普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理学

（下册）

王玉国　康山林　赵宝群　主编

科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理学

（下册）

王玉国　康山林　赵宝群　主编

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书是根据教育部《高等教育教学内容和课程体系改革计划》和高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求(2010 版)》的基本精神,并结合国内外非物理类尤其是工科物理教材改革动态和编者多年的教学实践经验编写而成的.全书分为上、下两册,上册包括力学基础、振动与波动、热学等内容;下册包括电磁学、波动光学、近代物理等内容.本书内容注意联系生活实际,突出工程特色,注重介绍物理学的思想方法、物理学在工程技术中的应用等内容,尽力反映物理学前沿和相关新技术的发展情况,努力使教材内容系统化和现代化.

本书可作为高等工科院校各专业的大学物理教材,也可作为一般读者了解基础物理理论与物理学工程技术应用的参考书.为方便教学,本书配有内容生动的多媒体教学课件和电子版的习题详细解答.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学:全 2 册/王玉国,康山林,赵宝群主编. —北京:科学出版社,2013.1

普通高等教育"十二五"规划教材

ISBN 978-7-03-036609-2

Ⅰ.①大… Ⅱ.①王…②康…③赵… 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(2013)第 019090 号

责任编辑:昌 盛/责任校对:彭 涛
责任印制:阎 磊/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

铭浩彩色印装有限公司 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2013 年 1 月第一次印刷 印张:34 1/4
字数:871 000

定价:59.00 元(上下册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目　录

第四篇　电　磁　学

第五篇 波动光学

第六篇　近代物理

第四篇 电 磁 学

人们对电磁现象的认识是非常早的，可以追溯到公元前六世纪．但是，对于电磁现象的定量研究是从 18 世纪（1785 年）库仑定律的建立开始的．在 18 世纪末期，通过库仑、卡文迪什、高斯、泊松等的努力，建立了比较完整的静电学理论．人类对磁现象的认识最初来源于磁铁，在地面上自由状态的磁铁总是指向南北方向，可以用来确认方向．指南针是我国古代四大发明之一．最初人们曾经认为电现象和磁现象是相互独立的，直到 1819 年，奥斯特通过实验发现了电流的磁效应，1820 年安培提出分子电流的假设，解释了磁铁的磁性，确立了磁性起源于电流的观点，人们逐渐认识到电与磁在现象上是相互关联的，在本质上是相互统一的．1831 年，法拉第发现电磁感应定律，对电与磁的相互联系开始了定量的研究．法拉第最先提出了电场和磁场的观点，认为电力和磁力都是通过场作用的，使人们对电磁现象有了更为深刻的认识．在众多物理学家工作的基础之上，麦克斯韦终于在 1865 年建立了电磁场基本方程，从而使电磁学形成一个完美的理论体系．麦克斯韦从理论上预言了电磁波的存在，并且指出光也是一种电磁波，从而使光学成为电磁学的组成部分．

电磁学理论在日常生活和工程技术中的应用非常广泛，许多自然现象都与电磁学有关，需要应用电磁学理论进行研究和解释．法拉第电磁感应定律和安培定律是发电机和电动机原理的理论基础，打开了人类进入电气化时代的大门；电磁波的发现导致了无线电通信技术的发展，将人类带入了电信时代．电力技术和无线电技术的发展和应用作为第二次工业革命的标志，在人类文明发展进程中起到了巨大的推进作用．在科学技术迅猛发展的今天，各个专业领域都离不开电磁学，学习电磁学理论对于学习专业技术和提高科学素质是非常重要的．

本篇将系统介绍电磁学的基本理论．在第 10 章讨论真空中静电场的基本理论；第 11 章讨论导体和电介质（绝缘体）的静电性质；第 12 章讨论稳恒磁场的基本理论；第 13 章讨论电磁感应；第 14 章讨论电磁场和电磁波的基本理论．

第 10 章　真空中的静电场

在带电体周围都存在电磁场，相对于观察者静止的电荷激发的电场叫做静电场. 本章只讨论真空中的静电场的基本规律，从电场对电荷的作用力即电场力以及电荷在电场中移动时电场力对电荷做功两个方面引入电场强度和电势这两个描述电场特性的物理量，介绍反映静电场基本特性的电场强度叠加原理、高斯定理和静电场的环路定理等内容.

