



普通高等教育“十二五”规划教材

主 编 詹 煜 李传起

副主编 程国生 张成义 王祖松

大学物理教程

(下册)



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理教程

(下册)

主 编 詹 煜 李传起
副主编 程国生 张成义 王祖松

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分为上、下两册.上册内容包括质点运动学、质点动力学、功和能、动量、刚体力学、振动、波动、狭义相对论、气体动理论和热力学基础;下册内容包括静电场、静电场中的导体和电介质、电流和稳恒磁场、电磁感应、几何光学、光的干涉、光的衍射、光的偏振、早期量子论和量子力学基础、固体和激光的量子理论简介、核物理与粒子物理简介.全书还包含六个专题,分别为:大气的运动,流体力学简介,相变热力学简介,大气电场,晴天大气电导率、体电荷和电流,大气散射的基本理论与现象.本书不仅可以让学生学习物理学的基本原理和方法,而且通过将物理学基本原理与大气科学相结合,可加深学生对物理学原理在大气科学中应用的认识.

本书可作为高等院校理工科非物理类本科专业的基础物理课程教材,也可供其他相关专业选用,并可供中学物理教师进修、自学使用.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程.下册/詹煜,李传起主编. —北京:科学出版社,2011
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-03-031876-3

I. ①大… II. ①詹…②李… 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(2011)第 141103 号

责任编辑:窦京涛 唐保军/责任校对:钟 洋
责任印制:张克忠/封面设计:北京蓝正广告设计有限公司

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>

新 华 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 7 月第一次印刷 印张:34 1/4

印数:1—6 000

字数:850 000

定价:58.00 元(上、下册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书的原稿是编者在 1990~2010 年对南京信息工程大学(含滨江学院)非物理类的所有理工科专业学生讲课时使用的讲义. 在编写过程中, 学习借鉴了兄弟院校的经验, 参考了部分国内外教材, 同时考虑了当前学生的实际需要, 力求理论联系实际, 加强基础理论的叙述和分析, 以简明、准确的语言阐述物理学中的原理、定律、定理和定义, 引导和启发学生理解物理学的基本原理和概念. 在编写中注意保证全书的系统性、完整性和科学性, 同时加入了一定的物理学原理在气象科学中应用和实现的内容. 这些内容包含了大气动力学、流体力学、大气热力学、大气电磁学、大气辐射等, 主要通过例题、原理应用叙述和专题等形式体现出来, 使本书具有鲜明的气象特色. 编者希望通过本书不仅让学生学习物理学的基本原理, 而且还要了解物理学与大气科学的结合, 从而加深对物理学的认识.

全书分为两册. 上册内容包括质点运动学、质点动力学、功和能、动量、刚体力学、振动、波动、狭义相对论、气体动理论和热力学基础; 下册内容包括静电场、静电场中的导体和电介质、电流和稳恒磁场、电磁感应、几何光学、光的干涉、光的衍射、光的偏振、早期量子论和量子力学基础、固体和激光的量子理论简介、核物理与粒子物理简介.

本书由詹煜、李传起任主编, 程国生、张成义、王祖松任副主编. 其中第 1~7 章由詹煜编写, 第 8~10 章由王祖松编写, 第 11~14 章由张成义编写, 第 15~21 章由程国生编写. 专题 A、专题 D、专题 E 由詹煜编写, 专题 B、专题 C 由王祖松编写, 专题 F 由程国生编写.

在编写本书过程中还得到了南京信息工程大学赵德林、刘照森、曹天德、王志琴、郭胜利、王铁邦、赵浩峰、王玲、裴世鑫、吴义根、万韬俞、陈玉林、徐飞、宋标、陈美红、孔敏、王颖、周晓燕、杨翠红、蒋晓龙、沈国柱、赖敏、曹原、刘彦力、何绍奎、钟霞、谢爱根、苏静、李庆芳、雷勇、刘占辉、缪菊红、孙婷婷、赵立龙、张雅男、顾斌、丁留贯、顾河清、马荣、徐林华、王俊峰、仲坤、顾芳、张瑞东、崔芬萍、杨永梅、王璐等老师的帮助和指导, 在此表示衷心的感谢.

本书的编写出版还得到了科学出版社昌盛、窦京涛等编辑的帮助, 在此致以衷心的感谢.

