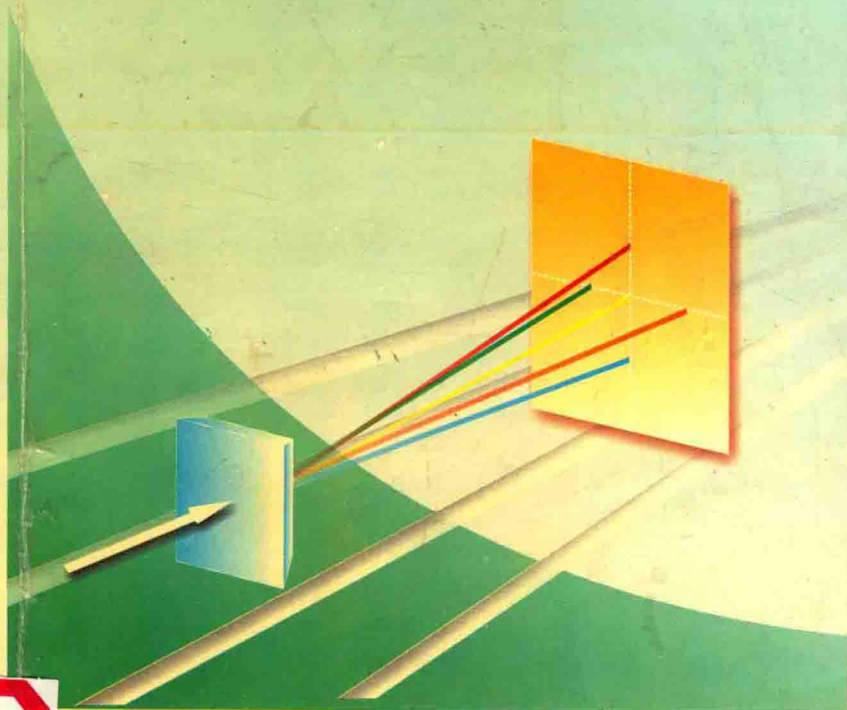


中册

物理学教程

主编 宋太平 梁建均 邱敏



四川大学出版社



物理学教程

(中册)

主 编	宋太平	梁建均	邱 敏
副主编	杨兴强	闫荣义	苏本庆
	吴寿煜	曾云飞	尹中文
编 委	滕 敏	姚 恺	曹富涵
	王清林	崔甲武	黄金书

四川大学出版社

责任编辑:孙康江

责任校对:贾朝辉

封面设计:罗 光

责任印制:曹 琳

图书在版编目(CIP)数据

物理学教程/宋太平主编. —成都:四川大学出版社, 2000.8

ISBN 7-5614-1967-8

I. 物... II. 宋... III. 物理学—高等学校—教材
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 40533 号

书名 物理学教程

作 者 宋太平等 主编

出 版 四川大学出版社

地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)

印 刷 南阳市第四印刷厂

发 行 四川大学出版社

开 本 850mm×1168mm 1/32

印 张 22.625

字 数 567.6 千字

版 次 2000 年 8 月第 1 版

印 次 2000 年 8 月第 1 次印刷

印 数 0 001~2 000 册

定 价 (上、中、下三册共)27.00 元

◆读者邮购本书,请与本社发行科
联系。电话:5412526/5414115/
5412212 邮编:610064

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回印刷厂调换。

版权所有◆侵权必究

前 言

为适应当前师范院校非物理专业的教学需要，配合教学改革和三年制教学方案的实施，我们七所院校长期从事普通物理教学的教师合作编写了这本《物理学教程》，本书可作为四年制本科院校、三年制专科学校和教育学院非物理专业的普通物理教材，也可供有关大专院校的师生参考。

本书以四年制本科院校和三年制专科学校的非物理专业教学大纲为依据，参阅了国内、外的许多普通物理教材，力图吸收众家之长，针对非物理专业学生的特点，注重基本概念、基本规律的科学性和系统性的叙述，注重理论联系实际，侧重对学生能力的培养。该书的特点是：叙述严谨，体系完整、新颖，语言简练，例题典型。每章都附有一定数量精选的习题，大部分章节还附有思考题，有利于学生加深对理论知识的理解，提高分析问题和解决问题的能力。在内容的编排上，部分章节带有“*”，为选学内容，以适应不同专业、不同层次的学生使用该教材。教师可根据具体情况选讲，不影响整个体系的学习。