10.1　库仑定律

10.1.1　电荷

1. 电荷

电荷表示物质的带电属性. 大量实验表明自然界中只有两种电荷，1750 年美国物理学家富兰克林(B. Franklin)首先将其命名为正电荷和负电荷. 实验表明，同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引. 一般地说，使物体带电就是使它获得多余的电子或从它取出一些电子. 带电体所带电荷的多少称为电量，电量是电荷多少的量度，电量的单位为库仑(C).

2. 电荷守恒定律

由摩擦生电的实验发现，当一种电荷出现时，必然有相等量值的异号电荷同时出现；一种电荷消失时，必然有相等量值的异号电荷同时消失. 电荷既不能创生，也不会消灭，只能从一个物体转移到另一个物体，或从物体的这一部分转移到另一部分.

在孤立系统中，无论其中的电荷如何迁移，也无论发生什么样的物理过程，系统的电荷的总量保持不变. 这称为**电荷守恒定律**.

3. 电荷量子化

在自然界中所观察到的电荷均为基本电荷 e 的整数倍，即 $q=\pm ne(n=1,2,3,\cdots)$. 电荷的这种只能取分立的、不连续量值的特性称为**电荷的量子化**. 直到现在还没有足够的实验来否定这个规律. 当所讨论的宏观现象中所涉及的电荷比 e 大得多时，可认为电荷连续地分布在带电体上，忽略电荷的量子性所引起的微观起伏.

1897 年汤姆逊(J.J. Thomson)发现了电子(electron). 1913 年密立根(R. A. Millikan，1868～1953)设计了著名的油滴试验，直接测定了基本电荷的量值. 即一个电子所带电量的绝对值 $e=1.602\times10^{-19}$C.

基本粒子带电都是正的(或负的)基本电荷的整数倍,微观粒子所带的基元电荷数常称为它们各自的电荷数,都是正整数或负整数.

近代物理从理论上预言基本粒子由若干种夸克或反夸克组成,每一个夸克或反夸克带有$\pm\frac{1}{3}e$或$\pm\frac{2}{3}e$的电量. 至今尚未从实验中直接发现单独存在的夸克或反夸克.

4. 电荷的运动不变性

大量实验表明,一切带电体的电量不因其运动而改变,即**系统所带电荷与参考系的选取无关**. 电荷的这一性质称为**电荷的运动不变性**.

10.1.2 库仑定律

1. 点电荷

当一个带电体本身的线度比所研究的问题中所涉及的距离小得多时,这个带电体的大小和形状可忽略不计,该带电体就可称为**点电荷**. 也是一种理想化的物理模型. 具有相对意义,本身不一定是很小的带电体. 正像力学中所有宏观物体都可以看成质点的集合一样,任何带电体都可以看成是点电荷的集合.

2. 真空中的库仑定律

带电体之间的相互作用力称为电力,法国科学家库仑(Coulomb,1736~1806)通过实验总结出真空中两个点电荷之间相互作用的基本规律,称为库仑定律,从而使电磁学从定性的研究进入定量研究.

库仑定律可表述为:**在真空中,两个静止的点电荷之间的相互作用力,其大小与这两个电荷所带电量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比;作用力的方向沿着两点电荷的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸.** 其数学表达式为

$$\boldsymbol{F}_{12}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r_{12}^3}\boldsymbol{r}_{12} \tag{10.1}$$

在国际单位制中,$\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}\mathrm{C}^2\cdot\mathrm{N}^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-2}$,称为真空介电常数或真空电容率. 其中,$\boldsymbol{F}_{12}$是$q_1$对$q_2$是作用力,$\boldsymbol{r}_{12}$是由$q_1$指到$q_2$的矢量.

q_2对q_1的作用力为

$$\boldsymbol{F}_{21}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r_{21}^3}\boldsymbol{r}_{21}=\frac{q_1q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_{12}^3}(-\boldsymbol{r}_{12})=-\boldsymbol{F}_{12}$$

说明

(1) 在库仑定律表示式中引入真空电容率和“4π”因子的作法,称为单位制的有理化.

