



新世纪地方高等院校专业系列教材

普通物理学

(下册)第二版

主编 张晋鲁 黄新民



南京大学出版社

全国教育科学“十五”规划课题项目



新世纪地方高等院校专业系列教材

普通物理学

(下册)第二版

主 编 张晋鲁 黄新民

副主编 阿克木哈孜·马力克

周恒为 郭 玲 孙 毅

编 者 (以姓氏笔画为序)

付清荣 古丽姗 古丽娜尔·瓦孜汗

李玉强 孙 毅 宋太平 沐仁旺

阿克木哈孜·马力克 张晋鲁 张国梁

周恒为 赵新军 郭 玲

黄新民 潘宏利

主 审 黄以能



南京大学出版社

内 容 简 介

本书以普通物理学教学大纲(非物理专业)为依据,系统地论述了物理学的基本内容,包括力学、振动与波、热学、电磁学、光学和量子物理 6 篇共 25 章. 全书内容丰富,观点明确,并注重物理思想方法的训练,以达到启发思维,培养能力的目的. 该书特别对基本概念、基本理论、基本规律和方法的叙述严密、准确,重点突出,脉络分明,尤其对定理和公式的推导、分析、应用表述简明、清晰.

本书可作为理工科、师范院校及各类成人大学普通物理课程的教材,也可供广大青年自学参考.

图书在版编目(CIP)数据

普通物理学:全2册/张晋鲁,黄新民主编. — 2
版. — 南京:南京大学出版社,2015.8
新世纪地方高等院校专业系列教材
ISBN 978-7-305-15721-9

I. ①普… II. ①张… ②黄… III. ①普通物理学—
高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 188434 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093

出 版 人 金鑫荣

丛 书 名 新世纪地方高等院校专业系列教材

书 名 普通物理学(下册)(第二版)

主 编 张晋鲁 黄新民

责任编辑 孟庆生 吴 华 编辑热线 025-83592146

照 排 南京南琳图文制作有限公司

印 刷 常州市武进第三印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 19.25 字数 445 千

版 次 2015 年 8 月第 2 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-305-15721-9

总 定 价 64.00 元(上、下册)

网址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

官方微信号: njupress

销售咨询热线: (025) 83594756

* 版权所有,侵权必究

* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购
图书销售部门联系调换

第二版前言

本教材自 2005 年出版发行后,在全国多所“新世纪地方高等院校教材编委会”成员院校使用,不仅得到了较好的评价,也极大地促进了所在学校的教育教学改革,如,伊犁师范学院物理科学与技术学院(原物理与电子信息学院)“大学物理”教研团队在创作和使用教材的过程中,不断深化和加大“大学物理”教学改革,取得了丰硕成果,先后获得了自治区高等学校优秀教学成果三等奖、“大学物理”自治区精品课程、教学团队和实验教学示范中心等诸多殊荣。另外,通过 10 年对教材的不断挖掘总结,我们也发现许多不足和问题,我们对众多问题进行了论证,最后提出了修订意见并融入此书,修改的主要内容包括:

1. 将原教材部分章节的顺序进行了调换,如,调换“第三篇 电磁学”和“第四篇 热学”的顺序。这样授课教师可以在第一学期把力学和热学部分讲完(即第一编、第二篇和第三篇),第二学期完成电磁学、光学和量子物理学内容的讲解,更方便教学。

2. 发现并且修订了原教材存在的一些问题,这不仅使得原教材更加细致和精练,而且极大地减少了由于错误导致学生在阅读时花费的大量时间和精力。

3. 修改了原教材的部分插图,使之更形象、准确。

4. 根据广大学生和教师的愿望,我们增加了习题答案,给学生提供了解题线索和思路。

在陕西理工学院、伊犁师范学院、喀什大学、昌吉学院和新疆教育学院通力合作和辛勤努力下,特别是在此过程中得到了新疆教育学院科学教育学院院长蔡万玲教授的特别关注和帮助,本书修订工作得以圆满完成,对上述各位老师和专家表示衷心感谢。

本书在再版过程中得到了南京大学出版社、“新世纪地方高等院校教材编委会”的大力支持和帮助,对此表示衷心感谢。

本书主编为新疆教育学院张晋鲁、陕西理工学院黄新民,副主编为伊犁师范学院阿克木哈孜·马力克、周恒为,新疆喀什大学郭玲,昌吉学院孙毅,编委则由长期从事“大学物理”教学的专业教师担任。本书习题解答由李祯、阿布都外力·卡力、刘什敏等老师完成,数据由鹿桂花、玛丽娜·阿西木汗等老师整理。南京大学物理学院博士生导师、新疆“天山特聘教授”黄以能仔细审核了此书。对他(她)们所付出的努力表示衷心感谢。