由于编者的水平有限, 书中难免存在不当之处, 希望读者批评指正.

本书受到下列课题的资助:

南京信息工程大学第三期教改项目“大学物理精品课程”, 课题号 JG032006J04.

南京信息工程大学第四期教改项目“大学物理精品教材”, 课题号 07JC0013.

滨江学院教改工程项目“大学物理教材建设”, 课题号 2008JC0006.

詹煜

2011 年 2 月 1 日

目 录

前言

第 11 章 静电场	1
11.1 电荷及其相互作用	1
11.1.1 电荷	1
11.1.2 电荷守恒定律	2
11.1.3 电荷的量子性	2
11.1.4 电荷的相对论不变性	2
11.1.5 库仑定律	2
11.2 电场 电场强度	3
11.2.1 电场	3
11.2.2 利用场强叠加原理解电场问题	5
11.3 电场线 电通量	8
11.3.1 电场线	8
11.3.2 电通量	8
11.4 高斯定理	10
11.4.1 高斯定理	10
11.4.2 高斯定理应用举例	11
11.5 静电场的环路定理 电势能	14
11.5.1 静电力的功	15
11.5.2 电势能 电势	16
11.5.3 电势的计算	17
11.6 等势面 场强与电势的关系	20
11.6.1 等势面	20
11.6.2 场强与电势关系	21
11.7 静电场中的电偶极子	23
11.7.1 外电场对电偶极子的力矩和取向作用	23
11.7.2 电偶极子在电场中的电势能和平衡位置	23
习题	23
第 12 章 静电场中的导体和电介质	26
12.1 静电场中的导体	26
12.1.1 导体的静电平衡条件	26
12.1.2 静电平衡时导体上的电荷分布	27
12.1.3 静电屏蔽	29
12.2 电容 电容器	30
12.2.1 孤立导体的电容	30

12.2.2	电容器	31
12.2.3	几种常见电容器电容的计算	31
12.3	静电场中的电介质	33
12.3.1	电介质的电极化	33
12.3.2	电极化的微观机理	33
12.4	电介质中的电场 高斯定理 电位移	35
12.4.1	电介质中的电场	35
12.4.2	有介质时的高斯定理	35
12.5	电场的能量	38
12.5.1	带电电容器的能量	38
12.5.2	电场的能量	39
	习题	41
专题 D 大气电场		44
第 13 章 电流和稳恒磁场		49
13.1	恒定电流条件和导电规律	49
13.1.1	电流强度和电流密度	49
13.1.2	电流密度	49
13.1.3	电流的连续性方程 稳恒电流	50
13.1.4	稳恒电场的建立	51
13.1.5	欧姆定律的微分形式	52
13.1.6	电功率和焦耳定律	53
13.2	磁感应强度 磁场对电流的作用	53
13.2.1	基本磁现象	53
13.2.2	安培定律 毕奥-萨伐尔定律	55
13.2.3	磁感强度 B 的定义	56
13.2.4	毕奥-萨伐尔定律的应用	56
13.3	磁场的基本特征	59
13.3.1	磁感线 磁通量	59
13.3.2	磁场的高斯定理	60
13.3.3	磁场的安培环路定理	61
13.4	磁场对运动电荷的作用	63
13.4.1	带电粒子在磁场中的运动	63
13.4.2	磁场对载流导线的作用	66
13.5	磁介质的磁化	69
13.5.1	顺磁性和抗磁性	69
13.5.2	原子中电子的磁矩	69
13.5.3	磁化强度和磁化电流	70
13.5.4	介质中的磁场	72
	习题	74
专题 E 晴天大气电导率、体电荷和电流		77