(2) 从式子可见,当q_1和q_2同号时,表现为排斥力;当q_1和q_2异号时,表现为吸引力. 静止电荷间的作用力,又称为库仑力.

(3) 两静止点电荷之间的库仑力遵守牛顿第三定律. 库仑定律的形式与万有引力定律形式相似. 但前者包含吸力和斥力,后者只是引力.

(4) 两个以上静止点电荷之间的作用力遵循**力的叠加原理**，即两个以上的点电荷对一个点电荷的作用力等于各个点电荷单独存在时对该点电荷的作用力的矢量和.

(5) 库仑定律是直接由实验总结出来的规律，r 在 $10^{-15} \rightarrow 10^{7}$ m 范围内正确有效，它是静电场理论的基础.

思考题

思 10.1　点电荷间的库仑定律遵守牛顿第三定律吗?

思 10.2　设电荷均匀分布在一空心均匀带电球面上，若把另一点电荷放在球心上，这个电荷能处于平衡状态吗? 如果把它放在偏离球心的位置上，又将如何呢?

10.2　电场　电场强度

10.2.1　电场

电荷间存在着力的作用，这种相互作用是怎样实现的? 历史上曾有过两种不同的看法，在很长的时间内，人们认为带电体之间是超距作用，即二者直接作用，也不用介质传递. 即

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

到了 19 世纪，法拉第提出新的观点，认为在带电体周围存在着一种特殊物质——电场，电场是物质的一种存在形式. 带电体通过它的电场对位于电场中的另一带电体施力，这种力称为电场力. 任何电荷都在它周围空间产生电场. 电荷之间的相互作用正是通过电场实现的. 库仑力即是静电场力. 建立电场的电荷通常称为场源电荷. 静止电荷所产生的场是不随时间而变化的稳定电场，通常称为静电场.

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

近代物理学证明后者是正确的.

10.2.2　电场强度

为了讨论电场的情况，我们引入试验电荷 q_0 的概念，从静电场的力的表现出发，利用试验电荷引出电场强度概念来描述电场的性质.

试验电荷必须满足两个条件：首先它本身所带的电量 q_0 应当足够小，这样它的引入才不会影响原来电场的情况；其次它的线度应当小到可以将它视为点电荷，这样才能借助它来确定电场中每一点的性质.

由库仑定律可知，试验电荷 q_0 在电场中某点所受的力不仅与该点所在的位置有关，而且与 q_0 的多少有关. 实验发现，将 q_0 加倍，则受的电场力也增加相同的倍数，即试验电荷分别带有电量 $q_0, 2q_0, 3q_0, \cdots, nq_0$ 时，它所受的力分别为 $\boldsymbol{F}, 2\boldsymbol{F}, 3\boldsymbol{F}, \cdots, n\boldsymbol{F}$.

$$\frac{\text{力}}{\text{试验电荷}} = \frac{\boldsymbol{F}}{q_0} = \frac{2\boldsymbol{F}}{2q_0} = \frac{3\boldsymbol{F}}{3q_0} = \cdots = \frac{n\boldsymbol{F}}{nq_0}$$

可见,这些比值都为$\frac{\boldsymbol{F}}{q_0}$,与试验电荷无关,仅与$A$点电场性质有关. 因此,可以用$\frac{\boldsymbol{F}}{q_0}$来描述电场的性质. 于是我们定义这一比值为描述电场具有力的性质的物理量,称为**电场强度**,简称场强,用符号$\boldsymbol{E}$来表示,则

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{F}}{q_0} \tag{10.2}$$

可见电场中任一点的场强大小等于单位正电荷在该点所受的电场力,场强的方向也就是试验电荷在该处受力的方向. 在SI单位制中场强的单位是$\mathrm{N\cdot C^{-1}}$,也可写成$\mathrm{V\cdot m^{-1}}$.

应该指出,电场是客观存在,它仅决定于场源电荷的分布,与是否引入试验电荷无关,而试验电荷的作用则在于显示电场的存在. 空间各点的E都相等的电场称为均匀电场或匀强电场.

