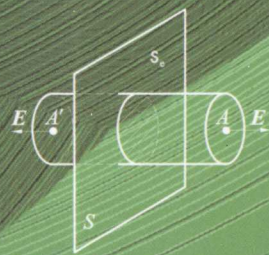
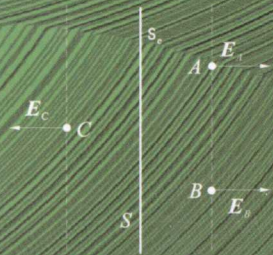
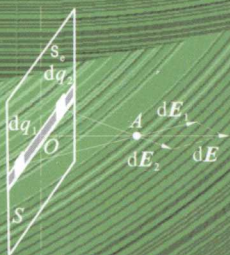


普通高等学校教材

DAXUE WULI
大学物理 (下册)

总主编 康垂令
主 编 伍嗣榕 李 玲



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

013027935

04-43

210

V2

大学物理

(下册)

总主编 康垂令

主 编 伍嗣榕 李 玲

编 者 (以拼音字母为序)

黄 健 李 玲 伍嗣榕 郑定山



武汉理工大学出版社

· 武汉 ·



北航

C1635137

04-43

210

V2

010805878

内 容 简 介

本书是长江大学工程技术学院基础部物理教研室编写的《大学物理》系列教材的下册。主要内容有第五篇电磁学、第六篇近代物理学基础。第五篇电磁学包括真空中的静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒磁场、磁场中的磁介质、电磁感应、电磁场和电磁波。其中将稳恒电流放在静电场中的导体和电介质之中以备某些章节调用；电磁波的辐射与传播，没有采用传统的振荡电偶极子激发电磁波的讲述法，而是采用变化电流激发变化磁场，变化磁场再激发变化电场的方法讲述。第六篇近代物理学基础有狭义相对论基础、光的量子性和原子的量子理论等方面的基础理论。每章后面都编写了相应的思考题和习题。附录给出了思考题与习题的参考答案。

本书可供独立学院和独立学院层次的学校使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 下册/康垂令, 伍嗣榕, 李玲主编. —武汉: 武汉理工大学出版社, 2013. 1

ISBN 978-7-5629-3937-5

I. ①大… II. ①康… ②伍… ③李… III. ①物理学-高等学校-教材
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 012106 号

项目负责人: 陈军东 徐 扬 王兆国

责任编辑: 彭佳佳

责任校对: 李兰英

装帧设计: 董君承

出版发行: 武汉理工大学出版社

社 址: 武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编: 430070

网 址: <http://www.techbook.com.cn>

经 销: 各地新华书店

印 刷: 荆州市今印印务有限公司

开 本: 787×960 1/16

印 张: 16.75

字 数: 335 千字

版 次: 2013 年 2 月第 1 版

印 次: 2013 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 29.80 元

(本书如有印装质量问题, 请向承印厂调换)

前 言

随着独立学院办学理念的日趋成熟和教学的日益规范,特别是结合我们在长江大学工程技术学院从事《大学物理》教学近十年的切身体验和经验总结,以及近几年的学生实际,长江大学工程技术学院基础部组织物理教研室编写了这套《大学物理》教材。

本套教材的指导思想是:以教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委会颁发的“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”为指导,紧密结合独立学院的学生实际,力求编写一套教师好教、学生好学、适合独立学院使用的《大学物理》教材。这套《大学物理》教材以淡化理论,注重应用为宗旨,着重阐述基本物理知识和基本物理概念,以及基本物理问题的解决方法,以方便学生自学。为此,我们采取了如下措施:

1. 对于课程的基本内容,我们严格按照“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”进行选取和编排,以保证基本物理知识体系的系统性和完整性,同时也照顾到了不同专业的需求。

2. 在保证基本物理知识的科学性与完整性的基础上,着重于培养学生对物理概念和物理规律的理解。对物理定律的阐述和推导都力求严谨详细,以便学生自学;对于部分数学推导过程过分复杂,而“基本要求”又属“了解”的内容,或者简化处理,或者用特例代替推导,或者通过阐明物理机理后抬出物理公式,或者讲明公式的推导思路后列出公式。

3. 为了帮助学生全面地理解和掌握物理概念,本书在例题的选取上,一是加大了例题量,二是尽量涵盖各知识点,三是解题过程力求规范和详细,以便学生自学,并培养学生良好的解题习惯。

