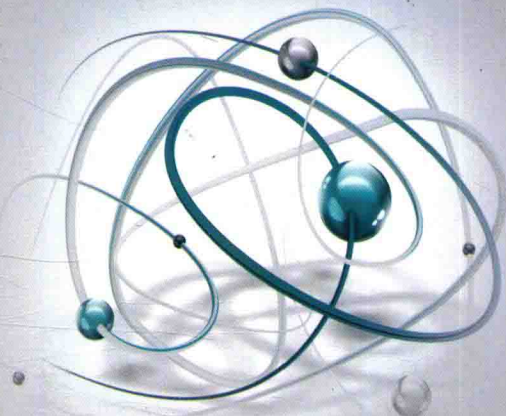




- 普通高等教育“十三五”规划教材
- 普通高等院校物理精品教材

○ ○ ○



大学物理 (下册)

▶▶ 唐世洪 主编



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

普通高等教育“十三五”规划教材
普通高等院校物理精品教材

大学物理(下册)

主 编	唐世洪			
副主编	叶伏秋	邬云雯	王小云	
	杨 红	王立吾		
编 委	赵鹤平	邓 科	廖文虎	黄永刚
	韩海强	邓 燕	曹广涛	



华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本套书是作者在多年讲授大学物理课程的基础上,根据教育部颁布的非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求编写而成的。本套书内容精炼、概念清晰,力图在有限的课时内清晰、准确地讲授大学物理的基本内容及物理学在现代技术中的应用。本套书将能力培养与知识传授有机地融为一体,在内容的选取上涵盖了大学物理最基本、最重要的知识点,在保留经典物理基本框架的同时,对近代物理部分(相对论和量子物理),以及新技术的基本物理原理和应用进行了加强和拓展。本套书共分《大学物理(上、下册)》和《大学物理学习指导》。《大学物理(上册)》包括力学、热学、机械振动与机械波;《大学物理(下册)》包括电磁学、光学和量子物理;《大学物理学习指导》对《大学物理(上、下册)》中的知识点进行了归纳和总结,并对各章中习题进行了详细解答。

本套书可作为高等院校非物理类专业大学物理课程的教材或参考书,也可供其他专业和社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.下册/唐世洪主编. —武汉:华中科技大学出版社,2015.12
普通高等教育“十三五”规划教材 普通高等院校物理精品教材
ISBN 978-7-5680-1487-8

I. ①大… II. ①唐… 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(2015)第 305440 号

大学物理(下册)
Daxue Wuli(Xiace)

唐世洪 主编

策划编辑:周芬娜 王汉江

责任编辑:周芬娜

封面设计:刘 卉

责任校对:张会军

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉正风天下文化发展有限公司

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:710 mm×1 000 mm 1/16

印 张:19.5

字 数:390 千字

版 次:2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:42.00 元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

物理学是研究并阐述物质的组成、性质、运动规律和相互作用的学科。它所描述的基本概念、基本规律和研究方法,已被广泛应用到其他各类学科领域中,是自然科学中最基本、最重要的基础学科之一。

新时代大学生的培养对大学物理课程教学提出了新的要求,教师在传授物理理论知识的同时,应特别注重向学生传授有关物理学的研究方法和思维方式及物理学的应用,为培养社会需要的创新型人才打下坚实的基础。

物理学内容广泛,知识点难度有不同层次。因此,选择一套好的教材使学生在较短的时间内掌握必要的物理知识并尽可能多地了解物理学在当今社会前沿的一些应用,是尤为重要的。

为适应“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的需要,本套教材总结了作者 30 多年的大学物理教学 and 实践经验,并吸收了国内外众多优秀教材的优点。教材深入浅出地讲述了物理学基本概念、基本理论,也适时地介绍了物理学在其他学科和技术领域的应用。

全套教材分为《大学物理(上、下册)》和《大学物理学习指导》,总共三册。

全套教材集吉首大学“基础物理学”优秀教学团队全体成员的共同智慧,由唐世洪教授执笔编写而成;参与本套教材编写工作的教师多年来一直从事大学物理教学,他们在物理教学方面积累的丰富经验和许多独到的见解已经融入教材。