第 14 章 电磁感应	83
14.1 电磁感应的基本定律.....	83
14.1.1 电磁感应现象	83
14.1.2 楞次定律	84
14.1.3 法拉第电磁感应定律	84
14.2 动生电动势.....	85
14.2.1 动生电动势	86
14.2.2 洛伦兹力传递能量,不做功	86
14.3 感生电动势 涡旋电场 涡旋电流.....	88
14.3.1 涡旋电场	88
14.3.2 感生电动势	88
14.3.3 涡电流	89
14.4 自感应与互感应.....	90
14.4.1 自感应	90
14.4.2 互感应	91
14.5 磁场能量 磁场能量密度.....	94
14.6 位移电流 电磁场理论.....	96
14.6.1 问题的提出	96
14.6.2 位移电流的提出	96
14.6.3 全电流安培环路定律	97
14.6.4 麦克斯韦方程组	98
14.6.5 电磁场的物质性	99
习题	100
第 15 章 几何光学	103
15.1 几何光学的基本定律	103
15.1.1 光波与光线	103
15.1.2 几何光学的基本定律	104
15.2 球面反射的成像公式	106
15.3 球面镜成像的作图法	107
15.4 球面镜的横向放大率	108
15.5 球面折射成像	109
15.6 薄透镜	111
15.6.1 傍轴光线条件下的薄透镜物像公式	111
15.6.2 薄透镜焦点和焦距	112
15.6.3 薄透镜成像的作图法	113
15.7 光学仪器	114
15.7.1 眼睛	115
15.7.2 放大镜.....	115
15.7.3 显微镜.....	116
15.7.4 望远镜.....	117
习题	117

第 16 章 光的干涉	119
16.1 光源 光的单色性和光的相干性	119
16.1.1 光源	119
16.1.2 光的单色性	119
16.1.3 光的相干性	120
16.2 双缝干涉	121
16.2.1 杨氏双缝干涉	121
16.2.2 菲涅耳双面镜实验	125
16.2.3 劳埃德镜实验	126
16.2.4 干涉条纹可见度	127
16.3 光程与光程差	127
16.3.1 光程	127
16.3.2 光程差	127
16.3.3 薄透镜不引起附加光程差	128
16.4 薄膜干涉	128
16.4.1 薄膜干涉	128
16.4.2 等倾干涉(膜为平行平面)	130
16.4.3 等厚干涉(膜的上下两个表面不平行)	132
16.4.4 干涉仪	135
习题	137
第 17 章 光的衍射	139
17.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	139
17.1.1 光的衍射现象	139
17.1.2 惠更斯-菲涅耳原理	139
17.1.3 衍射的分类	140
17.2 单缝的夫琅禾费衍射	140
17.2.1 单缝的夫琅禾费衍射	140
17.2.2 光强的计算——振幅矢量法	143
17.3 圆孔衍射 光学仪器的分辨率	146
17.3.1 圆孔的夫琅禾费衍射	146
17.3.2 光学仪器的分辨率	147
17.4 平面衍射光栅	148
17.4.1 平面衍射光栅	148
17.4.2 光栅衍射条纹的形成	149
17.4.3 光栅光谱	152
17.4.4 光线斜入射时的光栅方程、相控阵雷达	154
17.5 X 射线的衍射	156
17.5.1 布拉格方程	156
习题	157
第 18 章 光的偏振	159
18.1 自然光和偏振光 马吕斯定律	159

18.1.1	自然光	159
18.1.2	线偏振光 部分偏振光	160
18.1.3	圆偏振光和椭圆偏振光	160
18.1.4	偏振片的起偏和检偏	160
18.1.5	马吕斯定律	162
18.2	反射和折射时光的偏振	164
18.2.1	布儒斯特定律	164
18.2.2	玻璃堆法(获得偏振光方法)	165
18.3	光的双折射	167
18.3.1	光的双折射现象	167
18.3.2	惠更斯原理在双折射中的应用	168
18.3.3	尼科耳棱镜	169
18.3.4	二向色性	170
18.4	偏振光的干涉及应用	170
18.4.1	偏振光的干涉	170
18.5	光的吸收 色散和散射	171
18.5.1	光的吸收	171
18.5.2	光的色散	172
18.5.3	光的散射	173
习题		174
专题 F 大气散射的基本理论与现象		175
第 19 章 早期量子论和量子力学基础		180
19.1	热辐射 普朗克的量子假说	180
19.1.1	热辐射	180
19.1.2	基尔霍夫辐射定律	180
19.1.3	黑体辐射实验定律	181
19.1.4	普朗克能量量子假说 普朗克公式	183
19.2	光电效应 爱因斯坦的光子理论	187
19.2.1	光电效应的实验规律	187
19.2.2	光的波动说的缺陷	188
19.2.3	爱因斯坦光子理论(1905 年)	188
19.3	康普顿效应	190
19.3.1	康普顿实验	190
19.3.2	康普顿效应的量子解释	191
19.4	氢原子光谱 玻尔的氢原子理论	193
19.4.1	氢原子光谱的实验规律	193
19.4.2	玻尔的氢原子理论	196
19.5	德布罗意波 波粒二象性	199
19.5.1	德布罗意波	199
19.5.2	戴维孙-革末实验	199
19.5.3	微观粒子的波粒二象性	200