4. 为了培养学生“自主学习”能力,我们专门编写了适合于学生自学的《大学物理学习与解题指导》。

5. 为了使學生通过课外练习对所学知识的全面复习,而又不增加学生的课外负担,也为了方便教师布置课外作业,我们编写了通过近十年教学经验提炼的《大学物理课外练习习题集》(简称《习题集》)附在《大学物理学习与解题指导》之后。《习题集》基本上是每课次练习一次,每次练习内容包含选择题4道,填空题3道,计算题2道。选择题和填空题主要是复习物理概念,也作简单计算。《习题集》分甲乙两套,为的是使使用该习题集的连续两届学生的课外练习不相同。《习题集》

的答案及简短解答过程没有附在书后,而是保存在长江大学工程技术学院基础部,使用该教材的学校可以来函索取。

本教材全部采用国际单位制(SI),常用物理常量列在书前,习题与思考题的参考答案附录书后。

本套书由《大学物理》上册、《大学物理》下册及《大学物理学习与解题指导》共三册书组成。其中《大学物理》上、下册可分别作为两个学期的教材使用。其教学学时可按照 120 学时安排。

本套书由伍嗣榕副教授组织编写,康垂令教授担任总主编,黄亮、蒋涛担任《大学物理》上册主编,伍嗣榕、李玲担任《大学物理》下册主编,郑定山、黄健担任《大学物理学习与解题指导》主编。参加编写的老师有:康垂令(第 1 章、第 2 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章及附录),黄亮(第 3 章、第 17 章),蒋涛(第 4 章、第 5 章),王志中(第 9 章、第 10 章),伍嗣榕(第 11 章、第 12 章),郑定山(第 13 章、第 14 章),黄健(第 15 章、第 16 章),李玲(第 18 章、第 19 章)。《大学物理学习与解题指导》各章的内容均由《大学物理》上、下册中各章对应的编者完成。

编者特别感谢长江大学工程技术学院的领导对编写《大学物理》教材的关心与支持。

由于编者的学识水平有限,加上时间特别仓促,致使书中疏漏,甚至错误难免,欢迎使用本书的师生提出宝贵意见

编 者
2012. 10

常用物理常数表

引力常量	$G=6.67\times 10^{-11}\text{ N}^2\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$
阿伏加德罗常量	$N_{\text{A}}=6.02\times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
摩尔气体常量	$R=8.31\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
玻耳兹曼常量	$k=1.38\times 10^{-23}\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
真空中光速	$c=3.00\times 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
电子质量	$m_{\text{e}}=9.11\times 10^{-31}\text{ kg}$
中子质量	$m_{\text{n}}=1.67\times 10^{-27}\text{ kg}$
质子质量	$m_{\text{p}}=1.67\times 10^{-27}\text{ kg}$
元电荷	$e=1.60\times 10^{-19}\text{ C}$
真空中电容率	$\epsilon_0=8.85\times 10^{-12}\text{ C}^2\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
真空中磁导率	$\mu_0=4\pi\times 10^{-7}\text{ H}\cdot\text{m}^{-1}=1.26\times 10^{-6}\text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$
普朗克常量	$h=6.63\times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$
维恩常量	$b=2.897\times 10^{-3}\text{ m}\cdot\text{K}$
斯忒藩-玻耳兹曼常量	$\sigma=5.67\times 10^{-8}\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
重力加速度	$g=9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
标准大气压	$1\text{ atm}=1.013\times 10^5\text{ Pa}$
太阳质量	$1.99\times 10^{30}\text{ kg}$
太阳平均半径	$6.96\times 10^8\text{ m}$
地球质量	$5.98\times 10^{24}\text{ kg}$
地球平均半径	$6.47\times 10^6\text{ m}$
地球轨道平均半径	$1.49\times 10^{11}\text{ m}$
月亮质量	$7.35\times 10^{22}\text{ kg}$
月亮平均半径	$2.74\times 10^6\text{ m}$
月亮轨道平均半径	$3.84\times 10^8\text{ m}$

