

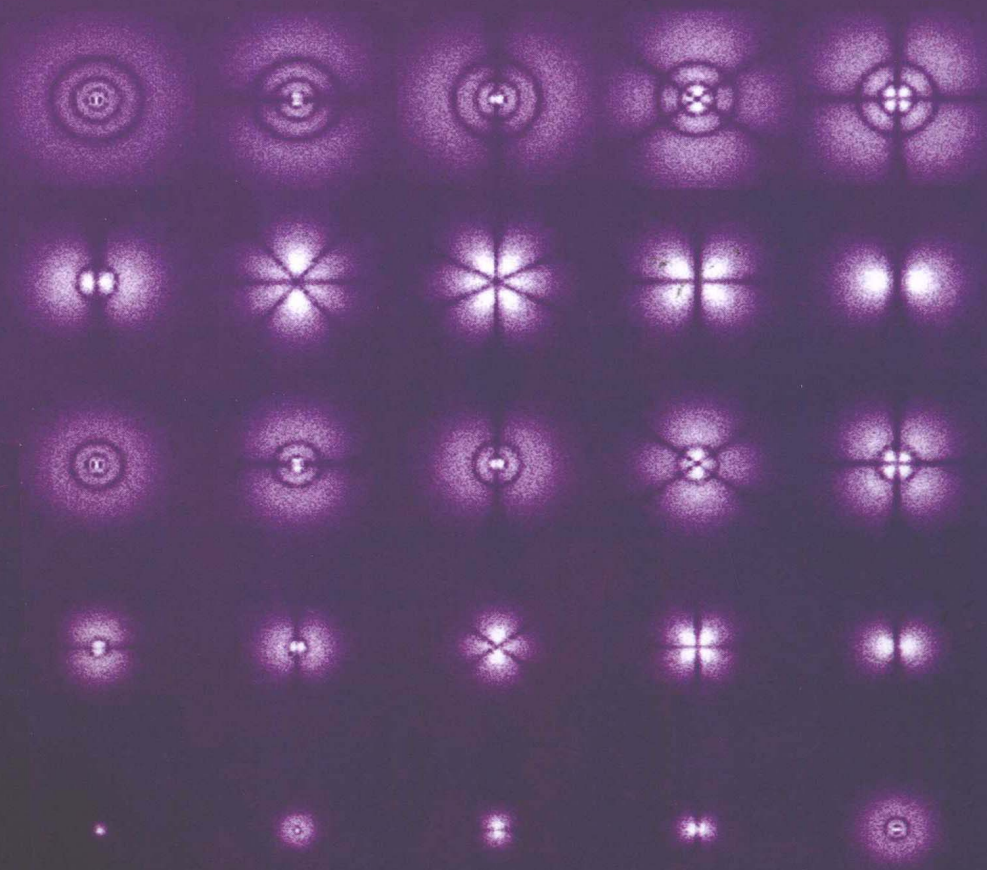


普通高等院校基础课规划教材

大学物理

下册 (第2版)

苟秉聪 胡海云 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校基础课规划教材

大学物理

下册 (第2版)

苟秉聪 胡海云 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

《大学物理》分上下两册,上册包括力学、热学、振动与波动、光学;下册包括电磁学、狭义相对论力学基础、量子物理基础、固体物理基础等内容。本书是根据“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”,在总结编者教学改革经验,并吸取了师生对第1版教材的建议基础上修订再版的。书中物理概念明确、物理图像清晰、论述深入浅出、并有适量的技术应用和理论扩展。

本书可作为大学工科各专业的大学物理课程的教材,也可作为综合性大学和高等师范院校相关专业的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 下册 / 苟秉聪, 胡海云主编. —2 版. —北京:
国防工业出版社, 2011. 1
普通高等院校基础课规划教材
ISBN 978 - 7 - 118 - 07144 - 3

I. ①大… II. ①苟… ②胡… III. ①物理学 - 高等学校 - 教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 264854 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 16¼ 字数 372 千字

2011 年 1 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 31.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