19.6	不确定度关系	204
19.7	波函数 薛定谔方程	206
19.7.1	波函数及其统计解释	206
19.7.2	薛定谔方程	207
19.8	势阱中的粒子	209
19.8.1	一维无限深势阱	209
19.8.2	一维方势垒 隧道效应	212
19.8.3	一维谐振子	214
19.9	氢原子的量子理论	215
19.9.1	氢原子的定态薛定谔方程	215
19.9.2	量子化条件和量子数	216
19.9.3	基态径向波函数和电子分布概率	217
19.10	电子的自旋 原子的电子壳层结构	218
19.10.1	施特恩-格拉赫实验	218
19.10.2	电子的自旋	219
19.10.3	原子的壳层结构	220
	习题	222
第 20 章	固体和激光的量子理论简介	224
20.1	晶体	224
20.1.1	关于晶体的基本概念和方法	224
20.1.2	一些晶格的实例	224
20.1.3	确定晶格的常用方法——X 射线衍射	225
20.2	晶体的结合类型	226
20.3	能带	227
20.3.1	电子共有化	227
20.3.2	能带的形成	228
20.3.3	金属的自由电子模型	229
20.3.4	满带、导带和禁带	230
20.3.5	导体、半导体和绝缘体	231
20.4	半导体	232
20.4.1	本征半导体与杂质半导体	232
20.4.2	pn 结	233
20.4.3	半导体的光敏与热敏特性	234
20.5	超导电性	235
20.5.1	超导现象与发展简史	235
20.5.2	超导体的特性	236
20.5.3	BCS 理论简介	238
20.5.4	超导电性的应用前景	238
20.6	团簇和纳米材料	239
20.6.1	团簇或纳米材料	239
20.6.2	纳米粒子的性质	239

20.6.3	纳米技术的应用及其前景	241
20.7	激光	245
20.7.1	自发辐射与受激辐射	246
20.7.2	产生激光的基本条件	246
20.7.3	激光的特性和应用	249
习题		249
第 21 章	核物理与粒子物理简介	251
21.1	原子核的基本性质	251
21.1.1	原子核的成分与电荷	251
21.1.2	原子核的大小与密度	251
21.1.3	原子核的自旋和磁矩	252
21.1.4	核磁共振	253
21.2	原子核的结合能和核力	254
21.2.1	原子核的质量亏损和结合能	254
21.2.2	核力	255
21.3	原子核的衰变	256
21.3.1	α 、 β 和 γ 衰变	256
21.3.2	放射性衰变定律	258
21.3.3	放射性强度	258
21.4	粒子物理	259
21.4.1	粒子的性质	260
21.4.2	粒子间的相互作用	261
21.4.3	夸克模型	262
习题		264
部分习题参考答案		265
参考文献		271
附录 常用物理基本常数		272

第 11 章 静 电 场

11.1 电荷及其相互作用

11.1.1 电荷

在很久以前,人们就发现,用毛皮摩擦过的琥珀能吸引羽毛、头发等轻小物体.后来发现,摩擦后能吸引轻小物体的现象,并不是琥珀所独有的,像玻璃棒、火漆棒、硬橡胶棒、硫黄块或者水晶块等,用毛皮或者丝绸摩擦后,也都能吸引轻小物体.

当物体有了这种能够吸引轻小物体的性质时,就说它带了电,或有了电荷.带电的物体称为带电体.使物体带电称为起电,用摩擦的方法使物体带电称为摩擦起电.大量实验表明,自然界中的电荷只有两种,一种与丝绸摩擦过的玻璃棒的电荷相同,称为正电荷;另一种与毛皮摩擦过的火漆棒的电荷相同,称为负电荷.同种电荷间有斥力,异种电荷间有吸力,将异种电荷放在一起时,它们的电荷有互相抵消的效果.