相信本书的修订版一定会在保持原貌的基础上,更加丰富多彩。当然,再版后的本书也必将会存在不妥之处,这既反映了科学进步和教育发展,也说明作者的水平有限,恳请专家学者及广大读者不吝指正。

该书可作为师范院校、综合院校非物理专业本专科学生“大学物理学”的教材,也可作为高等学校理科双语班“大学物理学”的教材。同时,也是“大学物理”研究生考试科目重要参考书和广大物理爱好者的理想读物。

编者

2015 年 7 月

目 录

第四篇 电 磁 学

第 11 章 静电场的基本规律	1
§ 11.1 电荷 电场	1
§ 11.2 库仑定律	3
§ 11.3 电场强度 场的叠加原理	5
§ 11.4 高斯定理	11
§ 11.5 电场力的功 电势	16
§ 11.6 电场强度与电势的关系	21
习题	23
第 12 章 静电场中的导体和电介质	25
§ 12.1 静电场中的导体	25
§ 12.2 电容 电容器	29
§ 12.3 电介质中的静电场 电位移	34
§ 12.4 电场的能量	40
习题	43
第 13 章 恒定电流和恒定电场	46
§ 13.1 电流密度 电流连续性方程	46
§ 13.2 欧姆定律 焦耳-楞次定律	49
§ 13.3 电动势	53
§ 13.4 基尔霍夫定律及其应用	58
习题	62

第 14 章 真空中的稳恒磁场	64
§ 14.1 磁感应强度 磁场的高斯定理	64
§ 14.2 毕奥-萨伐尔定律	69
§ 14.3 安培环路定理	74
§ 14.4 带电粒子在磁场中的运动	79
§ 14.5 磁场对载流导体的作用	85
§ 14.6 电流单位的定义	88
§ 14.7 磁场力的功	89
习题	90
第 15 章 磁介质中的磁场	93
§ 15.1 磁介质 顺磁质和抗磁质的磁化	93
§ 15.2 磁场强度 磁介质中的安培环路定理	95
§ 15.3 铁磁质	99
习题	103
第 16 章 电磁感应	105
§ 16.1 电磁感应定律	105
§ 16.2 动生电动势	107
§ 16.3 涡旋电场—感生电动势	112
§ 16.4 自感与互感	118
§ 16.5 自感磁能与互感磁能	122
习题	124
第 17 章 麦克斯韦电磁理论	127
§ 17.1 电磁场 麦克斯韦方程组	127
§ 17.2 赫兹实验	132
§ 17.3 电磁波	133

第五篇 光 学

第 18 章 光的干涉	136
§ 18.1 光的干涉现象 光的相干性	136
§ 18.2 光程 光程差 薄膜干涉	140

§ 18.3 劈尖干涉 牛顿环	144
§ 18.4 迈克耳逊干涉仪	148
习题	149
第 19 章 光的衍射	151
§ 19.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	151
§ 19.2 单缝衍射 圆孔衍射	152
§ 19.3 光学仪器的分辨本领	156
§ 19.4 衍射光栅 衍射光谱	158
§ 19.5 伦琴射线衍射 布喇格公式	160
§ 19.6 全息照相原理	162
习题	164
第 20 章 光的偏振	166
§ 20.1 自然光和偏振光	166
§ 20.2 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	168
§ 20.3 反射光和折射光的偏振	170
§ 20.4 双折射现象	172
§ 20.5 椭圆偏振光和圆偏振光 波片	176
§ 20.6 偏振光的干涉 人为双折射现象	177
§ 20.7 旋光现象	179
习题	180
第 21 章 光的色散 吸收和散射	182
§ 21.1 光的色散	182
§ 21.2 光的吸收	186
§ 21.3 光的色散和吸收的解释	189
§ 21.4 光的散射	191
习题	193