大学物理是高等学校非物理类专业学生一门重要的必修基础课。它所涉及的物理基础知识、科学思维方式和科学研究方法,是每位理工科大学学生所必须掌握的。该课程不仅是理工科各专业学生学习其他后续课程的重要铺垫,而且在培养学生科学的世界观,增强学生的创新意识和解决问题的能力等方面具有重要作用。本书根据“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”(简称“基本要求”),结合编者在北京理工大学多年教学研究和实践,并借鉴国内外同类教材的优点编写而成。《大学物理(第2版)》是根据广大教师和读者的建议,以及编者使用本书在北京理工大学授课的经验,对第1版的部分内容做了修改与补充,内容更加充实和新颖。

鉴于近年来物理学发展迅速,新理论、新发现、新应用层出不穷,大学物理应使学生了解这种变化。在编写过程中,第2版注重处理了经典物理和近代物理两者在结构和内容上的关系。经典物理是基础,体系结构成熟,在符合“基本要求”的基础上压缩精讲,而把节省出来的篇幅用于加强近代物理,多侧面、多角度介绍量子力学、相对论等近代物理基础知识,力求使难懂的教学内容形象化、具体化。我们还注意从物理学史的角度引入物理概念和定律,并适当介绍当代物理学的成就以及在工程技术上的应用,突出物理学理论与实际相结合的特点。

在写作风格上力求物理图像清晰、精炼,尽量避免繁琐的数学推导,突出物理思想;深入浅出,通俗易懂,注重激发学生的学习兴趣,增加教材的可读性和趣味性;在习题中编选了一些具有启发性的能力题,以培养学生的创新思维。

本书分上、下两册,共13章。上册包括力学、热学、振动与波动、波动光学;下册包括电磁学、狭义相对论力学基础、量子物理和固体物理基础。各章中带*号的部分是扩展内容,可有选择地讲授,也可让学生自学。为了便于教师和学生使用这套教材,还配套出版了《大学物理学习指导与习题解答(第2版)》,给出了教材中每一章的知识要点和习题详细解答。

本书由苟秉聪教授和胡海云教授主编,参加编写工作的有刘兆龙(第1、2章),缪劲松(第3、4章),胡海云(第5章),郑少波(第6章),吴晓丽(第7、8章),宋克辉(第9、10章),冯艳全(第11、13章),苟秉聪(第12章)。全书由苟秉聪教授和胡海云教授负责统稿,苟秉聪教授组织了编写讨论会并负责组织出版等工作。编者感谢国防工业出版社对本书的积极支持。书中难免出现不妥之处,真诚希望读者提出宝贵意见和建议。

编者

2010年9月

目 录

第7章 静电场	1
7.1 库仑定律	1
7.1.1 电荷	1
7.1.2 库仑定律	3
7.1.3 电力的叠加原理	4
7.2 电场 电场强度	4
7.2.1 电场	4
7.2.2 电场强度	5
7.2.3 电场强度的计算	6
7.3 静电场的高斯定理	11
7.3.1 电场线	11
7.3.2 电通量	12
7.3.3 高斯定理	14
7.3.4 利用高斯定理求静电场的分布	15
7.4 静电场的环路定理 电势	19
7.4.1 静电场的环路定理	19
7.4.2 静电势能	20
7.4.3 电势和电势差	21
7.4.4 电势的计算	22
7.4.5 等势面	25
7.4.6 电势梯度	26
7.5 静电场中的电偶极子	28
7.5.1 电偶极子在外电场中所受的力矩	28
7.5.2 电偶极子在外电场中的电势能	29
本章提要	29
习题	31

第 8 章 静电场中的导体和电介质	36
8.1 静电场中的导体	36
8.1.1 导体的静电平衡条件	36
8.1.2 静电平衡时导体上电荷的分布	37
8.1.3 静电屏蔽	40
8.1.4 静电技术在实际中的应用	42
8.2 静电场中的电介质	43
8.2.1 电介质对电场的影响	43
8.2.2 电介质的极化	44
8.2.3 电极化强度	46
8.3 有电介质时的高斯定理	47
8.3.1 电位移和有电介质时的高斯定理	48
8.3.2 有电介质时高斯定理的应用	48
8.4 电容 电容器	50
8.4.1 孤立导体的电容	50
8.4.2 电容器的电容	50
8.4.3 电容器的连接	53
8.5 静电场的能量	53
8.5.1 电荷系的静电能	54
8.5.2 电容器的能量	55
8.5.3 静电场的能量 能量密度	55
本章提要	57
习题	58
第 9 章 稳恒磁场	63
9.1 稳恒电流 电动势	63
9.1.1 电流 电流密度	63
9.1.2 欧姆定律的微分形式	65
9.1.3 电源和电动势	65
9.2 磁场 磁感应强度	66
9.2.1 磁的基本现象	66
9.2.2 磁场与磁感应强度	67
9.2.3 磁感应线	69
9.3 毕奥—萨伐尔定律	70
9.3.1 毕奥—萨伐尔定律的内容	70
9.3.2 毕奥—萨伐尔定律的应用	70