物体所带电荷的数量,称为电量.测量电量的简单的仪器就是验电器.如图 11-1 所示,在玻璃瓶上装一橡胶塞,塞中插一根金属杆,金属杆上端带有金属小球,杆的下端悬挂着两片金属箔片.当带电体与金属小球接触时,金属箔因得到同种电荷而张开.为了避免气流的影响,将金属杆和箔片封闭在一个玻璃瓶中.



图 11-1 验电器

在验电器实验中,电荷可以从金属杆的一端移动到另一端,但是,并非所有物体都允许电荷通过,能允许电荷通过的物体称为导体,不允许电荷通过的物体称为绝缘体,绝缘体又称为电介质.干燥的玻璃、塑料、橡胶、陶瓷等都是绝缘体,而金属、石墨和酸碱盐的水溶液都是良好的导体,人体、墙壁和地球也是导体,但其导电能力不如金属.除导体和绝缘体外,还有一种物体,在常规情况下,其导电能力介于导体和绝缘体之间,锗和硅就是这样的物体.

物体具有不同的导电性,可用物体的微观结构来理解.金属之所以导电,是因为内部存在着自由电子,它们可以摆脱原子核的束缚而自由地在金属内部运动;电解液之所以导电,是因为内部存在能做宏观运动的正、负离子.反之,在绝缘体内部,电子受到原子核的强束缚,基本上没有自由电子,因此,呈绝缘性.

除用摩擦的方法使物体带电外,还可采用感应方法使物体带电.如图 11-2 所示,将带电体 A 靠近导体 B,在导体 B 上 A 的近端和远端便出现局域电荷,这种使导体 B 带电的方式称为感应起电.

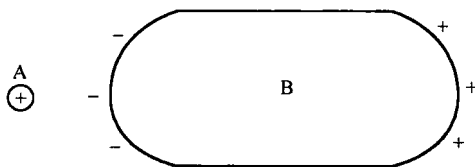


图 11-2 感应起电

11.1.2 电荷守恒定律

大量实验证明,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始终保持不变,这称为电荷守恒定律,是物理学的重要规律之一.宏观物体的带电、电中和以及物体内的电流等现象,实质上源于微观带电粒子在物体内的运动.因此,电荷守恒反映了在各种变化过程中,系统内的总电荷数守恒.

现代物理研究表明,在粒子的相互作用过程中,电荷是可以产生和湮灭的.然而,电荷守恒并没有因此而遭受破坏.例如,一个高能光子和一个重原子核作用时,该光子可以转化为一个正电子和一个负电子(这称为电子对的“产生”);而一对正、负电子在一定条件下相遇,又会同时消失而产生两个或者三个光子(这称为电子对的“湮灭”).在已经观察到的各种过程中,正、负电荷总是成对出现或者成对消失.由于光子不带电,正、负电子又各带等量异号的电荷,所以,这种电荷的产生和湮灭并不改变系统中电荷数的代数和,因而电荷守恒定律仍然成立(在此,不研究近年来不断出现的电荷不守恒的报道).

11.1.3 电荷的量子性

实验已经证明,电荷总是以一个基元电荷的整数倍出现于各类现象中,电荷的这个特性称为电荷的量子性.电荷的基本单元就是一个电子所带电量的绝对值,常以 e 表示,经测定

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

符号 C 代表电量的国际单位库仑,其定义将在后面给出.

电荷具有基本单元的概念,最初是根据电解现象中通过溶液的电量 and 析出物质的质量之间的关系提出的.法拉第、阿累尼乌斯等都为此作出过重要贡献.他们的结论是:一个离子的电量只能是一个基本电荷电量的整数倍.直到 1890 年斯通尼才引入“电子”(electron)这一名称来表示带有负电的基元电荷的粒子.此后,密立根设计了有名的油滴实验直接测量了此基元电荷的量值.现在,已经知道许多基本粒子都带有正的或者负的基元电荷.例如,一个正电子、一个质子都各带有一个正的基元电荷,一个负电子、一个反质子、一个负介子则各带有一个负的基元电荷.