本书包括力学基础、分子运动论和热力学、电磁学、光学和近代物理学基础等五篇，共十九章内容，由宋太平、梁建均和邱敏主持编写。具体分工为：杨兴强（南阳师范学院）编写第一章；吴寿煜（开封师专）编写第二章；滕敏（新乡教育学院）编写第三章、第六章的第八节至第十节；邱敏（黑河师专）编写第四章的第一节至第八节；苏本庆（新乡师专）编写第五章和第九章；姚恺（新乡师专）编写第六章的第一至第七节、思考题和习题；曾云飞（南阳电大）编写第十一章、第四章的第九节至习

题；梁建均（安阳师范学院）编写第七章和第八章；宋太平（南阳师范学院）编写第十章和第十六章；曹富涵（开封师专）编写第十二章的第一至第六节；尹中文（南阳师范学院）编写第十三章；黄金书（南阳师范学院）编写第十四章的第一至第三节；崔甲武（南阳师范学院）编写第十五章、第十二章的第七节至习题；王清林（开封师专）编写第十七章和第十九章；闫荣义（南阳师范学院）编写第十八章、第十四章的第四节及习题。

在本书的编写过程中，各参编院校的物理系领导给予了大力支持，并提出了许多建设性的建议，在此表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限，加之时间仓促，本书的错误和不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2000年7月

第三篇 电磁学

第七章 真空中的静电场

7.1 库仑定律

7.1.1 电荷 电荷守恒

我们知道,用丝绸摩擦过的玻璃棒,或用毛皮摩擦过的胶木棒,都能吸引轻小物体.物体有了这种属性,称为带电,或者说有了电荷.带电的物体称为带电体.近代物理研究表明,自然界是由基本粒子构成的,其中多数都带有电荷.电荷有两种,与玻璃棒上电荷相同的为正电荷,与胶木棒上电荷相同的为负电荷.实验表明,同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引.在一定条件下,测定带电体之间作用力的大小,我们就能够确定物体所带电荷的多寡.一个物体所带电荷的多少叫做电量.电量的单位是库仑,国际单位符号为C.

除了摩擦的方法可以使物体带电外,还有感应起电、光照起电、高压电离起电等.一绝缘导体由可分开的独立导体B和C组成,如图7-1所示,当带正电的玻璃棒A移近B端时,B,C因感应而带电,B端带负电,C端带正电.如果这时先将B,C两部分分开,再撤走A,则发现B,C两部分带等

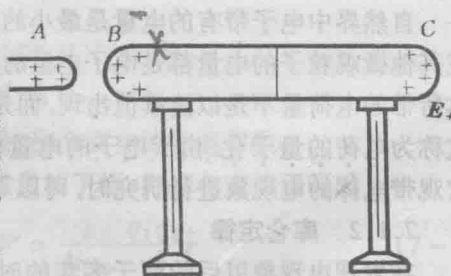


图 7-1

量异号电荷. 这种方法称为感应起电.

不仅感应起电的两部分电量是相等的, 而且精确的实验还表明, 玻璃棒和丝绸摩擦后, 玻璃棒上所带的正电荷和丝绸上所带的负电荷也是等量的. 这表明, 起电过程中, 并没有新的电荷产生, 而只是发生了电荷的转移. 包括近代物理实验在内的大量实验表明: 电荷只能从一个物体转移到另一个物体, 或者从物体的一部分转移到另一部分, 或者说, 在一个与外界没有电荷交换的一孤立系统内, 无论发生怎样的物理过程, 该系统电量的代数和保持不变. 这一结论称为电荷守恒定律, 它是自然界的基本守恒律之一.

近代对原子的电结构的研究表明, 原子由原子核和绕核运动的电子组成. 原子核中有带正电的质子和不带电的中子. 每个质子和电子有相等的电量, 即 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{C}$. 正常状态下, 原子核外围的电子数目, 等于原子核内的质子数目, 原子呈现电中性, 整个宏观物体也呈中性. 如果原子或分子由于外来原因失去一个或几个电子, 就成为带正电的正离子. 反之, 原子或分子从外界获得电子, 就成为带负电的负离子. 同样, 在一定的外因作用下, 宏观物体得到或失去一定数量的电子, 使质子的总数和电子的总数不再相等, 物体就呈现电性. 上述的起电现象, 都可以用物质的电结构理论加以解释.