由于编者水平有限,加之时间仓促,疏漏和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2015 年 11 月

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 电场强度 电场线	(5)
9.3 电通量 高斯定理	(14)
9.4 电场力的功 电势	(20)
9.5 场强与电势的关系	(26)
9.6 带电粒子在静电场中的运动	(29)
习题	(34)
第 10 章 静电场中的导体和电介质	(42)
10.1 静电场中的导体	(42)
10.2 导体的电容 电容器	(45)
10.3 电场中的电介质 电介质的极化	(51)
10.4 电场能量	(59)
习题	(61)
第 11 章 稳恒电流与稳恒磁场	(66)
11.1 电流和电流密度	(66)
11.2 一段电路的欧姆定律及其微分形式	(69)
11.3 电源和电动势	(71)
11.4 闭合电路及一段含源电路的欧姆定律	(73)
11.5 基尔霍夫定律及其应用	(77)
11.6 恒定电流的磁场	(79)
11.7 磁场的高斯定理和安培环路定理	(87)
11.8 运动电荷的磁场	(97)
习题	(98)
第 12 章 磁场对电流的作用力 磁介质中的磁场	(104)
12.1 磁场对运动电荷的作用	(104)
12.2 磁场对载流导线的作用	(110)

12.3	磁力的功	(114)
12.4	磁介质	(115)
12.5	磁介质中的磁场	(119)
	习题	(125)
第 13 章	电磁感应	(132)
13.1	电磁感应的基本定律	(132)
13.2	动生电动势	(137)
13.3	感生电动势 感生电场	(140)
13.4	涡电流	(145)
13.5	自感应与互感应	(147)
13.6	RL 、 RC 电路的暂态过程	(152)
13.7	磁场能量	(155)
13.8	位移电流	(157)
13.9	电磁振荡与电磁波	(161)
	习题	(170)
第五篇 光 学		
第 14 章	几何光学	(181)
14.1	几何光学的基本定律	(181)
14.2	几何光学的应用——光学仪器	(192)
第 15 章	光的干涉	(196)
15.1	光的相干性 相干光的获得方法	(196)
15.2	双缝干涉	(198)
15.3	光程与薄膜干涉	(201)
第 16 章	光的衍射	(211)
16.1	光的衍射	(211)
16.2	夫琅禾费单缝衍射	(213)
16.3	衍射光栅	(218)
16.4	夫琅禾费圆孔衍射及光学仪器的分辨率	(223)
16.5	X 射线的衍射	(226)
第 17 章	光的偏振	(229)
17.1	自然光与偏振光	(229)
17.2	反射和折射光的偏振	(234)
17.3	光的双折射现象	(235)
17.4	偏振现象的应用	(237)
	光学部分习题	(242)

第六篇 近代物理学

第 18 章 量子物理初步	(255)
18.1 热辐射 量子假设	(255)
18.2 光电效应 爱因斯坦光子理论	(262)
18.3 康普顿效应	(268)
18.4 实物粒子的波动性	(270)
18.5 不确定关系	(274)
18.6 玻尔的氢原子理论	(276)
18.7 激光	(279)
18.8 薛定谔方程	(286)
18.9 氢原子的量子力学处理	(295)
习题	(298)

第四篇

电
磁
学

电磁学是物理学的重要组成部分,是研究电磁运动的基本规律及其应用的科学,具有广泛的应用价值。可以毫不夸张地说,如果没有电磁学就不可能有现代的先进科学技术,也不可能有现代的文明。电磁运动也是物质运动的基本形式,掌握其运动规律对我们认识物质世界有着重要的意义。本篇较系统地讨论了电磁学的基本规律,从基本的电磁现象到麦克斯韦电磁场理论,当然不会忘记介绍它在现代工业、农业生产及日常生活中的应用。

第9章 真空中的静电场

本章主要研究真空中静电场的基本性质和规律。本章的一些基本概念和规律及处理问题的方法,学习者应很好钻研,它们是学习本篇其他各章内容的基础。另外,在学习本章内容时,必须经常联系第一篇力学中的有关概念,这将有助于对问题的理解。从本章开始,在电磁学整篇内容中,都会经常用到高等数学和有关矢量方面的知识,建议学习者事先复习相关知识。