10.2.3　场强叠加原理

电场力是矢量,它在叠加时遵从矢量叠加原理. 试验电荷放在元电荷为点电荷系q_1,q_2,q_3,…,q_n所产生电场中的A点,实验表明q_0在A处受的电场力$\boldsymbol{F}$是各个点电荷各自对q_0作用力F_1,F_2,F_3,…,F_n的矢量和,即

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}_1+\boldsymbol{F}_2+\boldsymbol{F}_3+\cdots+\boldsymbol{F}_n$$

按场强定义

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{F}}{q_0}=\frac{\boldsymbol{F}_1}{q_0}+\frac{\boldsymbol{F}_2}{q_0}+\frac{\boldsymbol{F}_3}{q_0}+\cdots+\frac{\boldsymbol{F}_n}{q_0}=\boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2+\boldsymbol{E}_3+\cdots+\boldsymbol{E}_n$$

$$\boldsymbol{E}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{E}_i \tag{10.3}$$

由此可见,**点电荷系电场中任一点处的总场强等于各个点电荷单独存在时在该点产生的场强矢量和,这称为场强叠加原理.**

因此,只要知道点电荷的场强和场源系统的电荷分布情况,便可计算出任意带电体系电场的场强. 以上原理不仅对于点电荷电场的叠加,而且对于任意带电体系电场的叠加都是正确的.

库仑定律与叠加原理是静电学中最基本的内容,将两者结合起来,原则上可以解决静电学中的各种问题.

10.2.4　场强的计算

1. *点电荷电场的电场强度*

设真空中有一场源点电荷q,在它所建立的电场中任意一点P的场强可由库仑定律求得. 设点P与场源电荷间的距离为,将试探电荷q_0置于P点上,它所受的电场力为

$$\boldsymbol{F}=\frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\boldsymbol{r}$$

由场强定义知

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{F}}{q_0}=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\boldsymbol{r} \tag{10.4}$$

式(10.4)中 $\boldsymbol{r}$ 是由 q 指向点 P 的矢量. 当场源电荷 q 为正时,$\boldsymbol{E}$ 与 $\boldsymbol{r}$ 同方向,如图 10.1 所示;当 q 为负时,$\boldsymbol{E}$ 与 $\boldsymbol{r}$ 反方向. 该式表明点电荷的电场以场源为中心呈球形对称分布.

图 10.1　点电荷的电场

2. 点电荷系电场的电场强度

在点电荷系 $q_1,q_2,q_3,\cdots,q_n$ 所产生电场中的 A 点，由场强叠加原理得

$$\boldsymbol{E}=\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0 r_i^3}\boldsymbol{r}_i$$

3. 连续带电体电场的电场强度

对于电荷连续分布的带电体,可先将带电体分割为无穷多个电荷元 $\mathrm{d}q$,每一个电荷元均可视为一个点电荷,$\mathrm{d}q$ 产生场强为

$$\mathrm{d}\boldsymbol{E}=\frac{\mathrm{d}q}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\boldsymbol{r}$$

对电荷元的场强进行积分,即可得出整个带电体电场中的场强

$$\boldsymbol{E}=\int\mathrm{d}\boldsymbol{E}=\int_q\frac{\mathrm{d}q}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\boldsymbol{r} \tag{10.5}$$

4. 电偶极子

等量异号点电荷相距为 l,如图 10.2 所示,这样一对点电荷称为**电偶极子**. 由 $-q$ 指向 $+q$ 的矢量 $\boldsymbol{l}$ 称为电偶极子的轴,$\boldsymbol{p}=q\boldsymbol{l}$ 叫做电偶极子的**电偶极矩**,简称为**电矩**.

在一正常分子中有相等的正负电荷,当正、负电荷的中心不重合时,这个分子构成了一个电偶极子.

例 10.1　已知电偶极子电矩为 $\boldsymbol{p}$,求:

(1) 电偶极子在它轴线的延长线上一点 A 的 $\boldsymbol{E}_A$;

(2) 电偶极子在它轴线的中垂线上一点 B 的 $\boldsymbol{E}_B$.