自然界中电子带有的电量是最小的, 实验发现, 所有的带电体或其他微观粒子的电量都是电子电量的整数倍. 这个事实说明, 物体所带的电荷量不是以连续值出现, 而是以不连续的量值出现的. 这称为电荷的量子化. 由于电子的电量值是如此之小, 所以, 在对宏观带电体的电现象进行研究时, 可以不考虑电荷的量子性.

7.1.2 库仑定律

在发现电现象以后的两千多年的时期内, 人们对电的了解一直处于定性的初级阶段. 1785 年, 库仑通过扭秤实验, 对电荷之间的相互作用进行了定量研究, 总结出如下规律: 真空中两个点电荷

q_1 和 q_2 之间的相互作用力沿其连线方向, 同号相斥, 异号相吸; 作用力的大小与两电荷的电量的乘积成正比, 与两电荷之间的距离的平方成反比。这就是著名的库仑定律。这种相互作用力称为库仑力或静电力。

库仑定律可表示为矢量式

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}, \quad \mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{21} \quad (7-1)$$

其中, $\mathbf{F}_{12}$ 为 q_1 对 q_2 的作用力, r 为 q_1 与 q_2 之间的距离, $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 为由 q_1 指向 q_2 方向的单位矢量,

如图 7-2 所示。 q_1 与 q_2 同号时, $\mathbf{F}_{12}$ 沿 $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 方向, 是斥力; 当 q_1 与 q_2 反号时, $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 的方向相反, 是引力。 $\mathbf{F}_{12}$ 的大小为

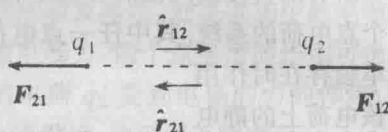


图 7-2

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (7-2)$$

在国际单位制(SI 制)中

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.9880 \times 10^9 (\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2})$$

$$= 9.00 \times 10^9 (\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2})$$

其中

$$\epsilon_0 = 8.8538 \times 10^{-12} (\text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$$

$$= 8.85 \times 10^{-12} (\text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$$

是表征真空特性的物理量, 称为真空的介电常数。

在(7-1)式中去掉各量的下标, 则库仑定律可写成

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (7-3)$$

按上面的规定, 显然有

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$$

库仑定律中提到的点电荷,是电学研究中提出的一种理想模型.类似于力学中的质点,是一个具有相对意义的概念.在我们所讨论的电学问题中,若带电体本身的几何线度比起它到另一带电体的距离小得多,使得带电体的形状以及电荷在其上的分布对讨论结果的影响可以忽略不计,就可以把它抽象为一个集中了全部电荷的几何点.点电荷模型的提出,使得实际问题中可以明确定出两个带电体之间的距离,并应用库仑定律讨论它们之间的相互作用.

所有的直接或间接的实验还表明,库仑力满足叠加原理.即对多个点电荷的系统,其中任一点电荷所受的静电力等于其它点电荷单独存在时作用于该电荷上的静电力的矢量和.设有

n 个电荷的点电荷系,另有点电荷 q 受到 n 个电荷的作用,则 q 所受的库仑力由叠加原理可记为:

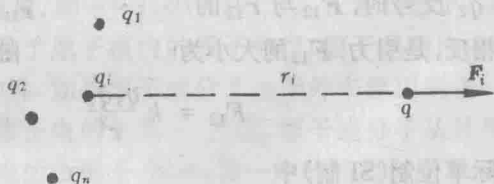


图 7-3

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_i + \cdots + \mathbf{F}_n \quad (7-4)$$

式中 $\mathbf{F}_i$ 为第 i 个电荷对 q 的作用力,如图 7-3 所示.

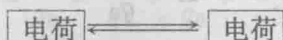
库仑定律和叠加原理是整个电学理论的基础.