*9.3.3 运动电荷的磁场	75
9.4 磁场的高斯定理和安培环路定理	75
9.4.1 磁通量 磁场的高斯定理	75
9.4.2 安培环路定理	76
9.4.3 安培环路定理的应用	78
9.5 磁场对载流导线的作用	81
9.5.1 安培力	81
9.5.2 磁场对载流线圈的作用 磁矩	84
9.6 磁场对运动电荷的作用	86
9.6.1 洛伦兹力	86
9.6.2 带电粒子在磁场中的运动	87
9.6.3 霍耳效应	89
9.7 磁场中的磁介质	90
9.7.1 磁介质对磁场的影响	90
9.7.2 磁介质的磁化	91
9.7.3 磁化强度矢量 M 与磁化电流	93
9.7.4 有磁介质时的安培环路定理 磁场强度矢量 H	94
*9.7.5 铁磁质	96
本章提要	99
习题	101
 第 10 章 电磁感应 麦克斯韦方程组	 106
10.1 法拉第电磁感应定律	106
10.1.1 电磁感应现象	106
10.1.2 法拉第电磁感应定律	107
10.1.3 楞次定律	108
10.2 动生电动势和感生电动势	110
10.2.1 动生电动势	110
10.2.2 感生电动势与感生电场	114
10.2.3 涡电流及电磁阻尼	117
10.3 互感与自感	118
10.3.1 互感	118
10.3.2 自感	120
10.4 磁场的能量和能量密度	121
10.5 麦克斯韦方程组 电磁波	123
10.5.1 位移电流	123

10.5.2	安培环路定理的普遍表达式	125
10.5.3	麦克斯韦方程组	126
10.5.4	电磁波	127
*10.6	超导	129
10.6.1	超导体的物理特性	130
10.6.2	BCS 理论简介	131
10.6.3	约瑟夫森效应	131
10.6.4	超导在技术中的应用	132
本章提要		133
习题		134
第 11 章 狭义相对论力学基础		139
11.1	狭义相对论的基本原理	140
11.1.1	绝对时空观和伽利略变换	140
11.1.2	爱因斯坦相对性原理和光速不变原理	141
11.2	洛伦兹变换	144
11.3	时间延缓和长度收缩	148
11.3.1	同时的相对性	148
11.3.2	时间延缓	150
11.3.3	长度收缩	152
11.3.4	因果律	153
11.4	相对论速度变换	154
11.5	相对论动力学基础	156
11.5.1	相对论动量和质量	156
11.5.2	质能关系	157
11.5.3	相对论能量和动量的关系	161
*11.6	广义相对论简介	163
本章提要		164
习题		165
第 12 章 量子物理基础		168
12.1	黑体辐射和能量子假设	168
12.1.1	黑体辐射	168
12.1.2	普朗克能量子假设	169
12.2	光的粒子性	171

12.2.1	光电效应	171
12.2.2	爱因斯坦光子假设和光电效应方程	173
12.2.3	康普顿效应	174
12.2.4	光的波粒二象性	176
12.3	氢原子光谱	177
12.3.1	氢原子光谱的规律性	177
12.3.2	玻尔的氢原子理论	177
12.4	粒子的波动性与波函数	180
12.4.1	德布罗意波	180
12.4.2	德布罗意波的实验验证	181
12.4.3	波函数的统计解释	182
12.4.4	自由粒子波函数	184
12.5	不确定关系	185
12.6	薛定谔方程	187
12.6.1	自由粒子薛定谔方程	187
12.6.2	薛定谔方程和哈密顿量	188
12.6.3	定态薛定谔方程	189
12.7	一维势场中的粒子	190
12.7.1	一维无限深方势阱中的粒子	190
12.7.2	势垒贯穿	193
12.7.3	简谐振子	195
12.8	原子中的电子	196
12.8.1	轨道角动量	196
12.8.2	氢原子	197
12.8.3	电子自旋和泡利不相容原理	201
12.8.4	4个量子数和原子的壳层结构	202
*12.9	激光	204
12.9.1	激光的产生	204
12.9.2	激光的特性	206
12.9.3	激光的应用:激光冷却	206
本章提要		207
习题		209