9.1 电荷 库仑定律

9.1.1 电荷、电量、带电体

1. 带电体、电荷

两种不同的物体(如钢笔的塑料部分与头发)相互摩擦后,有吸引轻微物体的特性,说明这两个物体经过摩擦后进入了一种特殊状态。把处于这种特殊状态的物体称为带电体,它们带有电荷。

大量的实验表明:自然界的电荷只有两种,即正电荷与负电荷;电荷间的相互作用规律是同性相斥、异性相吸。

从电荷间或带电体之间能相互吸引或相互排斥的现象,可以判断它们之间存在一种力的作用。由于这种力是物体带电后出现的,故称为电力(电力)。两物体带的电荷越多,相互作用力也越大,为了表示物体所带电荷的多少,引入了电量这个物理量。电量是表示物体所带电荷多少的物理量。

按通常的理解,带电物体是指处于带电状态的物体;电荷是指带电体的一种属性,而电量则是电荷多少的定量量度,但是通常不把两者严格区别。

2. 摩擦为什么会使物体带电

摩擦为什么会使原来不带电的物体变为带电体呢?带电体的电荷是怎样产生的?要解决这些问题,还需要联系物质本身的电结构。原子的组成如下所示。

$$\text{原子} \left\{ \begin{array}{l} \text{原子核} \left\{ \begin{array}{l} \text{质子(带正电)} \\ \text{中子(不带电)} \end{array} \right. \\ \text{核外电子(带负电)} \end{array} \right.$$

一个原子通常是呈电中性的,即质子所带的正电荷与电子所带的负电荷的电量值相等。如果原子获得电子就会对外界呈负电性,失去电子就会对外界呈正电性。

而两种不同材料的物体相互摩擦时,就会产生热,使原子中的部分电子获得较高的能量,逃出原子核的束缚,进入另一种与之相接触的材料中去,从而使一种材料的原子获得多余的电子而呈负电性,另一种失去电子的材料呈正电性。

9.1.2 电荷守恒定律

上述摩擦起电的成因分析说明摩擦的结果只是使电荷在两个物体之间重新分布,总的电荷数量没有改变。

除摩擦起电外,还可以用其他的方法使物体带电,如图 9-1 所示就展示了利用静电感应使金属带电的方法。

大量的实验表明,电荷只能从一个物体转移到另外一个物体,或从物体的一部分转移到另外一部分,但电荷既不能被创造,也不能被消灭。这个结论就称为电荷守恒定律。

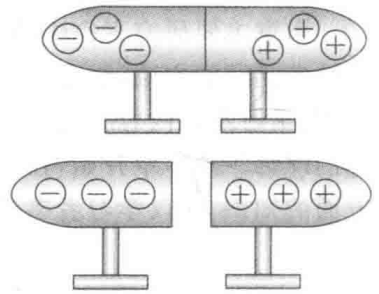


图 9-1 静电感应使金属带电

9.1.3 电荷具有量子性

任何带电体所带的电荷都只能是某一基本单位的整数倍,这个基本单位就是一个电子所带电荷量,称电子电荷,也称元电荷,记为 e , $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

近代物理从理论上预言,有一种电量为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm e$ 的基本粒子(中国人称为层子,外国人称为夸克),这种粒子目前还处在研究阶段。

9.1.4 库仑定律

1. 点电荷

点电荷是指这样的带电体,它本身的线度比起它到其他带电体的距离来说小得多,可以看成是只有电荷而无大小的几何点。它类似于质点概念,也只是一种理想模型。

2. 库仑定律

在真空中, q_1 和 q_2 两个点电荷之间的作用力的方向,沿着两者的连线,同号相斥,异号相吸(见图 9-2),作用力的大小与 q_1 、 q_2 的乘积成正比,与两个点电荷间的距离的平方成反比,即