目 录

第五篇 电磁学	(1)
第十一章 真空中的静电场	(1)
第一节 电荷 库仑定律	(1)
第二节 电 场 强 度	(4)
第三节 电通量 高斯定理	(11)
第四节 静电场的环路定理 电势	(23)
第五节 静电的应用	(32)
第十二章 静电场中的导体和电介质	(39)
第一节 静电场中的导体	(39)
第二节 静电场中的电介质	(48)
第三节 电容 电场的能量	(54)
第四节 稳恒电流	(61)
第十三章 稳恒磁场	(68)
第一节 磁场 磁感应强度	(68)
第二节 毕奥-萨伐尔定律	(73)
第三节 磁通量 磁场的高斯定理	(81)
第四节 安培环路定理	(85)
第五节 磁场对载流导线的作用	(91)
第六节 磁场对运动电荷的作用	(99)
第十四章 磁场中的磁介质	(111)
第一节 磁介质在磁场中的磁化	(111)
第二节 铁磁质	(118)
第十五章 电磁感应	(123)
第一节 电磁感应定律	(123)
第二节 动生电动势	(129)
第三节 感生电动势 涡旋电场	(134)
第四节 自感和互感	(141)

第五节 磁场能量·····	(147)
第十六章 电磁场和电磁波·····	(157)
第一节 位移电流 全电流的安培环路定律·····	(157)
第二节 麦克斯韦方程组的积分形式·····	(162)
第三节 电磁波的产生和传播电磁波的性质·····	(165)
第六篇 近代物理学基础·····	(173)
第十七章 狭义相对论基础·····	(174)
第一节 经典力学的时空观迈克尔逊-莫雷实验 ·····	(174)
第二节 狭义相对论的基本原理 洛伦兹坐标变换式·····	(179)
第三节 狭义相对论的时空观·····	(183)
第四节 狭义相对论中的质量、动量和能量 ·····	(188)
第十八章 光的量子性·····	(194)
第一节 热辐射 黑体辐射定律·····	(194)
第二节 普朗克的量子假设与普朗克公式·····	(198)
第三节 光电效应 爱因斯坦的光子假设·····	(200)
第四节 康普顿效应·····	(208)
第十九章 原子的量子理论·····	(215)
第一节 玻尔的氢原子理论·····	(215)
第二节 德布罗意波 实物粒子的波粒二象性·····	(221)
第三节 不确定关系式·····	(227)
第四节 量子力学简介·····	(229)
第五节 氢原子的量子理论·····	(237)
第六节 原子的壳层结构·····	(239)
附录 思考题及习题参考答案·····	(247)
参考文献·····	(258)

第五篇 电 磁 学

电磁学的知识范围很广,它研究的是电磁现象的有关规律,以及物质的电学性质与磁学性质。电学与现代技术的关系十分密切。原因有以下几点:第一,电能可以十分方便地转换为其他形式的能量,如机械能、热能、光能、化学能,等等;第二,电能能远距离传输,而且电机和电气器械的效率一般都很高;第三,电磁波在空间传播,能在极短时间内把信号传送到远方;第四,电气测量仪表具有很高的灵敏度。电工学、电化学、无线电电子学、遥控和自动控制学、电视学、固态电子学、计算机硬件等,都是以电磁学的研究为基础。

电磁学的研究,在理论方面也十分重要。人们对于物质各种性能的认识,就是以物质的电结构为基础。在分子和原子等微观领域中,电磁力起着主要作用。有许多现象粗看起来好像与电磁学并无联系,如固体和液体的弹性、金属的导热性、光学中的折射率等,却都可以从物质的电结构中得到解释。可见,电磁学理论在现代物理学中占有重要的地位。

第十一章 真空中的静电场

相对于观测者静止的电荷激发的电场称为静电场,也称库仑场。本章研究的是真空中静电场的基本性质和基本规律。我们将从库仑定律出发,引入电场的概念,进而讲述描述电场的两个基本物理量——电场强度和电势。再通过讲述高斯定理和安培环路定理揭示静电场的本质特征。最后简单讨论电场强度和电势的微分关系。

第一节 电荷 库仑定律

一、物质的电结构

电这个词来源于希腊文,原来的意思是琥珀。远在公元前 585 年,古希腊哲学家泰勒斯(Thales,约公元前 624—公元前 546 年)就记载了用木块摩擦过的琥珀