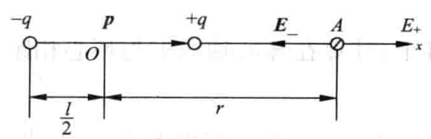

图 10.2　电偶极子

解　(1) 如图 10.2 所取坐标,则有

$$\boldsymbol{E}_A=\boldsymbol{E}_+ + \boldsymbol{E}_-$$

$$E_+=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0\left(r-\dfrac{l}{2}\right)^2},\quad E_-=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0\left(r+\dfrac{l}{2}\right)^2}$$

$$E_A=E_+-E_-=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{\left(r-\frac{l}{2}\right)^2}-\frac{1}{\left(r+\frac{l}{2}\right)^2}\right]=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{\left(r+\frac{l}{2}\right)^2-\left(r-\frac{l}{2}\right)^2}{\left(r-\frac{l}{2}\right)^2\left(r+\frac{l}{2}\right)^2}$$

$$=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{2lr}{r^4\left(1-\frac{l}{2r}\right)^2\left(1+\frac{l}{2r}\right)^2}\approx\frac{2ql}{4\pi\varepsilon_0 r^3}=\frac{2p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

所以 $\boldsymbol{E}_A=\dfrac{2\boldsymbol{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$ ($\boldsymbol{E}_A$ 与 $\boldsymbol{p}$ 同向).

(2) 如图 10.3 所取坐标

$$\boldsymbol{E}_B=\boldsymbol{E}_++\boldsymbol{E}_-$$

$$E_+=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0\left(r^2+\frac{l^2}{2^2}\right)}=E_-$$

$$E_{Bx}=-(E_+\cos\alpha+E_-\cos\alpha)=-2E_+\cos\alpha$$

$$=-2\cdot\frac{q}{4\pi\varepsilon_0\left(r^2+\frac{l^2}{4}\right)}\cdot\frac{\frac{l}{2}}{\sqrt{r^2+\frac{l^2}{4}}}=\frac{-ql}{4\pi\varepsilon_0\left(r^2+\frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}\approx\frac{-ql}{4\pi\varepsilon_0 r^3}=\frac{-p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

$$E_{By}=0$$

所以 $\boldsymbol{E}_B=\boldsymbol{E}_{Bx}=-\dfrac{\boldsymbol{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$.

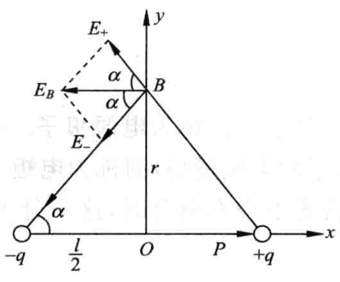

图 10.3 电偶极子中垂线上的场强

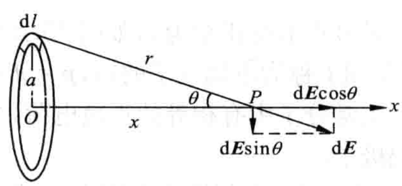

图 10.4 均匀带电圆环轴线上场强

例 10.2 设电荷 q 均匀分布在半径为 a 的圆环上,计算在环的轴线上与环心相距 x 的 P 点的场强.

解 取坐标如图 10.4 所示,把圆环分成一系列电荷元,$\mathrm{d}l$ 部分所带电荷 $\mathrm{d}q=\dfrac{q}{2\pi a}\mathrm{d}l=\lambda\mathrm{d}l$,在 P 点产生的场强为

$$\mathrm{d}E=\frac{\lambda\mathrm{d}l}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

$$\mathrm{d}E_x=\mathrm{d}E\cos\theta=\frac{\lambda\mathrm{d}l}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cos\theta$$

其中，$\cos\theta=\dfrac{x}{(x^2+a^2)^{\frac{1}{2}}}$，$r^2=x^2+a^2$；$x,a$ 为定值. 则

$$E_x=\int_0^{2\pi a}\frac{\lambda \mathrm{d}\,l}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cos\theta=\frac{qx}{4\pi\varepsilon_0(x^2+a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

根据对称性可知，$E_{\perp x}=0$，所以

$$E=E_x=\frac{qx}{4\pi\varepsilon_0(x^2+a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

讨论

(1) $\boldsymbol{E}$ 与圆环平面垂直；

(2) 当 $x=0$ 时，即环中心处，$\boldsymbol{E}=0$；

(3) 当 $x\gg a$ 时，$E=\dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0 x^2}$，$x$ 轴上 $\boldsymbol{E}$ 关于原点对称.

从上式可以看出，当某点远离带电圆环时，计算此点的电场强度，可将带电圆环视为电量全部集中在环心的点电荷来处理.