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (9-1)$$

引入比例系数 k , $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.0 \times 10^9$

$\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 。其中, ϵ_0 称为真空介电常数,

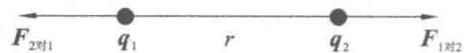


图 9-2 两点电荷间的作用力

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$, $\mathbf{r}_0$ 为单位矢量。当 $q_1 q_2 > 0$ 时, $\mathbf{F}$ 为斥力; 当 $q_1 q_2 < 0$ 时, $\mathbf{F}$ 为引力。

库仑定律大家很熟悉, 这里就不多讲了, 现介绍这个定律的发现过程, 希望为学习者日后的科学研究提供一种可借鉴的方法。

3. 库仑定律的发现

库仑定律是法国科学家库仑于 1785 年确立的, 库仑首先注意到电荷间的静电力与万有引力有很多相似之处 ($F \propto Mm/r^2$), 于是他大胆地设想静电力的规律与万有引力的规律有类似的形式, 即 $f = kq_1 q_2 / r^2$, 然后再通过库仑扭秤实验, 证明了 q_1, q_2 之间的相互作用力确实满足该式, 由此发现了电荷间静电力的规律, 这就是物理学研究中常用的类比法。

注意: 万有引力和库仑力有如下的区别。

(1) 只存在万有引力而无万有斥力, 但是库仑力却既有引力, 也有斥力;

(2) 从大小来看, 在原子内部或两个通常的带电体之间的库仑力都比同线度的万有引力大很多倍。

例 9-1 如图 9-3 所示, 试计算处于基态的氢原子内部, 原子核和电子的库仑力 F_e 与万有引力 $F_{\text{引}}$ 之比。

解 处于基态时原子核(质子)与核外电子之间的距离 $r = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$, 质子的质量为 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 电子质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 。

$$\text{库仑力} \quad F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

$$\text{万有引力} \quad F_{\text{引}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = G \frac{m_p m_e}{r^2}$$

$$\frac{F_e}{F_{\text{引}}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 G m_p m_e} = 2.26 \times 10^{39}$$

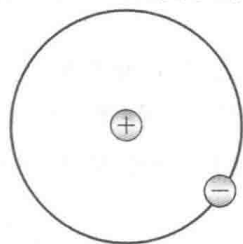


图 9-3 氢原子简图

可见, 原子核与电子之间的库仑力是万有引力的 2.26×10^{39} 倍, 所以, 在以后尤其在微观领域, 除特别说明之外, 一般不考虑万有引力。

9.2 电场强度 电场线

9.2.1 电场

用手推桌子是通过手把力直接作用在桌子上, 马拉车是通过绳子和车直接接触, 把力作用在车上。这些例子都说明, 力可以存在于直接接触的物体之间, 这种作用力称为接触力, 力的这种作用称为接触作用或近距作用。但是, 重力、电力、磁力等可以发生在相距一定距离的物体之间, 其间并不需要由原子、分子组成的物质作媒介。那么, 这种力究竟是怎样传递的呢? 围绕这个问题, 历史上有过长期争

论。一种观点认为这类作用不需要任何媒介,也不需要时间就能够由一个物体作用到另一个相距一定距离的物体之上,这种观点称为超距作用观点;另一种观点认为,这类力也是近距作用的,它是通过一种称为场的物质传递的。近代物理支持后一种观点。

电荷周围存在着由该电荷产生的场称为电场,电荷之间的相互作用就是通过这种场传递的。电场最基本的特征就是能对位于其中的带电体施以力的作用。

9.2.2 电场强度

为了研究电场中各点的性质,可以用一个点电荷 q_0 做实验,这个点电荷称为试探电荷。

试探电荷应该满足下列两个条件。

(1) 它的线度必须小到可以看成点电荷,以便确定场中每一点的性质。

(2) 其电量要足够小,小到它的置入不至于影响原来产生场的电荷分布,否则测出来的将是重新分布后的电荷激发的场。

先讨论点电荷 Q 在周围空间激发的静电场,把电场中要研究的点称为场点,在电场中放一个静止的试探电荷 q_0 ,按照库仑定律, q_0 所受的电场力可表示为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq_0}{r^2} \mathbf{r}_0$$