能吸引碎草等轻微物体的现象。后来人们还发现很多其他物体通过摩擦也具这种特性。人们称这种物体具有了电荷,或者说,物体带了“电”。

电荷是物质的一种基本属性。实验发现,自然界中,电荷只有两种,不是正电荷,就是负电荷。用丝绸摩擦过的玻璃棒所带电荷为正电荷,用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带电荷为负电荷。实验还发现,同性电荷相斥,异性电荷相吸。

物质电结构的理论证明:任何一种原子都是由带正电的原子核和若干个带负电的、在原子核周围运动的**电子**所组成的。原子核内含有不带电的**中子**和带正电的**质子**,在一个原子中,原子核内质子数与核外电子数相等。一个质子所带正电和一个电子所带负电的绝对值相等。电荷的单位为库仑,记为 C。一个质子和一个电子带电的绝对值,即一个**基元电荷**的绝对值为 $e=1.602\times 10^{-19}\text{C}$ 。

物体带电的过程是失去或得到电子的过程,失去电子的物体带正电,得到电子的物体带负电。电荷“消失”的过程是正、负电荷中和的过程,值得注意的是,不带电的物体并不意味着其中没有电荷,而是其上任意宏观小的区域都含有极大量的原子,即含有大量等量异号的电荷,于是正负电荷对外的作用相互抵消,以致对外不显电性。这种状态称**电中性**,即是说物体不带电。

二、电荷的量子化

物质的电结构说明,物体所带电荷一定是基元电荷的整数倍,即电荷是不连续的,这称为**电荷的量子化**。但要指出的是,电荷不连续性是从微观角度提出来的,但在宏观角度上看,电荷量子化难以直接觉察。这是因为基元电荷太小,以至于宏观能感知的电量都含有极大量的基元电荷,因此宏观上就感觉不出电荷的量子化。所以我们在研究宏观电现象时,仍然可把电荷看成是连续变化的。

三、电荷守恒定律

实验和理论证明,电荷既不能创造,也不能消灭,只能从一个物体转移到另一个物体。若把参与相互作用的几个物体视为一个体系,而整个体系与外界没有电荷交换,那么在任意时刻,不管系统中发生了什么变化,整个系统的电荷代数和始终保持不变。于是**电荷守恒定律**可表述为:不管发生什么过程,孤立系统内电荷的代数和保持不变。电荷守恒律是物理学中普遍适用的基本规律,无论是宏观现象还是微观过程都成立。

四、库仑定律

18 世纪末,一些科学家开始对电荷之间的相互作用力进行定量研究,其中典型代表是法国科学家库仑(C. A. de Coulomb, 1736—1806 年),他首先从扭秤实验

中总结出两个点电荷之间相互作用的规律,人们把它称为库仑定律。此定律奠定了电现象定量研究的基础。

带电体之间相互作用力与带电体的几何形状、电荷的种类、电量的多少以及周围的介质等许多因素有关。为了使问题简化,人们引入了点电荷的物理模型。点电荷就是其几何线度比问题所涉及的线度小得多的带电体。这时带电体可看成是一个带电的几何点。这样,在研究它与其他带电体的相互作用时,可以不考虑它的形状和大小,而把它当作一个几何点来处理。

实验发现:两个静止的点电荷 q_1 和 q_2 之间的作用力的大小与两点电荷电量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比,作用力的方向沿着两点电荷间的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。

如图 11-1 所示,真空中有两个点电荷 q_1 和 q_2 ,它们之间的距离为 r ,设由 q_1 指向 q_2 的矢径为 $\mathbf{r}_{12}$ 。则 q_1 对 q_2 的作用力 $\mathbf{F}_{12}$ 为:

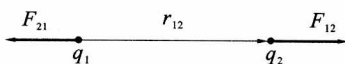


图 11-1 两点电荷间的作用力

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

式中, $\mathbf{F}_{21}$ 是 q_2 对 q_1 的作用力, k 为比例常数,由实验测定并与所取的单位制有关。取国际单位制(SI),即电量的单位用库仑(C),距离的单位用米(m),力的单位用牛顿(N),则式中的常数 k 写成 $1/(4\pi\epsilon_0)$,于是有