带电粒子所含基元电荷的倍数称为电荷数,如氦原子核电荷数为 2,负介子的电荷数为 -1 等,电荷数都是正的或者负的整数.近代物理理论预言,基本粒子由若干夸克和反夸克组成,每一夸克和反夸克可能带有 $\pm \frac{1}{3}e$ 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.

11.1.4 电荷的相对论不变性

试验证明,一个电荷的电量与电荷的运动状态无关.由于在不同的参考系中观察,同一电荷的运动状态不同,所以电荷的电量与其运动状态无关,即在不同的参考系中观察,同一带电粒子的电量不变.电荷的这一性质称为电荷的相对论不变性.

11.1.5 库仑定律

发现电现象后两千多年的时间内,人们对于电的理解一直处于定性的初级阶段.这是因为,一方面社会生产力的发展还没有提出对电力应用的迫切要求;另一方面,人们对于电的规律的研究必须借助于较为精密的仪器,这只有当社会生产力达到一定的水平时才能实现.这种情况一直延续了很久,直到 19 世纪人们才开始对电的规律及其本质有了较为深入的了解.

最早的定量化研究是在 18 世纪末,库仑通过试验总结出两个静止的点电荷之间相互作用的规律,现在称其为库仑定律.所谓点电荷,是一种模型,指这样的带电体,它本身的几何线度比起它到其他带电体的距离小得多.这种带电体的形状和电荷在其中的分布已经无关紧要,因此我们可以将其抽象成一个几何点.

库仑定律可以表述如下:

在真空中,两个静止的点电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力的大小和 q_1 与 q_2 的乘积成正比,和它们之间的距离 r 的平方成反比;作用力的方向沿着它们的连线,同号电荷相互排斥、异号电荷相互吸引(图 11-3).

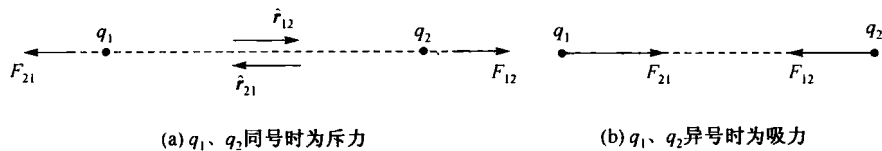


图 11-3 两电荷之间的相互作用

令 F_{12} 代表 q_1 对 q_2 的作用力, r 表示 q_1 和 q_2 之间的距离, r_{12} 代表由 q_1 到 q_2 的方向单位矢量,则库仑定律可表述为

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12} \tag{11-1}$$

式中, k 为一个比例系数,数值取决于式中各量的单位,当采用 MKSA 单位制(长度单位为 m;质量单位为 kg;时间单位为 s;电流单位为 A)时,可将 k 表达如下:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \tag{11-2}$$

式中, ϵ_0 表示真空电容率.

库仑定律是在 1784~1785 年由库仑通过扭秤试验总结出来的,当时甚至对电荷的定量化尚不能很好地作出描述.虽然库仑定律是通过宏观带电体的试验总结出来的规律.但是,物理学进一步的研究表明:原子结构、分子结构、固体和液体的结构,以及化学作用等问题的微观本质都和电磁力有关,而在这些问题中,万有引力的影响则是微不足道的.实验还表明,当点电荷 q 在点电荷系 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 的共同作用下时,它所受到的静电力,等于 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 等各点电荷单独存在时作用于它的静电力的矢量和,即

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n \tag{11-3}$$

如果作用于 q 的是电荷连续分布的带电体 Q ,可将 Q 视为无数点电荷元 dQ 的集合,带电体 q 受到的静电力,看成是所有这些 dQ 单独存在时对 q 的作用力 dF 的矢量和,用积分式表示为

$$F = \int dF \tag{11-4}$$

这就是力的叠加原理.

11.2 电场 电场强度

11.2.1 电场

对于电荷之间的相互作用力的性质,在历史上有过几种不同的观点:一种观点认为静电力是“超距作用”,静电力的传递不需要介质也不需要时间.另一种观点认为静电力是物

质之间的相互作用力,既然电荷 q_2 位于 q_1 周围任何一点都受到 q_1 的作用,说明在 q_1 的周围整个空间中存在一种特殊的物质,它虽然不像实物那样由电子、质子和中子构成,但确是一种客观实在. 这种特殊的物质称为由电荷 q_1 激发的电场. 同样,电荷 q_2 也在其周围整个空间激发电场并作用于电荷 q_1 上. 两电荷之间的相互作用实际上是每个电荷激发的电场作用于另一电荷上的力.