式中, r 为场点与点电荷 Q 的距离; $\mathbf{r}_0$ 为 Q 指向 q_0 的单位矢量。能不能用 $\mathbf{F}$ 表示场点的性质呢? 不能,因为 $\mathbf{F}$ 不仅与场点有关,而且与试探电荷 q_0 的电量有关, q_0 的电量越大, $\mathbf{F}$ 越大,但由上式可见,比值 $\mathbf{F}/q_0$ 与 q_0 无关。把

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/q_0 \quad (9-2)$$

称为电场强度,简称场强。电场强度是一个矢量,其大小等于单位电荷在该点所受电场力的大小,其方向与正电荷在该点的受力方向相同,单位:1 牛顿/库仑=1 伏特/米,即

$$1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$$

注意以下几点。

(1) 并非只有单位正电荷才能检验电场强度的大小,如 5 个任意电荷也是可以的,只要测出这 5 个单位电荷所受电场力,再与 5 个单位电荷相比,就可以得出电场强度的大小。但检验电荷不能大到影响原来电场的分布,否则就不再是原电荷分布的带电体在该点产生的电场了。

(2) 当 q_0 为正时, $\mathbf{E}$ 的方向与 $\mathbf{F}$ 的方向相同; q_0 为负时, $\mathbf{E}$ 的方向与 $\mathbf{F}$ 的方向相反。

(3) 空间某点的电场并不依赖于试探电荷的存在而存在,即如果空间有电场,放入试探电荷,只是通过你自己的手段去验证它的存在而已;你不去试,该点的电

场还是客观存在的。

9.2.3 场强叠加原理

若空间有多个电荷存在,则每个电荷都将在空间激发自己的电场,那么空间任一点的场强等于多少呢?在电场中放入试探电荷 q_0 就知道了。显然 q_0 受力为各个产生场的电荷对它作用力的矢量和,即

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{F}/q_0 = \mathbf{F}_1/q_0 + \mathbf{F}_2/q_0 + \cdots + \mathbf{F}_i/q_0 + \cdots + \mathbf{F}_n/q_0 \\ &= \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_i + \cdots + \mathbf{E}_n \end{aligned}$$

上式说明:电场中任一点处的电场强度等于各个电荷单独在该点产生电场强度的矢量和,这个结论称为场强叠加原理。

利用这个原理,可以计算任意复杂的带电体在空间产生的电场强度。因为对任意带电体来说,总可以将它们看成是由很多个小的带电单元组成的,每一部分小到可以看成点电荷,则这些点电荷系统在空间某点产生的场强就是该带电体在该点产生的电场强度。

9.2.4 电场强度的计算(已知电荷分布)

1. 点电荷电场中的场强

设在真空中有一个点电荷 q ,求距 q 为 r 处 P 点的场强。

若将一试探电荷 q_0 放在 P 点,则 q_0 受 q 作用的电场力为

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

由定义,有

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (9-3)$$

2. 点电荷系电场中的场强

由场强叠加原理知, n 个点电荷组成的电荷系统在空间某点产生的电场强度为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_i + \cdots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{r}_0 \quad (9-4)$$

3. 任意带电体的电场

在实际问题中所遇到的电场,常由电荷连续分布的带电体形成,要计算任意带电体附近所产生的场强,不能把带电体看作点电荷,用点电荷场强公式来计算。但任何带电体均可划分为无限多个电荷元 dq ,可以把它们看作点电荷系,整个带电体产生的场强,就可看作无限多个电荷元产生的场强的矢量和。

因此计算带电体的场强时,首先任取电荷元 dq ,然后求电荷元 dq 在电场中某

个给定点产生的场强 $d\mathbf{E}$, 按点电荷的场强公式, 可写为

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0$$

式中, $\mathbf{r}_0$ 为从 dq 所在点指向给定点的单位矢量; r 是电荷元 dq 到给定点的距离, 如图 9-4 所示。

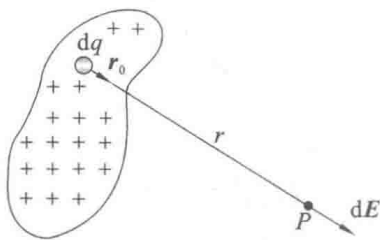


图 9-4 任意带电体的场强

最后, 求整个带电体在给定点产生的场强, 利用场强叠加原理, 得

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (9-5)$$

必须强调指出, 式(9-5)是一个矢量积分, 一般不能直接计算, 可先将 $d\mathbf{E}$ 在 x 、 y 、 z 三坐标轴方向上的分量 dE_x 、 dE_y 、 dE_z 写出, 然后分别对它们进行积分, 求得 $\mathbf{E}$ 的三个分量, 即