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12} \quad (11-1)$$

式中, ϵ_0 表示真空中的电容率,也称介电常数,由实验测定,其值为, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由式(11-1)可知,如果 q_1, q_2 同号,则 $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\mathbf{r}_{12}$ 同向, $\mathbf{F}_{12}$ 是斥力,说明同号电荷相斥;如果 q_1, q_2 异号,则 $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\mathbf{r}_{12}$ 反向, $\mathbf{F}_{12}$ 是引力,说明异号电荷相吸。静止电荷之间的作用力也称库仑力。

既然电荷之间作用的是力,也必然满足力的叠加原理。叠加原理包含两个内容:其一是独立性,其二是叠加性。对于库仑力来讲,独立性是两个电荷之间的作用力不因其他电荷的存在而受到影响;叠加性是几个电荷对某一电荷 q_0 的库仑力等于每个电荷分别对该电荷 q_0 的库仑力的矢量和。设点电荷系由 $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成, $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n$ 分别是 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 对 q_0 引的矢径, $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n$ 分别是 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 与 q_0 单独存在时对 q_0 的作用力。依力的叠加原理,有

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_1}{r_1^3} \mathbf{r}_1 + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_2}{r_2^3} \mathbf{r}_2 + \dots + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_n}{r_n^3} \mathbf{r}_n$$

即

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_i}{r_i^3} \mathbf{r}_i \quad (11-2)$$

这就是**叠加原理**。和号里面的式子表示独立性,和号与里面的式子合起来表示叠加性。注意,这里的叠加是矢量叠加。

例题 11.1 试比较氢原子中电子与质子间的库仑力与万有引力。氢原子中电子与质子间的距离为 $5.30 \times 10^{-11} \text{ m}$,它们所带电荷都是基元电荷,其绝对值为 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

解 在氢原子中,原子核半径的数量级为 10^{-15} m ,电子半径小于 10^{-18} m ,即原子核和电子的线度远小于它们之间的距离,于是可将它们看成点电荷。由库仑定律得到它们之间的库仑力为

$$\begin{aligned} F_{\text{库仑力}} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \\ &= \frac{1}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12}} \times \frac{(1.60 \times 10^{-19})^2}{(5.30 \times 10^{-11})^2} \text{ N} \\ &= 8.19 \times 10^{-8} \text{ N} \end{aligned}$$

因质子与电子的质量分别为 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 、 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$,由万有引力定律,得到它们之间的万有引力为

$$\begin{aligned} F_{\text{万有引力}} &= G \frac{m_p m_e}{r^2} \\ &= 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 9.11 \times 10^{-31}}{(5.30 \times 10^{-11})^2} \text{ N} \\ &= 3.61 \times 10^{-47} \text{ N} \end{aligned}$$

其比值为

$$\frac{F_{\text{库仑力}}}{F_{\text{万有引力}}} = \frac{8.19 \times 10^{-8}}{3.61 \times 10^{-47}} = 2.27 \times 10^{39}$$

可见,在原子中,电子与原子核之间的万有引力与库仑力相比较,远可以忽略。不过库仑力与万有引力都是距离平方反比力,它们有许多共同点。这里不再赘述。

第二节 电场强度

一、电场 电场强度

早期的电磁理论是**超距作用**的理论,该理论认为,相隔一定距离的两个电荷间的相互作用,就如同它们彼此接触一样,其相互作用既不需要传递介质,也不需要传递时间。后来,英国物理学家、化学家**法拉第**(Michael Faraday, 1791—1867 年)在大量实验研究的基础上,提出了**近距作用**观点,即电荷之间的相互作用力是通过场来传递的。现在,场的概念已经成为近代物理学中最重要的基本概念之一。

法拉第认为,凡是电荷,都会在其周围激发电场,电场再对场内的电荷以作用力;反之亦然。如图 11-2 所示。

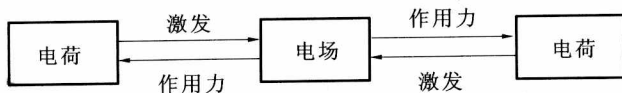


图 11-2 电荷间的作用力通过电场传递

电场是一种物质,它的对外表现是:其一,对在其内的电荷有作用力,此力称为**电场力**;其二,对在其内运动的电荷做功;其三,与在其内的物质有相互作用,即使导体产生静电感应,使介质产生极化;其四,它可以脱离电荷单独存在。后面这一点,我们以后会看到。而且以后我们还会看到:既然电场是物质,它和其它物质(例如分子、原子)一样,也具有质量、动量和能量。