第六篇 量子物理

第 22 章 波和粒子	195
§ 22.1 热辐射和基尔霍夫定律	195

§ 22.2 光电效应 爱因斯坦光子理论·····	202
§ 22.3 康普顿效应·····	207
§ 22.4 德布罗意波 波粒二象性·····	210
习题·····	213
第 23 章 原子结构和运动规律 ·····	214
§ 23.1 氢原子光谱的实验规律·····	214
§ 23.2 玻尔的氢原子理论·····	216
§ 23.3 电子的椭圆轨道与空间量子化·····	224
§ 23.4 原子磁矩与史特恩-盖拉赫实验 ·····	229
§ 23.5 碱金属原子光谱 电子自旋·····	232
§ 23.6 多电子原子的结构·····	241
§ 23.7 元素周期系·····	246
习题·····	252
第 24 章 固体物理基础 ·····	254
§ 24.1 固体的力学性质·····	254
§ 24.2 固体的能带理论·····	256
§ 24.3 导体 绝缘体 半导体·····	258
§ 24.4 超导电性·····	260
习题·····	261
第 25 章 原子核与粒子物理简介 ·····	263
§ 25.1 原子核的电荷 质量 大小·····	263
§ 25.2 放射性衰变规律·····	266
§ 25.3 原子核反应 原子能·····	269
§ 25.4 粒子物理简介·····	278
习题·····	288
附录 ·····	
常用物理常数·····	290
习题参考答案·····	292
参考文献·····	300

第四篇 电磁学

第 11 章 静电场的基本规律

从本章开始我们将研究物质运动的另一种形态,即电磁运动.电磁运动是自然界中存在的普遍的运动形态之一.自然界中的所有变化几乎都与电和磁相联系.所以,研究电磁运动对于深入认识物质世界是十分重要的.同时,由于电磁学已经渗透到现代自然科学的各个分支和技术领域的各个部门,并成为其理论基础,因此学习电磁学、掌握电磁运动的基本规律,具有重要意义.

本章的主要研究静电场的基本性质,其中包括库仑定律、电场强度和电势、高斯定理以及静电场的环路定理等.

§ 11.1 电荷 电场

1. 电荷 电荷量

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,历史上把与用丝绸摩擦过的玻璃棒上电荷相同的称为正电荷,与用毛皮摩擦过的胶木棒上电荷相同的称为负电荷.实验表明,带同种电荷的物体互相排斥,带异种电荷的物体互相吸引.通常把带电体之间的这种相互作用称为电力.电力与万有引力有些相似.但万有引力总是相互吸引的,而电力却随异号电荷或同号电荷而有吸引与排斥之分.根据带电体之间相互作用力的大小,我们能够确定物体所带电荷的多寡.表示物体所带电荷的多寡程度的物理量称为电荷量,简称电荷.电荷量的单位是库仑,国际单位符号为 C.

2. 电荷的量子化

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. 每个质子和电子带有相等的电荷, 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.

自然界中电子带有的电荷是最小的, 实验发现, 所有的带电体或其他微观粒子的电荷都是电子电荷量的整数倍. 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. 由于电子的电荷值是如此之小, 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.

3. 电荷守恒定律

除了摩擦的方法可以使物体带电外, 还有许多种方法也可以使物体起电. 例如, 设一绝缘导体由可分开的独立导体 B 和 C 组成, 如图 11-1 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 两部分带等量异号电荷. 这种方法称为感应起电.

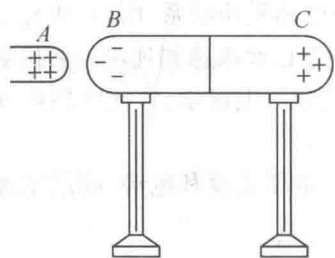


图 11-1 感应起电

人们发现, 在感应起电过程中所得到的两部分电荷是相等的, 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, 该系统电荷的代数和保持不变. 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.

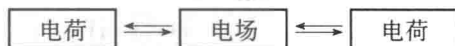
4. 电场

电荷或带电体之间有相互作用力, 然而关于电荷或带电体之间的相互作用是怎样进行的问题, 历史上曾出现过不同的看法. 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电力是由另一个带电体直接给予的. 这种作用既不需要中间物质进行传递, 也不需要时间, 而是从一个带电体立即到达另一个带电体, 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力的作用,这种力叫作电场力.这种作用可表示如下:



相对于观察者静止的电荷所激发的电场叫作静电场.静电场的对外表现主要有:

- (1) 引入电场中的任何带电体都将受到电场所作用的力;
- (2) 电场能使引入电场中的导体或电介质分别产生静电感应现象或极化现象;
- (3) 当带电体在电场中移动时,电场所作用的力将对带电体做功,这表示电场具有能量.