第13章 固体物理基础 212

13.1	金属中的自由电子	212
------	----------------	-----

13.1.1	自由电子气模型	212
13.1.2	自由电子气的费米能量公式	214
13.1.3	态密度 费米—狄拉克分布	216
13.2	固体能带理论	219
13.2.1	固体的能带	219
13.2.2	价带、导带和禁带	222
13.2.3	导体、绝缘体和半导体	223
13.3	半导体	225
13.3.1	半导体分类	225
13.3.2	PN 结	227
*13.3.3	半导体器件	228
	本章提要	231
	习题	232
物理常数表		234
常用数值表		235
习题答案		236
索引		244
参考文献		250

第 7 章

静 电 场

电磁学是物理学的一个重要分支,它是研究电磁运动基本规律的学科。电磁学理论的发展不仅与人们的日常生活和生产技术有着十分密切的关系,而且也是电工学、无线电电子学、电子计算机技术以及其他新科学、新技术发展的理论基础。

早在公元前 6 世纪古希腊学者泰勒斯(Thales)就观察到摩擦起电的现象。在我国,最早在公元前 4 世纪到 3 世纪就有磁石吸铁以及磁石指南等现象的记载。公元 16 世纪,英国医生吉尔伯特(W. Gilbert)对电和磁现象进行了系统的研究,并且采用了电力、电吸引以及磁极等名词。1785 年法国物理学家库仑(C. A. de Coulomb)用自己设计的扭秤实验得出了电力的平方反比定律,使电学和磁学的研究进入了定量阶段。然而在相当长的历史时期内,电和磁被看作是两种完全不同的现象分别加以研究。直到 1820 年丹麦物理学家奥斯特(H. C. Oersted)发现了电流的磁效应,才使电学与磁学彼此隔绝的情况有了突破,开始了电磁学的新阶段。1831 年英国物理学家法拉第(M. Faraday)发现了电磁感应现象,并提出了场的概念,进一步揭示了电与磁的统一性。1865 年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)总结了前人的工作,极富创见地提出了感应电场和位移电流的假说,建立起以一套方程组(麦克斯韦方程组)为基础的完整的电磁场理论。

静电场是由真空中相对于观察者静止的电荷所产生的电场。本章从静电场的基本实验规律——库仑定律出发,引入描述静电场的两个基本物理量——电场强度和电势,并导出静电场的两条基本定理——高斯定理和环路定理,最后讨论电场强度和电势两者之间的关系。

7.1 库 仑 定 律

7.1.1 电 荷

人类对电荷的认识最初源于摩擦起电现象和自然界的雷电现象。公元前 6 世纪,希腊人发现用毛皮摩擦过的琥珀能够吸引轻小物体。到 16 世纪末、17 世纪初,人们进一步发现,其他的物体,如玻璃棒、硬橡胶棒或水晶块等,用毛皮或丝绸摩擦后,都能吸引轻小物体。这种现象称为摩擦起电,也就是通过摩擦方法使物体带上了电荷。

实验表明,自然界中只有两种电荷,同种电荷相斥,异种电荷相吸。这两种电荷一种称为正电荷,一种称为负电荷,这种命名法是美国物理学家富兰克林(B. Franklin)提出来的,并且一直沿用至今。

物体所带电荷数量的多少叫做电量,常用 Q 或 q 表示。在国际单位制中,电量的单位是库[仑],用 C 表示。正电荷电量取正值,负电荷电量取负值。一个带电体所带的总电量是其所带正负电量的代数和。