一般而言,场不仅具有一定的空间分布,还随时间变化。本章研究的是静电场,在这种情况下静电场的性质与时间无关。

既然处在电场中的电荷会受到作用力,那么我们就以这个性质来定量地描述电场。为此,我们在电场中引入一个**试验电荷** q_0 ,通过测量电场对它的作用力来定义电场。那么,试验电荷应满足什么条件呢?首先要求这个电荷的电量足够小,以至于它不明显地改变产生原电场的电荷分布,从而不明显地改变原电场;其次,这个电荷的几何线度足够小,这样就可以把它看成点电荷,通过它所测量出的电场性质就是空间中该点的电场性质。当然,为了方便,我们往往取试验电荷 q_0 大于零,这样电场强度的方向就是试验电荷的受力方向。实验发现,当 q_0 的电量按其倍数变化时,它所受到的电场力 F 的大小也按同样的倍数变化,其比值不变,即 F 与 q_0 的比值为定值。我们把这个比值定义为**电场强度**,简称**场强** E ,即

$$E = F/q_0 \quad (11-3)$$

式(11-3)称为**电场强度的定义式**。利用库仑定律可以证明,对于电场中的任一固定点 P 来说,可以进一步看出比值 F/q_0 是一个无论大小和方向都与试验电荷 q_0 无关的矢量,它只随点 P 的坐标而变,它揭示了电场的本质属性。所以可以说,空间某点电场强度的大小在量值上等于单位正点电荷受力的大小,方向与电荷受力的方向一致。另外,我们习惯上把电场中的点 P 称为**场点**,产生电场的电荷所在点称为**源点**。

电场强度的单位是 $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$,在电工计算中常写作 $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。这两种表示是等价的。电场强度的量纲是 $[\text{I}]^{-1}[\text{L}][\text{M}][\text{T}]^{-3}$ 。

二、电场叠加原理

若将试验电荷 q_0 放入由若干个电荷 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 激发的电场中的某点 P ,设

$F_1, F_2, \dots, F_n$ 是 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 单独存在时对试验电荷 q_0 的作用力。由力的叠加原理可知, 这些电荷激发的电场对试验电荷 q_0 的作用力为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i$$

由电场强度定义式(11-3)可知, 这些电荷 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 激发的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i / q_0 = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \dots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0}$$

即

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i \quad (11-4)$$

式中, $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_n$ 分别是电荷 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 单独存在时激发电场的电场强度。这就是电场叠加原理。也就是说, 若干个电荷激发电场的电场强度等于这些电荷单独存在时激发电场电场强度的矢量和。

三、电场强度的计算

1. 点电荷激发电场的电场强度

在点电荷 q 激发的电场中有一点 P , 设点 P 对点电荷 q 引的矢径为 $\mathbf{r}$ 。将试验电荷 q_0 放于点 P , 因为都是点电荷, 由库仑定律可得点电荷 q 对试验电荷 q_0 的电场力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_0 q}{r^3} \mathbf{r}$$

由电场强度的定义式(11-3)可求得点电荷 q 激发电场的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^3} \mathbf{r} \quad (11-5)$$

即点电荷激发的电场 $\mathbf{E}$ 与点电荷对场点引的矢径 $\mathbf{r}$ 平行, 这说明静电场是纵向场。当 $q > 0$, 则电场强度 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{r}$ 同向, 即沿径向向外; 当 $q < 0$, 则电场强度 $\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{r}$ 反向, 即沿径向向里。对于 r 值相同的点, 即以 q 为球心的球面上各点, 电场强度的大小相等。由此可见点电荷激发的电场具有球对称性。

2. 点电荷系激发电场的电场强度

设真空中有若干个电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$, 它们激发的电场中有一点 P , 电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 对点 P 引的矢径分别为 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n$ 。依电场叠加原理式(11-4)和点电荷激发电场的电场强度式(11-5), 得点 P 处的电场强度为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_i}{r_i^3} \mathbf{r}_i \quad (11-6)$$

3. 连续带电体激发电场的电场强度

对于连续带电体,可将连续带电体分割成无数个极微小带电体 dq , dq 称为电荷元,如图 11-3 所示。每一电荷元 dq 都是一个点电荷,它激发的电场在点 P 的电场强度是点电荷激发电场的电场强度 dE ,可用式(11-5)计算,即