§ 11.2 库 仑 定 律

1. 点电荷之间的作用力

在发现电现象以后的 2 000 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(Charles Augustin de Coulomb)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荷量的乘积成正比,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

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12}, \quad \mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^3} \mathbf{r}_{21}, \quad (11-1)$$

其中, $\mathbf{F}_{12}$ 为 q_1 对 q_2 的作用力, $\mathbf{r}_{12}$ 为由 q_1 指向 q_2 方向的矢径, $|\mathbf{r}_{12}| = |\mathbf{r}_{21}| = r$, r 为 q_1 与 q_2 之间的距离,如图 11-2 所示. q_1 与 q_2 同号时, $\mathbf{F}_{12}$ 沿 $\mathbf{r}_{12}$ 方向,是斥力;当 q_1 与 q_2 反号时, $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\mathbf{r}_{12}$ 的方向相反,是引力. F_{12} 的大小为

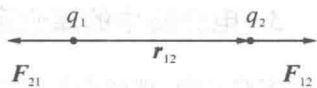


图 11-2 两个电荷之间的作用力

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (11-2)$$

在国际单位制(SI 制)中

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.9880 \times 10^9 (\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}) \approx 9.00 \times 10^9 (\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}),$$

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(11-1)式中去掉各量的下标,则库仑定律可写成

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r}. \quad (11-3)$$

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时,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.

2. 叠加原理

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他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

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_i + \cdots + \mathbf{F}_n, \quad (11-4)$$

式中 $\mathbf{F}_i$ 为第 i 个电荷对 q 的作用力,如图 11-3 所示.

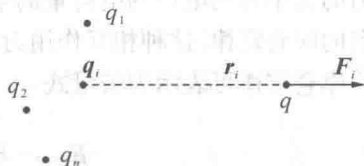


图 11-3 点电荷系对点电荷 q 的作用力

库仑定律和叠加原理是整个电学理论的基础.

3. 电介质中的库仑定律

实验发现,把两个静止点电荷放在无限大的均匀电介质中,它们之间的作用力与放在真空中的情形不同,作用力的大小是该两点电荷在真空中作用力的 $\frac{1}{\epsilon_r}$ 倍,故有

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r}. \quad (11-5)$$

上式为无限大均匀电介质中的库仑定律.

ϵ_r 称为电介质的相对介电常数,是一个无量纲的物理量,描述了电介质的性质.用实验可测得各种电介质的 ϵ_r 值.各种电介质的 $\epsilon_r > 1$.把真空看作为一种特殊的电介质, ϵ_r 等于 1.一般把 ϵ_0, ϵ_r 的乘积用 ϵ 表示,即

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r,$$

ϵ 称为电介质的介电常数.

§ 11.3 电场强度 场的叠加原理

1. 电场强度

电场的一个重要性质是电场对处于电场中的电荷有力的作用. 因此, 要检验空间某点是否存在电场, 可把一试探电荷 q_0 放到要探测的空间某点, 如果 q_0 受到电力作用, 就表示该点有电场. 实验发现:

(1) 在给定电场中的同一点 P_1 , 分别放入电荷不同的试探电荷 q_0 , q_0 受力的大小随 q_0 的电荷的增减而增减, 但比值 F/q_0 不变. 即在给定点处存在一个确定的比值矢量.

(2) 任意选择电场中的不同的点 $P_1, P_2, \dots, P_n$, 重复(1)的实验, 对于不同的点比值 F/q_0 在一般情况下并不相同.

由此可知, 在给定电场中, 比值 F/q_0 只随地点而变, 而与试探电荷的大小无关. 为描述电场的这一性质, 引入电场强度矢量

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}. \quad (11-6)$$

在上式中若取 q_0 等于一个单位电荷, 则得 $\mathbf{E} = \mathbf{F}$. 可见, 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, 电荷以库仑为单位, 场强的单位就是牛顿/库仑 ($\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$).

如果电场中各点场强的大小和方向都相同, 这样的电场称为匀强电场.

若已知电场中任一点的场强 $\mathbf{E}$, 则处于该点的电荷 q 受的电场力为

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}. \quad (11-7)$$

关于试探电荷 q_0 要注意两点:

(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) 试探电荷的电荷量必须充分小, 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.

2. 点电荷的电场

设真空中有一点电荷 q , 根据以上所述, 其周围空间内的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

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^3} \mathbf{r} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0.$$

由电场强度的定义可得 P 点的场强为

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

为简便起见,一般写成

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}_0, \quad (11-8)$$

其中 $\mathbf{r}_0$ 为从 q 指向场点方向上的单位矢量. 若 $q > 0$, $\mathbf{E}$ 沿 $\mathbf{r}_0$ 方向; 若 $q < 0$, 则 $\mathbf{E}$ 沿 $\mathbf{r}_0$ 反方向, 如图 11-4 所示.

