 $E_y < 0$, E 的方向垂直带电直线向里.

例 8-3 真空中有一均匀带电圆环, 环的半径为 R , 带电量为 q , 试计算圆环轴线上任一点 P 的场强.

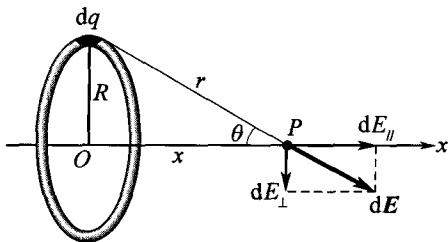


图 8-5 均匀带电圆环轴线上的场强

解 取环的轴线为 x 轴, 轴上 P 点离环心的距离为 x , 如图 8-5 所示. 在环上取线元 dl , 它与 P 点距离为 r , 所带电量为

$$dq = \lambda dl = \frac{q}{2\pi R} dl$$

电荷元 dq 在 P 点产生的场强 dE 的大小为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{2\pi R} \frac{dl}{r^2}$$

方向如图 8-5 所示. 将 dE 分解为平行于 x 轴的分量 $dE_{\parallel}$ 和垂直于 x 轴的分量 $dE_{\perp}$, 根据对称性, 同一直径两端相等的电荷元在 P 点产生的场强在垂直于 x 轴方向的分量大小相等, 方向相反, 故互相抵消, 所以 P 点总场强的方向一定沿环的轴线, 其大小等于环上所有电荷元在 P 点产生的场强在平行于 x 轴方向的分量之和, 即

$$E = \int dE_{\parallel} = \int dE \cos\theta = \oint \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{2\pi R} \frac{dl}{r^2} \cos\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \cos\theta$$

从图中几何关系可知 $\cos\theta = \frac{x}{r}$, $r = (R^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}$, 代入上式得

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qx}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (8-13)$$

当 $q > 0$ 时, E 的方向沿 x 轴正向; 当 $q < 0$ 时, E 的方向沿 x 轴负向.

从 (8-13) 式可以看出, 当 $x=0$ 时, 即在圆环中心处, $E=0$, 这是因为圆环上每一电荷元在环中心产生的场强相互抵消的结果. 当 $x \gg R$ 时, $x^2 + R^2 \approx x^2$, $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{x^2}$, 这正是点电荷场强公式, 这时可以把带电圆环视为一个点电荷, 这正反映了点电荷概念的相对性.

例 8-4 真空中有一均匀带电圆盘, 半径为 R , 所带电量为 q , 试计算圆盘轴线上任一点的场强.