宏观带电体所带电荷种类的不同是由于组成它们的微观粒子所带电荷种类不同。根据物质的原子结构理论,物质是由分子、原子组成的,而原子又由带正电的原子核和带负电的电子组成。原子核内带电的粒子是质子,中子不带电。一个电子所带的电量和一个质子所带的电量数值相同,但符号相反。在通常情况下,物体中任何一部分都包含相同数目的质子和电子,所以对外界不表现出电性。当两个电中性的宏观物体相互摩擦时,可使一个物体从另一个物体得到电子,或者失去一些电子给另一个物体,结果得到电子的物体就带负电,失去电子的物体就带正电。因此摩擦起电实际上就是通过摩擦作用使电子从一个物体转移到另一个物体的过程。

1. 电荷的量子性

20 世纪初,美国物理学家密立根(R. Millikan)花了数年时间通过著名的油滴实验发现,物体所带的电荷不是以连续方式出现,所有带电体的电量都是一个基本单元的整数倍。电荷的这个特性就叫做电荷的量子性,而这个基本单元就是一个电子所带电量的绝对值,常以 e 表示,称为基元电荷。其测量值(2002 年)为 $e = 1.60217653 \times 10^{-19} C$;在计算中通常取 $e = 1.602 \times 10^{-19} C$ 。

自然界中任何一个电荷都可以写成 $q = Ne$,其中 N 是一个整数。例如,电子带电量 $-e$,质子带电量 $+e$, α 粒子,即氦原子核,是由紧密结合在一起的两个质子和两个中子所组成的,具有 $+2e$ 的电量;一个原子序号为 Z 的原子,带有 Ze 的正电荷,而核外有 Z 个电子,因而是电中性的。

近代物理从理论上预言一些粒子是由被称为夸克和反夸克的更小的粒子组成,每一个夸克或反夸克的电量为 $\pm e/3$ 或 $\pm 2e/3$ 。但在实验中至今还没有检测到单独存在的夸克。因此,人们仍然把电子电量看作是基本电量。即使存在自由夸克,电荷的量子性依然不会改变,而只是改变了电荷的基本单元。

当我们讨论电磁现象的宏观规律时,所涉及的电荷通常是基元电荷的许多倍。例如,用毛皮摩擦塑料棒,可以转移 10^{10} 个甚至更多的电子。因此我们可以忽略电荷的量子性所引起的微观起伏,而认为电荷连续地分布在带电体上,就像空气一样,尽管它是由许多分立的分子组成,但却表现出连续性。

2. 电荷守恒

大量实验表明,在一个与外界没有电荷交换的系统内,正、负电荷的电量的代数和在任何物理过程中总是保持不变。这就是电荷守恒定律。

电荷守恒定律是物理学最基本的定律之一。近代科学实践证明,它不仅在一切实宏观过程(如摩擦起电)中成立,一切微观过程也普遍遵守电荷守恒定律。如在原子核衰变过程 ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ 中,衰变前后,电荷量的代数和保持不变。在粒子的相互作用过程中,尽管电荷是可以产生和消灭的,电荷守恒并未因此而遭到破坏。如在正负电子对的湮灭过程中,一对正负电子转化为两个不带电的光子,即 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$,而一个高能光子与一个重原子核作用时,该光子又可以转化为一个正电子和一个负电子。这种电荷的产生和消灭并不改变系统中电荷的代数和。

7.1.2 库仑定律

在发现电现象以后的两千多年的时间里,人们对电的认识一直处于定性阶段。最早的定量研究是在 1785 年,法国科学家库仑用他自己发明的扭秤测定了两个带电球体之间的相互作用力,并在此基础上,提出了两个静止点电荷之间相互作用的规律,即库仑定律。所谓点电荷,是电学中的一个理想模型。当带电体自身的几何线度远小于它与其他带电体之间的距离时,该带电体的形状、大小和电荷在其上的分布均可以忽略,我们可以把它看作一个带电的几何点,即点电荷。由此可见,一个带电体能否被看作点电荷完全由所讨论的问题决定。点电荷这一概念只具有相对的意义,它本身不一定是很小的带电体。

库仑定律表述如下:真空中,两个静止点电荷之间的相互作用力(称为库仑力)的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;作用力的方向沿着这两个点电荷的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。

如图 7-1 所示,两个点电荷的电量为 q_1 和 q_2 ,其值可正可负, $e_{r_{21}}$ 表示从 q_1 指向 q_2 的单位矢量,则 q_2 受到 q_1 的作用力为

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \mathbf{e}_{r_{21}} \quad (7-1)$$