如果点电荷 q 放置在无限大的均匀电介质中, 电介质的介电常数为 ϵ , 则根据电介质中的库仑定律表达式(11-5), 可得空间各点的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}_0. \quad (11-9)$$

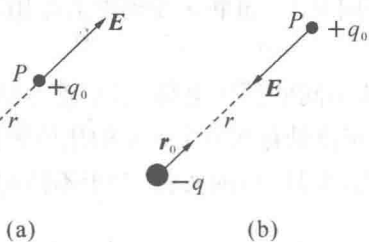


图 11-4 点电荷的电场

3. 场强叠加原理

实验表明, 在点电荷系 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 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 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n$ 的矢量和, 即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_i + \dots + \mathbf{F}_n.$$

由场强的定义得

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

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

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n. \quad (11-10)$$

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.

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

$$\mathbf{E}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1^2} \mathbf{r}_{01}, \mathbf{E}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r_2^2} \mathbf{r}_{02}, \dots, \mathbf{E}_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_n}{r_n^2} \mathbf{r}_{0n}.$$

由场强叠加原理, P 点的总场强 $\mathbf{E}$ 为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_{0i}. \quad (11-11)$$

根据(11-9)式, 在无限大均匀电介质中点电荷系的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_{0i}. \quad (11-12)$$

4. 连续分布电荷的场强

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荷为 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

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0, \quad (11-13)$$

其中 $\mathbf{r}_0$ 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,则积分为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0. \quad (11-14)$$

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 11-5 所示.

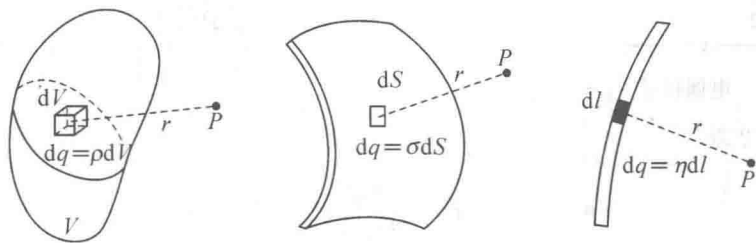


图 11-5 带电体上电荷元的选取

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

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int_V \frac{\rho dV}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0. \quad (11-15)$$

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

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int_S \frac{\sigma dS}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0. \quad (11-16)$$

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

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int_L \frac{\eta dl}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0. \quad (11-17)$$

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

5. 电场求解问题举例

作为场强叠加原理的应用,下面我们具体分析几种带电体系的场强.

例题 11.1 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 11-6 建立坐标系.

(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

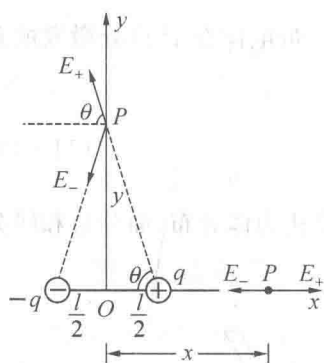


图 11-6 电偶极子

在 $x \gg l/2$ 处

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

P 点的合场强的大小为

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

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

(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, 两矢量在 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

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

其中

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

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. 由于电偶极子的场强总是和 q 和 l 的乘积有关, 通常把 q 和 l 的乘积叫作电偶极矩矢量 $\mathbf{p}$, 即

$$\mathbf{p} = q\mathbf{l},$$

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

$$\mathbf{E} = \frac{2\mathbf{p}}{4\pi\epsilon_0 x^3}; \quad (11-18)$$

在中垂线上

$$\mathbf{E} = -\frac{\mathbf{p}}{4\pi\epsilon_0 y^3}. \quad (11-19)$$

例题 11.2 真空中一均匀带电直线, 长为 L , 带电荷为 Q . 求直线外一点 P 处的场强 (图 11-7). 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

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

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

$$y = -a \cot \theta, \quad dy = a \csc^2 \theta d\theta, \quad r = \frac{a}{\sin \theta},$$

代入得

$$dE_x = \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} \sin \theta d\theta, \quad dE_y = \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} \cos \theta d\theta,$$

两式积分得

$$E_x = \int dE_x = \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2), \quad (11-20)$$

$$E_y = \int dE_y = \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta d\theta = \frac{\eta}{4\pi\epsilon_0 a} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1). \quad (11-21)$$

P 点的总场强大小为

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

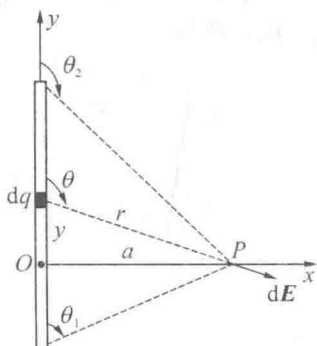


图 11-7 均匀带电直线外任一点处的场强