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dq}{r^3} \mathbf{r}$$

式中, $\mathbf{r}$ 为电荷元 dq 到场点 P 引的矢径。

依电场叠加原理,连续带电体激发电场的电场强度为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int_q \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} \quad (11-7)$$

式(11-7)中积分号的下标 q 表示对所有电荷积分。

一般来讲,连续带电体有三种分布,即线分布、面分布和体分布。电荷系都是由这三种分布的各种组合而构成。下面就对这三种分布的连续带电体激发电场的电场强度的求法进行讨论,至于它们各种组合场强的求法这里不再讨论。

要求出连续带电体激发电场的电场强度,关键是要求出电荷元 dq 的表达式。

对于电荷分布在某一体积内的带电体,即所谓的体电荷, dq 与其所占的体积元 dV 成正比,与该体积元的电荷体密度 ρ 成正比,于是有 $dq = \rho dV$ 。这里要说明的是,体电荷体各处的电荷体密度 ρ 不一定相同,其电荷体密度的定义式为 $\rho = dq/dV$ 。将 $dq = \rho dV$ 带入式(11-7),得体分布带电体激发电场的电场强度为

$$\mathbf{E} = \int_V \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\rho dV}{r^3} \mathbf{r} \quad (11-8)$$

式(11-8)中积分号的下标 V 表示对电荷所占的空间体积积分。

对于面电荷,即电荷分布在某一面积内的带电体, dq 与其所占的面积元 dS 成正比,与该面积元的电荷面密度 σ (电荷面密度的定义式为 $\sigma = dq/dS$) 成正比。于是有 $dq = \sigma dS$ 。由式(11-7)得面分布带电体激发电场的电场强度为

$$\mathbf{E} = \int_S \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\sigma dS}{r^3} \mathbf{r} \quad (11-9)$$

这里除了要说明式(11-9)中积分号的下标 S 表示对电荷所占的空间面积积分外,还要介绍一下面电荷的概念。所谓面电荷,是一种物理模型,是带电面的厚度比问题所涉及的线度小得多的带电体。

同理,对于线电荷,即电荷分布在某一细线上的带电体, $dq = \lambda dl$, λ 为电荷线密度,其定义式为 $\lambda = dq/dl$ 。于是得线电荷激发电场的电场强度为

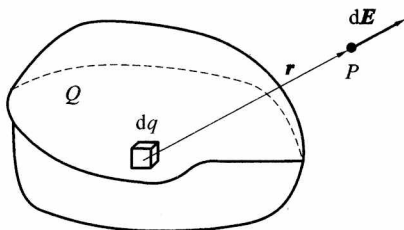


图 11-3 连续带电体中电荷元激发电场的电场强度

$$\mathbf{E} = \int_l \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda dl}{r^3} \mathbf{r} \quad (11-10)$$

式(11-10)中积分是对电荷所占曲线的积分。所谓线电荷,也是一种物理模型,是带电线截面的几何尺寸比问题所涉及的线度小得多的带电体。

四、电场对电荷的作用力

由电场强度定义式(11-3)可知,电场 $\mathbf{E}$ 对放在其内的点电荷 q 的作用力为

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

如果要求放在电场 $\mathbf{E}$ 内的连续带电体 Q 所受的电场力,可以将其无限分割成微小电荷元 dq ,微小电荷元 dq 受的电场力 $d\mathbf{F}$ 就可以用点电荷受电场力计算,然后求和,即

$$\mathbf{F} = \int_Q \mathbf{E} dq \quad (11-12)$$

式(11-12)中的积分是对受电场力的整个电荷 Q 进行的,而且是矢量积分。积分号里的 $\mathbf{E}$ 是电荷元 dq 所在处的电场强度,因为空间各处的电场强度不一定相同。