7.2 电场 电场强度

7.2.1 电场

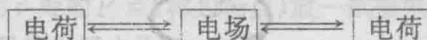
物体间的相互作用力除了接触作用之外,还有非接触作用,如万有引力.电相互作用也是非接触作用.库仑定律给出了两个点电荷相互作用的规律,但并不涉及相互作用的机制.在很长一个时期内,人们认为带电体之间的作用是“超距”作用,也就是说,一个带

电体所受到的静电力是由另一个带电体直接给予并立即达到的。这种作用既不需要中间物质进行传递,也不需要时间. 这种观点可用下式表示:



近代物理学的发展证明,“超距”作用观点是错误的,两个电荷之间相互作用是由电场来传递的,是需要时间的. 电场是一种物质,与分子、原子等组成的实物物体一样,也具有能量、动量和质量. 场是物质存在的一种形式.

当物体带电时,就在它的周围激发电场,处在电场中的电荷将受到电场力的作用,这种力叫做电场力. 两个点电荷的作用可描述为: q_1 激发电场,处于电场中的电荷 q_2 受到电场的力的作用;同样, q_1 受到 q_2 激发的电场的力的作用. 这可用下图表示:



相对于观察者静止的电荷所激发的电场叫做静电场. 本章着重研究静电场的性质及其规律.

7.2.2 电场强度

电场的一个重要性质就是电场对处于电场中的电荷施加力的作用,为了定量的描述电场的性质,我们在电场中引入试探电荷 q_0 , 它满足两个条件:

- (1) 试探电荷的几何线度必须足够小,可以被看成是点电荷,以便确定场中每一点的性质.
- (2) 试探电荷的电量必须充分小,其引入电场后对原电荷的分布及其电场的分布的影响可以忽略.

对电场的探测可分两步进行:①在电场中的同一点,分别放入电量不同的试探电荷 q_0 , 可发现 q_0 受力的方向不变,力的大小随 q_0 的增减而增减,但比值 F/q_0 不变. 即在该点处存在一个完全由电场决定的确定的比值矢量,与试探电荷 q_0 的量值无关. ②在

电场中不同点处做同样的探测,各点的比值矢量一般不同,如图 7-4 所示.为描述电场的这一性质,引入**电场强度矢量**

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (7-5)$$

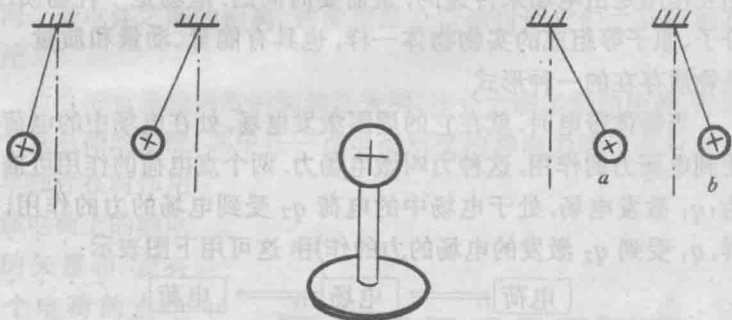


图 7-4

电场中某点的**电场强度的方向**为**正电荷在该点所受电场力的方向**,其**大小**为**单位电荷所受的电场力的大小**.

在 SI 制中,力以牛顿为单位,电量以库仑为单位,场强的单位就是牛顿/库仑($\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$).

只要知道任一点的场强 E 及处于该点的电荷 q ,由(7-5)式可计算电荷所受的电场力

$$F = qE \quad (7-6)$$

各点场强的大小和方向都相同的电场称为**匀强电场**.

7.2.3 场强叠加原理

实验表明,在点电荷系 $q_1, q_2 \cdots q_n$ 的电场中,试探电荷 q_0 所受的电场力等于各个点电荷单独存在时对 q_0 的作用力 $F_1, F_2 \cdots F_n$ 的矢量和,即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n$$

由场强的定义

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

等式右边各项是各点电荷单独存在时所产生的场强,由此可见

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n \quad (7-7)$$

上式表明,电场中任一点处的总场强等于各点电荷单独存在时在该点所产生的场强的矢量和。这就是场强叠加原理。利用叠加原理,原则上可以计算任何带电体系所产生的电场的场强分布。

7.2.4 场强的计算

(1) 点电荷的电场中各点的场强

真空中有一点电荷 q , 其空间电场分布可计算如下:

在距 q 为 r 处的 P 点(称为场点)放一试探电荷 q_0 , 由库仑定律可得 q_0 所受的电场力为

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

由电场强度的定义可得 P 点的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (7-8)$$

其中 $\hat{\mathbf{r}}$ 为从 q 指向场点方向上的单位矢量。若 $q > 0$, $\mathbf{E}$ 沿 $\hat{\mathbf{r}}$ 方向; 若 $q < 0$, 则 $\mathbf{E}$ 沿 $\hat{\mathbf{r}}$ 反方向。如图 7-5 所示。

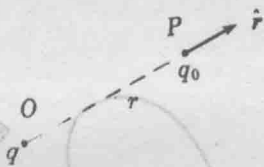


图 7-5

(2) 点电荷系的电场中各点的场强

真空中有点电荷 $q_1, q_2, \cdots, q_n$, 各点电荷到场点 P 的矢径分别为 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \cdots, \mathbf{r}_n$, 各点电荷在 P 点激发的场强分别为

$$\mathbf{E}_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \hat{\mathbf{r}}_1, \mathbf{E}_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \hat{\mathbf{r}}_2, \cdots, \mathbf{E}_n = \frac{q_n}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \hat{\mathbf{r}}_n$$

由场强叠加原理, P 点的总场强 $\mathbf{E}$ 为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_i + \cdots + \mathbf{E}_n$$

$$= \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \quad (7-9)$$

(3) 电荷连续分布的带电体的场强

虽然电荷是量子化的,但从宏观来说,一般带电体可以忽略电荷的量子性,其电荷分布可视为连续分布.任意带电体可连续分割为无数电量为 dq 的微小带电体的集合.每一个 dq 可视为点电荷,其在场点 P 处的场强为

$$d\mathbf{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (7-10)$$

其中 $\hat{\mathbf{r}}$ 为 dq 指向 P 点方向上的单位矢量.由场强叠加原理,带电体在 P 点处激发的总场强应是所有 dq 在 P 点处的场强的矢量叠加,这应该是积分

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (7-11)$$

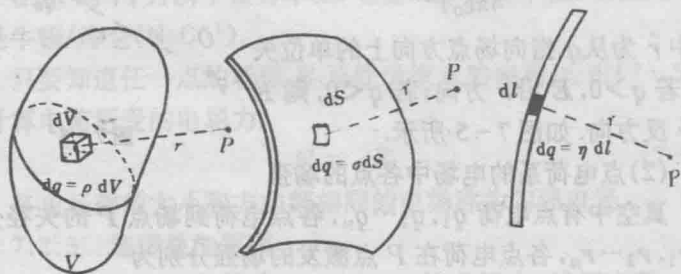


图 7-6

在实际问题中,带电体按其形状特点,其电荷分布常可简化为

体分布、面分布和线分布三种模型,如图 7-6 所示.

对于电荷的体分布,可取 $dq = \rho dV$, 其中 ρ 为电荷的体密度 (即单位体积中的电量), dV 为物理小体元,带电体在 P 点激发的场强为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int_V \frac{\rho dV}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (7-12)$$

对于电荷的面分布,可取 $dq = \sigma dS$, 其中 σ 为电荷的面密度 (即单位面积上的电量), dS 为小面元. 带电体在 P 点激发的场强为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int_S \frac{\sigma dS}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (7-13)$$

对于电荷的线分布,可取 $dq = \eta dl$, 其中 η 为电荷的线密度 (即单位长度上的电量), dl 为小线元. 带电体在 P 点激发的场强为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int_L \frac{\eta dl}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (7-14)$$

在具体运算中,应建立适当坐标系,写出 $d\mathbf{E}$ 在各坐标轴方向上的分量式,分别积分计算 $\mathbf{E}$ 的各分量,再求合成矢量 $\mathbf{E}$.

例 7-1 一对等量异号点电荷 $+q$ 和 $-q$, 相距为 l , 求其连线的延长线和中垂面上一点的场强.

解 如图 7-7 建立坐标系.