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

最后, 再由这三个分量确定场强 $\mathbf{E}$ 的大小和方向。

(1) 当电荷为体分布时, 在带电体上任取一带电单元, 其带电量为 dq , dq 到给定点的位置矢量为 $\mathbf{r}$, 体积为 dV , 它在 r 处产生的电场为 $d\mathbf{E}$, 则

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho dV}{r^3} \mathbf{r}$$

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \rho \frac{dV}{r^3} \mathbf{r} \quad (9-6)$$

(2) 当电荷为面分布时, 则 $dq = \sigma dS$

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint \frac{\sigma dS}{r^3} \mathbf{r} \quad (9-7)$$

(3) 若电荷为线分布, 则 $dq = \lambda dl$

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \lambda \frac{dl}{r^3} \mathbf{r} \quad (9-8)$$

9.2.5 电场线

为了形象地描绘空间某点的电场分布, 这里人为地引入电场线的概念。

1. 电场线的作图规定

(1) 电场线上各点的切线方向就是该点的 $\mathbf{E}$ 的方向(这样就把电场线与场强的方向联系起来了)。

(2) 通过垂直于场强方向单位面积的电场线数目等于 E (这样就把电场线的疏密与场强的大小联系起来了, 密处 E 大, 疏处 E 小, 即 $E \propto \Delta N / \Delta S$)。

2. 电场线性质

图 9-5 画出了几种电荷分布周围空间的电场线图, 由图可见, 电场线具有以下

性质。

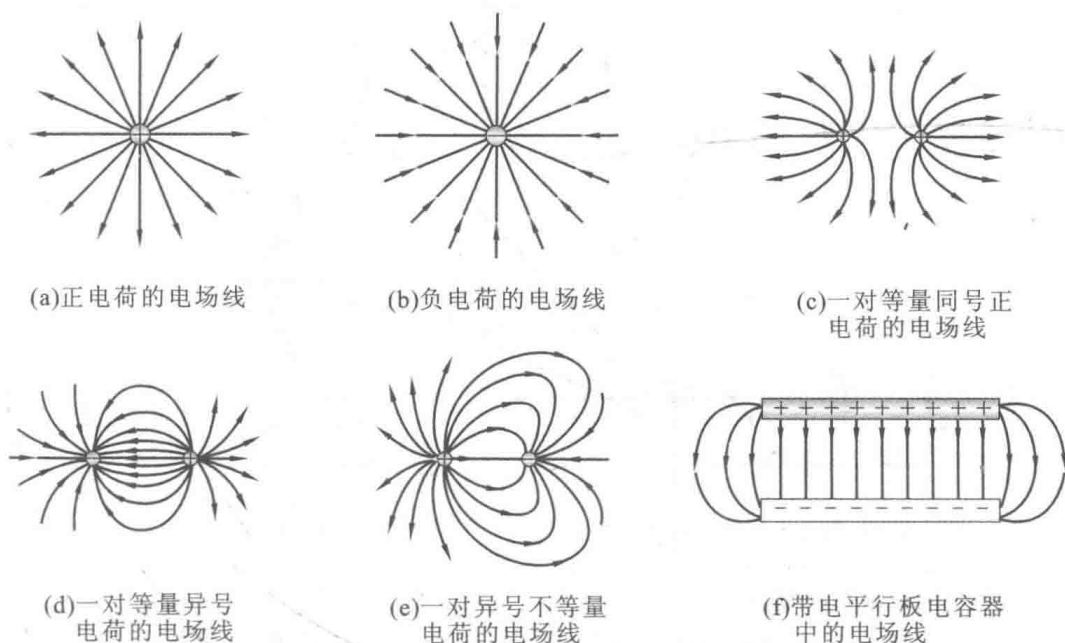


图 9-5 常见电荷分布产生的电场线

- (1) 两条或两条以上的电场线不能相交,这是因为空间一点的场强方向是唯一的。
- (2) 电场线发自正电荷,终于负电荷,无电荷处不中断。
- (3) 静电场的电场线不是闭合曲线。