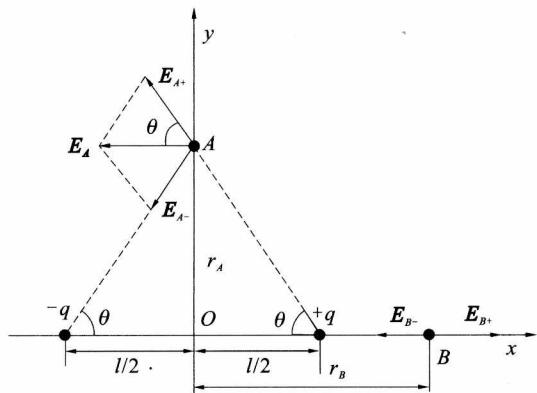


图 11-4 电偶极子中垂面上和延长线的电场

如图 11-4 所示。 $\mathbf{E}_{A+}$ 、 $\mathbf{E}_{A-}$ 分别表示 $-q$ 和 $+q$ 在 A 点产生的电场强度。 $\mathbf{E}_{B-}$ 、 $\mathbf{E}_{B+}$ 分别表示 $-q$ 和 $+q$ 在 B 点产生的电场强度。先求 A 点的电场强度,由图中几何关系知:

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

$$E_{Ay} = E_{A+y} + E_{A-y} = E_{A+} \sin(\pi - \theta) + E_{A-} \sin(\pi + \theta) = 0$$

$$E_{Ax} = E_{A+x} + E_{A-x} = E_{A+} \cos(\pi - \theta) + E_{A-} \cos(\pi + \theta) = -2E_{A+} \cos\theta$$

例题 11.2 求电偶极子中垂面上一点 A 、延长线上一点 B 的电场强度,如图 11-4 所示。电偶极子是一种物理模型,是由其距离 l 远小于问题所涉及线度 r 的等量、异号两点电荷组成的系统。描述电偶极子的物理量是电偶极矩(简称电矩)矢量 $\mathbf{p}_e = ql$, l 是从 $-q$ 向 $+q$ 引的矢径。

解 取直角坐标系 xOy , O 为电偶极子的中点,点 A 在 Oy 轴上,点 B 在 Ox 轴上, OA 长为 y , OB 长为 x ,

$$= -2E_{A+} \frac{l/2}{[y^2 + (l/2)^2]^{1/2}} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{(y^2 + l^2/4)^{3/2}}$$

这里 $y \gg l$, 近似有

$$E_A = E_{Ax} \approx -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_e}{y^3}$$

写成矢量式, 有

$$\mathbf{E}_A = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p}_e}{y^3}$$

再求 B 点的电场强度。由图 11-4 中几何关系知:

$$\begin{aligned} E_{B+} = E_{B+x} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(x-l/2)^2} & E_{B-} = E_{B-x} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-q}{(x+l/2)^2} \\ E_{Bx} = E_{B+x} + E_{B-x} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(x-l/2)^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(x+l/2)^2} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2xlq}{(x^2 - l^2/4)^2} \end{aligned}$$

因 $x \gg l$, 近似有

$$E_B = E_{Bx} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p_e}{x^3}$$

写成矢量式, 有

$$\mathbf{E}_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\mathbf{p}_e}{x^3}$$

例题 11.3 如图 11-5 所示, 真空中有一半径为 R 、线电荷密度为 λ 的均匀带电的细圆环。求中心轴线上点 A 处的电场强度。

解 在圆环上任取一线电荷元 $dq = \lambda dl$, 它在 A 点产生的电场强度为 $d\mathbf{E}$ 。因圆环具有轴对称性, 故圆环在 A 点所激发的电场只有沿 z 轴的分量。于是, 只需要求 $d\mathbf{E}$ 的 z 分量。

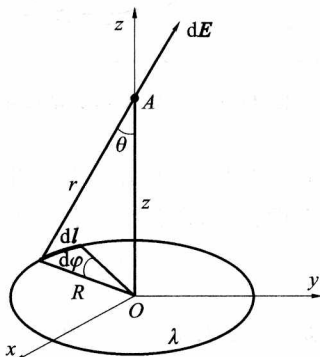


图 11-5 均匀带电圆环的电场

$$\begin{aligned} dE_z = dE \cos\theta &= \frac{\lambda dl}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos\theta \\ &= \frac{\lambda z dl}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{\lambda z R d\phi}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + z^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

故点 A 处的场强大小为

$$\begin{aligned} E = E_z &= \int_L dE_z = \int_0^{2\pi} \frac{\lambda z R d\phi}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + z^2)^{3/2}} \\ &= \frac{\lambda R z}{2\epsilon_0 (R^2 + z^2)^{3/2}} \end{aligned}$$