例 10.3　有一均匀带电直线，长为 l，电量为 q，求距直线垂直距离为 r 处的 P 点的场强.

解　取坐标如图 10.5 所示，把带电体分成一系列点电荷，设 $\lambda=\dfrac{q}{l}$，则 $\mathrm{d}y$ 段在 P 处产生场强为

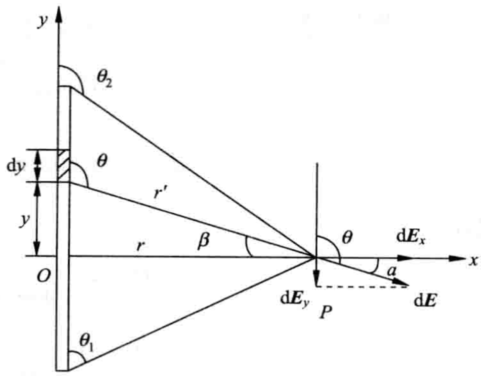

图 10.5　均匀带电细杆场强

$$\mathrm{d}E=\frac{\mathrm{d}q}{4\pi\varepsilon_0 r'^2}=\frac{\lambda\mathrm{d}y}{4\pi\varepsilon_0(y^2+r^2)}$$

由图示几何关系可知

$$y=r\tan\beta=r\tan\left(\theta-\frac{\pi}{2}\right)=-r\cot\theta$$

$$\mathrm{d}y=r\csc^2\theta\mathrm{d}\theta$$

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

$$\mathrm{d}E=\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 r}\mathrm{d}\theta$$

$$\mathrm{d}E_x=\mathrm{d}E\sin\theta=\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 r}\sin\theta\mathrm{d}\theta$$

$$\mathrm{d}E_y=\mathrm{d}E\cos\theta=\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 r}\cos\theta\mathrm{d}\theta$$

$$E_x=\int\mathrm{d}E_x=\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\lambda\sin\theta\mathrm{d}\theta}{4\pi\varepsilon_0 r}=\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 r}(\cos\theta_1-\cos\theta_2)$$

$$E_y=\int \mathrm{d}E_y=\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\lambda\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r}\mathrm{d}\theta=\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 r}(\sin\theta_2-\sin\theta_1)$$

讨论　无限长均匀带电直线 $\theta_1=0,\theta_2=\pi$,则

$$E_x=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r},\quad E_y=0$$

即电场强度垂直无限长带电直线,$\lambda>0$,$\boldsymbol{E}$ 背向直线;$\lambda<0$,$\boldsymbol{E}$ 指向直线.

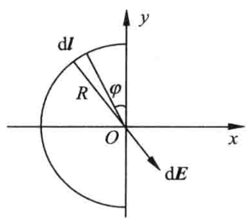

图 10.6　均匀带电半圆环圆心处场强

例 10.4　一个半径为 R 的均匀带电半圆环,电荷线密度为 λ,求环心处 O 点的场强.

解　如图 10.6 在圆上取 $\mathrm{d}l=R\mathrm{d}\varphi$,则 $\mathrm{d}q=\lambda\mathrm{d}l=R\lambda\mathrm{d}\varphi$,它在 O 点产生场强大小为

$$\mathrm{d}E=\frac{\lambda R\mathrm{d}\varphi}{4\pi\varepsilon_0 R^2}$$

方向沿半径向外. 则

$$\mathrm{d}E_x=\mathrm{d}E\sin\varphi=\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 R}\sin\varphi\mathrm{d}\varphi$$

$$\mathrm{d}E_y=\mathrm{d}E\cos(\pi-\varphi)=\frac{-\lambda}{4\pi\varepsilon_0 R}\cos\varphi\mathrm{d}\varphi$$

积分

$$E_x=\int_0^{\pi}\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 R}\sin\varphi\mathrm{d}\varphi=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 R}$$

$$E_y=\int_0^{\pi}\frac{-\lambda}{4\pi\varepsilon_0 R}\cos\varphi\mathrm{d}\varphi=0$$

所以

$$E=E_x=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 R}$$

场强方向沿 x 轴正向.