电荷 $\Leftrightarrow$ 场 $\Leftrightarrow$ 电荷

当电荷静止不变时,从上述两种观点出发给出相同的结论,不易判断到底哪一种观点是正确的,但当电荷运动变化时,两种观点的差别就暴露出来. 物理学理论与实验表明,场的观点是正确的.

既然电荷 q_1 对电荷 q_2 的作用是通过其激发的电场来实现的,那么,电荷 q_1 的场具有怎样的分布规律呢? 为了理解这一问题,我们将电荷 q_2 视为检验电荷,它的引入只是为了检验场源电荷 q_1 激发的电场属性(请读者思考:对检验电荷 q_2 应提出哪些要求?),于是,按库仑定律,有

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \quad (11-5)$$

可进一步表示为

$$\mathbf{F}_{12} = q_2 \mathbf{E} \quad (11-6)$$

式中, $\mathbf{E}$ 不包含电荷 q_2 的影响,它仅取决于场源电荷 q_1 的大小,所考察的检验电荷 q_2 所在的场点位置,因为不同的场点位置具有不同的 r 和 $\hat{\mathbf{r}}_{12}$. 于是,对于点电荷 q_1 产生的电场,可表述为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (11-7)$$

式中, r 表示场源电荷 q_1 到场点(即检验电荷 q_2)的距离,而 $\hat{\mathbf{r}}$ 是场源电荷 q_1 指向场点的方向单位矢,我们称 $\mathbf{E}$ 为电场强度(场强)矢量. 这里,从定义的伊始 $\mathbf{E}$ 就是一个宏观矢量点函数,可将这个宏观矢量点函数定义为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (11-8)$$

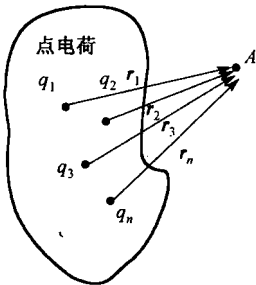


图 11-4 点电荷场

式中, $\mathbf{F}$ 是检验电荷 q_0 在场点所受到的力. 上式表明:空间某点的电场强度就是位于该点单位正电荷所受的电场力. $\mathbf{E}$ 的单位为牛顿/库仑(N/C)或伏特/米(V/m).

如图 11-4 所示,当空间存在多个分立电荷时,空间某点 A 场强如何表出?

检验电荷 q_0 在场点所受到的力由式(11-3)给出,将其代入式(11-8)可得

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \cdots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n \quad (11-9)$$

式中, $\mathbf{E}_i$ 代表第 i 个场源电荷在场点激发的电场.

当空间连续电荷,如图 11-5 所示,可将该连续电荷看成许多点电荷 dq 的叠加,检验电荷 q_0 在场点所受到的力仍由式(11-4)给出,将其代入式(11-8)可得

$$\mathbf{E} = \frac{\int d\mathbf{F}}{q_0} = \int \frac{d\mathbf{F}}{q_0} = \int d\mathbf{E} \quad (11-10)$$

由式(11-7), 电荷元 dq 产生的电场 dE 为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{r} \quad (11-11)$$

于是

$$E = \int dE = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{r} \quad (11-12)$$

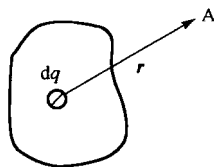


图 11-5 连续电荷场

11.2.2 利用场强叠加原理解电场问题

1. * 分立电荷产生场强的叠加问题

如图 11-6 所示, 相距为 l (很小) 的等量异号点电荷, 称为一电偶极子. 由 $-q \rightarrow +q$ 的矢量 l 称为电偶极子的轴, $p=ql$ 称为电偶极子的电矩. 例如, 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, 就构成了一电偶极子.

例 11-1 已知电偶极子的电矩为 p , 求:

(1) 电偶极子在它轴线的延长线上一点 A 的场 E_A ;

(2) 电偶极子在它轴线的中垂线上一点 B 的场 E_B .