还需指出,电场线仅是描述电场分布的一种人为方法,而不是静电场中真有这样的电场线存在。另外,电场线一般并不代表引入电场中的点电荷的运动轨迹。

9.2.6 应用举例

例 9-2 求电偶极子在其延长线上和中垂线上的场强。

解 电偶极子:由两个等量异号,相距为 l ,带电量分别为 $+q$ 、 $-q$ 的点电荷构成的系统称为电偶极子。

从 $-q$ 到 $+q$ 作一矢径 $\mathbf{l}$,则 $q\mathbf{l} = \mathbf{P}_e$ 称为电偶极矩,也称电矩。

电偶极子是一个很重要的概念,在研究电介质的极化、电磁波的发射和吸收以及中性分子之间的相互作用等问题时都要用到它。

(1) 电偶延长线上的场强。

设 $OA=r$,因为 $r_{+qA} < r_{-qA}$,所以 $|\mathbf{E}_+| > |\mathbf{E}_-|$,即 A 点的合场强 $\mathbf{E}$ 的方向向右,与 $\mathbf{P}_e$ 的方向相同(见图 9-6)。

$$E_p = E_+ + E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} = \frac{qlr}{2\pi\epsilon_0 \left[r^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2\right]^2}$$

所以

$$E_p = \frac{2lr}{4\pi\epsilon_0 r^4} q$$

$$E_p = \frac{2}{4\pi\epsilon_0 r^3} P_e \quad (9-9)$$

即场强 E_p 与电矩 P_e 同方向。

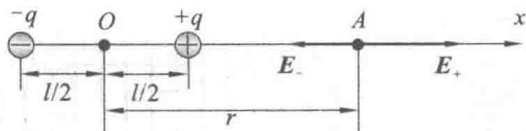


图 9-6 电偶极子在延长线上的场强

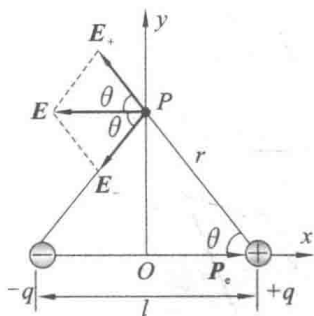


图 9-7 电偶极子在中垂线上的场强

(2) 中垂线上的场强。

将各电荷在 P 点产生的场强分解为垂直于 y 轴的分量 $E_{\text{垂直}}$ 和平行于 y 轴的分量 $E_{\text{平行}}$, 由图 9-7 可见, $E_{\text{平行}}$ 分量相互抵消, 所以

$$E_{\text{合}} = E_{\text{垂直}} = \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 \left[y^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^2 \right]} \cos\theta$$

因为

$$\cos\theta = \frac{\frac{l}{2}}{\left[y^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

所以

$$E = \frac{lq}{4\pi\epsilon_0 \left[y^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^2 \right]^{3/2}} = \frac{P_e}{4\pi\epsilon_0 \left[y^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^2 \right]^{3/2}}$$

当 $r \gg l$ 时, 有

$$E = E_{\text{垂直}} = \frac{P_e}{4\pi\epsilon_0 y^3} = \frac{E_{\text{延长}}}{2} \quad (9-10)$$

其方向与 P_e 反向。

从以上计算结果可知, 电偶极子产生场强 E 的大小与电矩 P_e 成正比, 与电偶极子到观察点的距离的立方成反比。

例 9-3 真空中有一均匀带电直线, 长为 L , 总电量为 q , 线外有一点 P 到直线的垂直距离为 a , P 点和直线两端的连线与 x 轴之间的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 , 如图 9-8 所示。求 P 点的场强。