思考题

思 10.3　两个点电荷相距一定距离,已知在这两点电荷连线中点处场强为 0,你对这二点电荷的电量和符号可作什么结论?

思 10.4　在电场中某一点的电场强度定义为 $\boldsymbol{E}=\dfrac{\boldsymbol{F}}{q_0}$,若该点没有试验电荷,那么该点电场强度又如何? 为什么?

10.3　静电场的高斯定理

10.3.1　电场线

为了形象地描绘电场的分布情况,我们可以在电场中假想一系列的曲线,而且规定:

(1) 曲线上每一点的切线方向与该点场强的方向相同；

(2) 各点附近垂直于电场方向的单位面积所通过的电场线条数与该点场强的大小成正比，因此曲线的疏密程度可以表示该点场强的.

这些曲线称为**电场线**，它可以形象地全面描绘出电场中场强的分布状况. 静电场中的电场线具有下列特性：

(1) **电场线起自正电荷，止于负电荷，但它不会中途中断，也不会形成闭合曲线.**

(2) **电场线之间不会相交，因为任何一点的场强都只有一个确定的方向.**

电场线是为了形象描述电场分布所引进的辅助概念，它并不真实存在. 图 10.7 给出了几种常见电荷激发电场的电力线示意图.

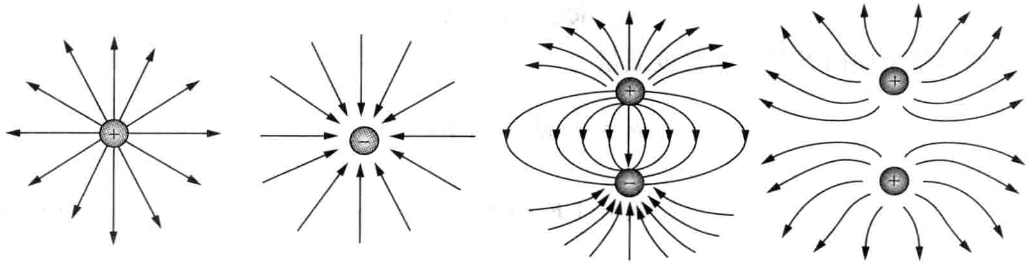

图 10.7 几种常见的电场线

10.3.2 电通量

通过电场中任一给定面积的电场线总数称为通过该面积的**电场强度通量**，简称**电通量**或 $\boldsymbol{E}$ **通量**，用 Φ_e 表示，电通量的单位为韦伯(Wb). 根据电场线的定义，可以计算通过任意面积的电通量. 下面我们分几种情况来讨论 Φ_e 的计算方法.

1. 匀强电场通过平面的电通量

在匀强电场(电场线是一束均匀分布的平行直线)中有一平面 S 与场强 $\boldsymbol{E}$ 垂直，如图 10.8 所示，则通过该面积的电通量显然应为 $\Phi_e = ES = \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{S}$.

如图 10.9 所示，如果平面 S 的法线与场强 $\boldsymbol{E}$ 成一角度 θ，设 $\boldsymbol{e}_n$ 为 $\boldsymbol{S}$ 的单位法线向量，则 $\boldsymbol{S} = S\boldsymbol{e}_n$，则通过 S 的电通量应为

$$\Phi_e = ES_{\perp} = ES\cos\theta = \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{S} \quad (\boldsymbol{S} = S\boldsymbol{e}_n)$$

式中，$\boldsymbol{e}_n$ 为 $\boldsymbol{S}$ 的单位法线向量.

2. 在任意电场中通过任意曲面的电通量

在非均匀电场中对任意曲面而言，要计算通过该曲面的电通量可以把曲面分成许多无限小的面积元 $\mathrm{d}S$，由于每一面元无限小，故可认为每一面元均为平面，且其电场是均匀的. 如图 10.10 所示，在 S 上取面元 $\mathrm{d}S$，$\mathrm{d}S$ 可看成平面，$\mathrm{d}S$ 上 $\boldsymbol{E}$ 可视为均匀，设 $\boldsymbol{e}_n$ 为 $\mathrm{d}S$ 单位法向向量，$\mathrm{d}\boldsymbol{S}$ 与该处 $\boldsymbol{E}$ 夹角为 θ，则通过 $\mathrm{d}S$ 电场强度通量为