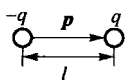


图 11-6 电偶极子

解 (1) 在例 11-1 图所示的坐标下, 对场点 A 有

$$E_A = E_+ + E_-$$

$$\begin{cases} E_+ = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \left(r - \frac{l}{2}\right)^2} \\ E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} E_A &= E_+ - E_- = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \right] = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2 - \left(r - \frac{l}{2}\right)^2}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2 \left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2lr}{r^4 \left(1 - \frac{l}{2r}\right)^2 \left(1 + \frac{l}{2r}\right)^2} \xrightarrow{r \gg l} \frac{2ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{2p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \end{aligned}$$

$$E_A = \frac{2p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (E_A \text{ 与 } p \text{ 同向})$$

(2) 同样, 按场强叠加原理, 对场点 B 有

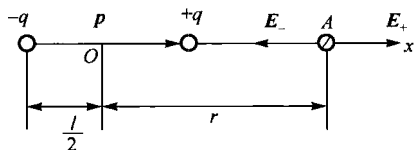
$$E_B = E_+ + E_-$$

$$\begin{cases} E_+ = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)} \\ E_- = E_+ \end{cases}$$

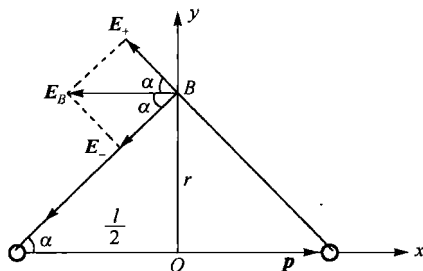
$$E_{Bx} = -(E_+ \cos\alpha + E_- \cos\alpha) = -2E_+ \cos\alpha$$

$$\begin{aligned} &= -2 \cdot \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)} \cdot \frac{\frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}} = \frac{-ql}{4\pi\epsilon_0 \left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{r \gg l}{E_{By}} &= 0 \quad \frac{-ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{-p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \\ \Rightarrow \mathbf{E}_B &= \mathbf{E}_{Br} = -\frac{\mathbf{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \end{aligned}$$



(a)



(b)

例 11-1 图

2. * 连续电荷产生场强的叠加问题

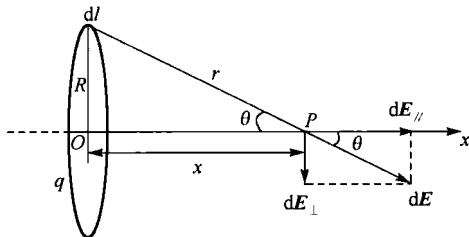
例 11-2 设电荷 q 均匀分布在半径为 R 的圆环上(例 11-2 图), 计算在环的轴线上与环心相距 x 的 P 点的场强.

解 如图所取坐标, x 轴在圆环轴线上. 把圆环分成一系列元点电荷 $dq = \lambda dl$, 元电荷 dq 在场点 P 产生的电场为

$$dE = \frac{\lambda dl}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{\lambda dl}{4\pi\epsilon_0 (x^2 + R^2)}$$

式中, $\lambda = \frac{q}{2\pi R}$ 为圆环上连续分布的电荷线密度.

$$\begin{aligned} dE_{//} &= dE \cos\theta = \frac{\lambda x dl}{4\pi\epsilon_0 (x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \\ E_{//} &= \int_0^{2\pi R} \frac{\lambda x dl}{4\pi\epsilon_0 (x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{(\lambda \cdot 2\pi R)x}{4\pi\epsilon_0 (x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{qx}{4\pi\epsilon_0 (x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \end{aligned}$$



例 11-2 图

根据对称性可知, $E_{\perp} = 0$. 所以

$$E = E_{//} = \frac{qx}{4\pi\epsilon_0 (x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad q \begin{cases} > 0, & \mathbf{E} \text{ 沿 } x \text{ 轴正向} \\ < 0, & \mathbf{E} \text{ 沿 } x \text{ 轴负向} \end{cases}$$

其中, x 轴上 $\mathbf{E}$ 关于原点对称的. 于是得出结论, $\mathbf{E}$ 与圆环平面垂直, 环中心处 $E=0$, 当 $x \gg$

R , $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 x^2}$, 其形式为点电荷场表式, 因为这时从场点来看, 圆环似一点.