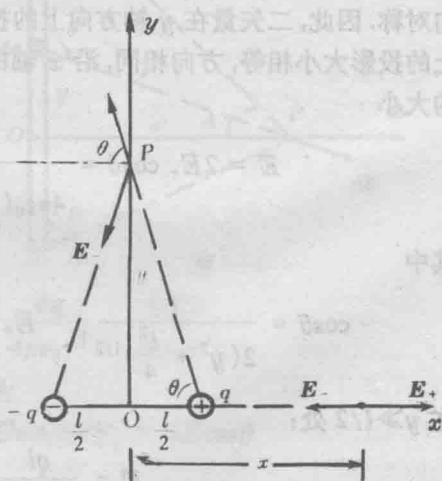


图 7-7

(1) 在延长线上任取一点 P , $+q$ 和 $-q$ 产生的场强方向相反, 大小分别为

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

P 点的合场强的大小为

$$\begin{aligned} E &= E_+ - E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0(x - \frac{l}{2})^2} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0(x + \frac{l}{2})^2} \\ &= \frac{2qxl}{4\pi\epsilon_0(x^2 - \frac{l^2}{4})^2} \end{aligned}$$

在 $x \gg l/2$ 处

$$E = \frac{2ql}{4\pi\epsilon_0 x^3}$$

(2) 在中垂线上任取一点 P , E_+ 和 E_- 大小相等, 方向关于 x 轴方向对称. 因此, 二矢量在 y 轴方向上的投影互相抵消, 在 x 轴方向上的投影大小相等, 方向相同, 沿 x 轴的负方向. P 点处的合场强的大小

$$E = 2E_+ \cos\theta = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0(y^2 + \frac{l^2}{4})^{3/2}}$$

其中

$$\cos\theta = \frac{l}{2(y^2 + \frac{l^2}{4})^{1/2}} \quad E_+ = \frac{q}{4\pi\epsilon_0(y^2 + \frac{l^2}{4})}$$

在 $y \gg l/2$ 处:

$$E = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 y^3}$$

在实际问题中,一般两电荷间的距离远小于它们到场点的距离,这样的电荷系统称为电偶极子.定义电偶极矩矢量

$$\mathbf{p} = ql$$

其中 l 的大小为两电荷之间的距离, l 的方向由负电荷指向正电荷. $\mathbf{p}$ 矢量描述了电偶极子本身的特性. 这样,上面的结果可记为

在延长线上
$$E = \frac{2p}{4\pi\epsilon_0 x^3} \quad (7-15)$$

在中垂线上
$$E = -\frac{p}{4\pi\epsilon_0 y^3} \quad (7-16)$$

例 7-2 真空中一均匀带电直线,长为 L ,带电量为 Q . 求直线外一点 P 处的场强(图 7-8). P 点到直线的距离为 a ,到直线两端点的连线与直线的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 .

解 如图建立坐标系. 此为电荷连续分布问题,在直线上距原点 O 为 y 处,取电荷元 $dq = \eta dy$ ($\eta = Q/L$),其在 P 点处产生的场强大小为

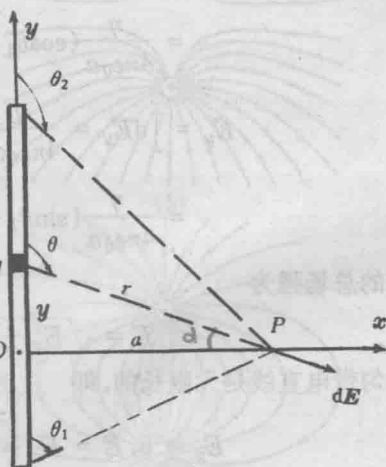


图 7-8

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

dE 的分量 dE_x, dE_y 分别为

$$dE_x = dE \sin\theta, dE_y = dE \cos\theta$$

由图可知,

$$y = -a \cot\theta, dy = a \csc^2\theta d\theta$$

$$r = \frac{a}{\sin\theta}$$

代入得

$$dE_x = \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} \sin\theta d\theta$$

$$dE_y = \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} \cos\theta d\theta$$

两式积分得

$$\begin{aligned} E_x &= \int dE_x = \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta \\ &= \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \end{aligned} \quad (7-17)$$

$$\begin{aligned} E_y &= \int dE_y = \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos\theta d\theta \\ &= \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} (\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \end{aligned} \quad (7-18)$$

P 点的总场强为

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

若均匀带电直线是无限长的, 即 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi$, 则

$$E_y = 0, E = E_x = \frac{\eta}{2\pi\epsilon_0 a} \quad (7-19)$$

7.3 高斯定理

7.3.1 电力线

电荷之间的相互作用是通过电场来传递的, 为了形象地描述场的特性, 法拉第最早引入电力线和磁力线的概念. 正如对带电体在空间建立的电场, 每一点处可引入场强矢量来定量描述场的性