式中: r_{21} 表示两个点电荷之间的距离; k 为比例常数。当 q_1 和 q_2 同号时, $\mathbf{F}_{21}$ 和 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 同方向,表明 q_1 和 q_2 之间的作用力是斥力;当 q_1 和 q_2 异号时, $\mathbf{F}_{21}$ 和 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 反方向,表明 q_1 和 q_2 之间的作用力是引力。

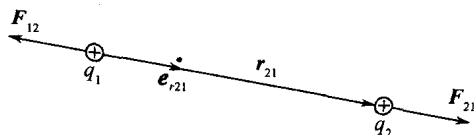


图 7-1 库仑定律

注意库仑定律和万有引力定律的相似性:二者均为平方反比定律($F \propto 1/r^2$)。但万有引力的大小与两质点质量的乘积成正比,而且总是吸引力;库仑力的大小与两个点电荷所带电量的乘积成正比,并且可以是吸引力,也可以是斥力。

由式(7-1)可以看出,两个静止点电荷之间的相互作用力遵守牛顿第三定律,即

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} \quad (7-2)$$

在国际单位制中,由实验测得库仑定律中的比例系数为

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

为了使以后经常使用的电磁学规律的表达式得到简化,通常引入另一常量 ϵ_0 ,使 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$,这样就得到库仑定律的常用表达式

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \mathbf{e}_{r_{21}} \quad (7-3)$$

这里引入的 ϵ_0 称为真空电容率,又称为真空介电常数,其值为

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

库仑定律是一个实验定律,经过大量精密实验测定。现代精密的实验测得库仑力与距

离平方成反比中的幂取2的误差不超过 10^{-16} 。从高能电子的散射实验到人造地球卫星的地球磁场研究中已经证实,两个静止点电荷之间距离的数量级在 $10^{-17}\text{m} \sim 10^7\text{m}$ 的范围内,库仑定律是极其精确地与实验相符合的。

例7-1 设两个 α 粒子相距 10^{-13}m ,比较它们之间的库仑力和万有引力的大小。已知 α 粒子带电量为 $2e$,质量为 $6.68 \times 10^{-27}\text{kg}$,万有引力常数为 $G = 6.67 \times 10^{-11}\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

解 由库仑定律,两个 α 粒子间的库仑力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{(2 \times 1.6 \times 10^{-19})^2}{4 \times 3.14 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (10^{-13})^2} = 9.21 \times 10^{-2}\text{N}$$

由万有引力定律,两粒子间的万有引力为

$$f = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{(6.68 \times 10^{-27})^2}{(10^{-13})^2} = 2.98 \times 10^{-37}\text{N}$$

可见,在两个 α 粒子之间,万有引力远远小于库仑力。所以在研究带电粒子的相互作用时,它们之间的万有引力通常都可以忽略不计。

7.1.3 电力的叠加原理

实验表明:两个点电荷之间的作用力并不因第三个点电荷的存在而有所改变。如果空间中存在两个以上的点电荷,则作用在每一个点电荷上的合力,等于其他点电荷单独存在时对该点电荷的作用力的矢量和。这一结论称为电力的叠加原理。

例如,如果以 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 分别表示点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 单独存在时对点电荷 q_0 的作用力,则它们同时存在时,作用在 q_0 上的合力为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i \quad (7-4)$$

当 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 和 q_0 都静止时,各个 F_i 可以用库仑定律式(7-3)计算,可得

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \frac{q_0 q_i}{4\pi\epsilon_0 r_{0i}^2} \mathbf{e}_{r_{0i}} \quad (7-5)$$

其中, r_{0i} 表示 q_0 与 q_i 之间的距离, $\mathbf{e}_{r_{0i}}$ 是由 q_i 指向 q_0 的单位矢量。

7.2 电场 电场强度

7.2.1 电场

库仑定律描述了真空中两个相隔一定距离的点电荷之间的相互作用力与哪些因素有关,但它并没有解释这种作用力是怎样来传递的。为了解释这一问题,历史上曾经有过两种对立的观点。一种观点认为两个电荷之间的相互作用力是超距作用,即这种作用力既不需要中间媒质,也不需要传递时间,而是直接和即时地发生作用。这种作用方式可表示为

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

另一种观点是法拉第在19世纪30年代提出来的,并且被近代物理学的理论和实验证实是正确的。这种观点认为,任何电荷都在其周围的空间激发电场,电荷与电荷之间的相互作用是通过电场对电荷的作用来实现的。例如,当电荷 q_1 位于电荷 q_2 的附近时,即处于 q_2 的电场

中, q_1 所受到的作用力就是通过 q_2 的电场施加给它的。同理, q_2 也处于 q_1 的电场中, q_2 受到的作用力是通过 q_1 的电场施加给它的。这种作用方式可表示为

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

因此, 电荷之间的作用力也称为电场力。当电荷的电量发生变化或电荷运动时, 它所产生的电场也随之发生变化。这个变化的电场以光速在空间传播, 电荷之间的相互作用也以光速传递。

电场以及我们后面将会讲到的磁场是一种特殊形态的物质, 电磁场和物质的另一种通常形态——由原子、分子组成的实物一样, 具有能量、动量和质量等物质的属性。电场对外的表现主要有:

(1) 处于电场中的电荷要受到电场力的作用;

(2) 当电荷在电场中运动时, 电场力要对电荷做功, 这表示电场具有能量。

因此我们将从力和能量这两方面来研究电场的性质, 并相应地引入描述电场性质的两个物理量——电场强度和电势。

7.2.2 电场强度

相对于观察者静止的电荷在其周围产生的电场称为静电场, 静电场对电荷的作用力称为静电力。为了研究静止电荷 Q 产生的电场 (Q 称为场源电荷), 我们在电场中引入一个试验电荷 q_0 。这一试验电荷需要满足如下要求: 电荷 q_0 的几何线度要充分小, 即可以把它看成点电荷, 从而可以研究电场中各点的性质; 电荷 q_0 的电量要充分小, 当把它引入电场中时不会显著改变原来电场的分布, 从而可以测定原来电场的性质。

实验表明, 在电场中不同的位置 a 、 b 和 c 处, 试验电荷 q_0 所受到的电场力 F 的大小和方向一般来说是不同的, 如图 7-2 所示。但对于电场中任一固定点 (称为场点) 而言, q_0 所受到的电场力是确定的, 而且这一电场力和试验电荷的电量 q_0 成正比。如果把试验电荷的电量增大到 n 倍, 则电场力 F 也增大到 n 倍, 而力的方向不变。如果把试验电荷换成等量异号的电荷, 则力的大小不变, 而方向相反。因此, 对电场中的固定点来说, 试验电荷所受到的电场力 F 与试验电荷电量 q_0 的比值 F/q_0 是一个与试验电荷的大小、正负无关的矢量。这个矢量只与给定电场中各固定点的位置有关, 反映了电场本身的性质。我们把这个矢量定义为电场中各点的电场强度, 简称场强, 用 E 表示, 即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (7-6)$$

式 (7-6) 表明, 电场中任意点的电场强度等于静止于该点的单位正电荷所受的电场力。在静电场中, 各点的 E 可以各不相同, E 是空间坐标的矢量函数。

在国际单位制中, 电场强度的单位为 N/C 。以后会看到, 电场强度的单位亦为 V/m , 且

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

需要指出, 在已知静电场中各点电场强度 E 的情况下, 可由式 (7-6) 求得任一点电荷 q 在场中所受到的电场力为

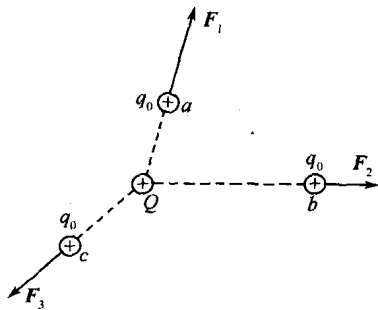


图 7-2 电场中不同位置处试验电荷的受力情况

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (7-7)$$

表 7-1 给出了一些典型的电场强度的数值。

表 7-1 一些典型电场强度的数值

单位: N/C

室内天线附近	约 3×10^{-2}	电视机的电子枪内	约 10^5
无线电波内	约 10^{-1}	空气的电击穿强度	约 3×10^6
日光灯内	约 10^2	X 射线管内	5×10^6
地球表面附近	约 10^2	氢原子内电子轨道处	6×10^{11}
太阳光内(平均)	约 10^3	中子星表面	约 10^{14}
雷雨云附近	约 10^4	铀核表面	2×10^{21}

当空间存在由多个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成的点电荷系时, 根据电力的叠加原理, 点电荷系的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i}{q_0} = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{F}_i}{q_0}$$

式中, $\mathbf{F}_i/q_0$ 是电荷 q_i 单独存在时在 q_0 所在位置产生的电场强度, 所以

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i \quad (7-8)$$

式(7-8)表明, 在点电荷系产生的电场中任一点处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。这就是场强叠加原理。

7.2.3 电场强度的计算

1. 点电荷的电场

在一个静止的点电荷 q 的电场中, 将一试验电荷 q_0 放在距 q 为 r 处的 P 点, 如图 7-3 所示。根据库仑定律, q_0 受到的电场力为

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

式中, $\mathbf{e}_r$ 表示从场源电荷 q 指向场点 P 的单位矢量。由电场强度的定义, P 点的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (7-9)$$

这就是点电荷的电场强度分布公式。式中, 当 $q > 0$ 时, $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 同向(图 7-3(a)), 当 $q < 0$ 时, $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 反向(图 7-3(b))。式(7-9)表明, 静止的点电荷的电场具有球对称性, 即在以点电荷为中心的每个球面上各点的电场强度大小相等, 电场强度的方向处处沿着半径向外($q > 0$)或向内($q < 0$)。

将点电荷电场强度公式(7-9)代入式(7-8)可得点电荷系所产生的电场的电场强度为

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{e}_{ri} \quad (7-10)$$

其中, r_i 表示 q_i 与场点之间的距离, $\mathbf{e}_{ri}$ 是由 q_i 指向场点的单位矢量。

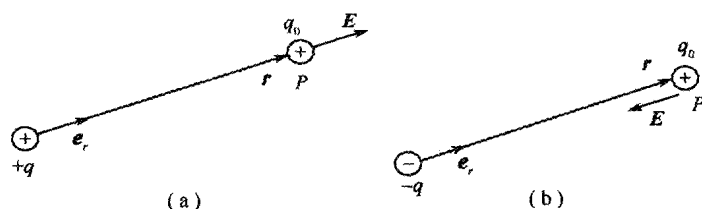


图 7-3 静止的点电荷的电场

2. 电偶极子的电场

由等量异号点电荷 $+q$ 和 $-q$ 所组成的电荷系统, 当它们之间的距离 l 比从它们到所讨论的场点的距离 r 小得多时 ($l \ll r$), 称为电偶极子, 如图 7-4 所示。 l 表示从负电荷指向正电荷的矢量线段, 电量 q 与矢量 l 的乘积 ql 反映了电偶极子本身的特征, 称为电偶极子的电偶极矩, 简称电矩, 用 p 表示, 即

$$p = ql$$

设 $+q$ 和 $-q$ 到电偶极子中垂线上任一点 P 的距离分别为 r_+ 和 r_- , r 为电偶极子中心到 P 点的距离, α 为 r_+ 与 l 之间的夹角。根据式 (7-9), $+q$ 和 $-q$ 在 P 点产生的电场强度的大小分别为

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

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

方向分别沿着两个电荷与 P 点的连线。由对称性, 正、负电荷在 P 点产生的电场强度沿竖直方向的分量相互抵消, 而水平方向的分量相等。 P 点的合电场强度大小为

$$E = E_+ \cos\alpha + E_- \cos\alpha = 2E_+ \cos\alpha$$

因为 $\cos\alpha = \frac{l/2}{\sqrt{r^2 + (l/2)^2}}$, 所以

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

由于 $l \ll r$, $\left(1 + \frac{l^2}{4r^2} \right) \approx 1$, 故上式简化为

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

考虑到 E 的方向与电偶极矩 p 的方向相反, 上式可写为矢量式

$$E = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3} \quad (7-11)$$

此结果表明, 电偶极子中垂线上任一点的电场强度与电偶极子的电矩成正比, 与距离 r

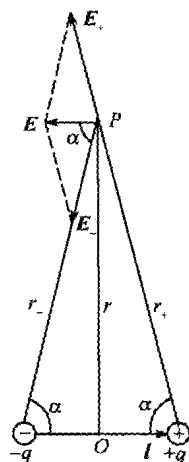


图 7-4 电偶极子中垂线上的电场