

# 大学物理学

第二分册

## 电 磁 学

秦德培 主编



重庆大学出版社

-2

2

295368

06  
A08-2  
(2) 2

# 大学物理学

第二分册

电 磁 学

秦德培 主编



重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本书根据全国高等学校工科物理课程教学指导委员会制定的《大学物理课程教学基本要求》及其修改意见编写。全书分《力学·热学》、《电磁学》、《波动学》和《近代物理及物理学在现代科学技术中的应用》4个分册出版，每章均附有内容提要，配置有现今较为流行的习题和思考题。本分册包括静电场、静电场中的导体、磁场、磁力、电磁感应和电磁场理论基础等内容。

本书可作为工科院校大学物理课程的通用教材，也可作为其它院校非物理专业和成人教育学院、职工大学等院校各工科专业的教学参考书。

DMS0/02

大学物理学 第三分册

电 磁 学

蔡德培 主编

责任编辑 黄开植

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆通信学院印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:8 字数:213千

1996年4月第2版 1996年4月第5次印刷

印数:30501—38000

ISBN 7-5624-0029-6/O·9 定价:8.00元

(川)新登字 020号

## 常用物理常量表

名 称	符号	数 值
引力常量	$G$	$6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
地球质量	$M$	$5.98 \times 10^{24} \text{kg}$
地球半径	$R$	$6.4 \times 10^6 \text{m}$
阿伏伽德罗常量	$N_A$	$6.02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$
气体常量	$R$	$8.31 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
玻耳兹曼常量	$k$	$1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
理想气体标准状态下的 摩尔体积	$V_m$	$22.4 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
标准大气压	$p_0$	$1.013 \times 10^5 \text{Pa}$
电子电量	$e$	$1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
电子静质量	$m_e$	$9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$
电子静能	$E_e$	$0.511 \text{MeV}$
质子静质量	$m_p$	$1.673 \times 10^{-27} \text{kg}$
中子静质量	$m_n$	$1.675 \times 10^{-27} \text{kg}$
1 电子伏特能量	$\text{eV}$	$1.602 \times 10^{-19} \text{J}$
真空电容率	$\epsilon_0$	$8.85 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$
真空磁导率	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
真空中光速	$c$	$3.00 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
普朗克常量	$h$	$6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$
里德伯常量	$R_\infty$	$1.097 \times 10^7 \text{m}^{-1}$
玻尔半径	$a_0$	$5.29 \times 10^{-11} \text{m}$
电子康普顿波长	$\lambda$	$2.426 \times 10^{-12} \text{m}$

## 主要物理量的符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
电量	$Q, q$	电势能	$W$	真空磁导率	$\mu_0$
电子电量	$e$	电势	$V$	相对磁导率	$\mu_r$
电偶极矩	$p$	电势差	$U$	磁导率	$\mu$
线电荷密度	$\lambda$	电容	$C$	磁通量	$\Phi$
面电荷密度	$\sigma$	电场能量	$W_e$	全磁通	$\Psi$
体电荷密度	$\rho$	电能密度	$w_e$	磁链	$\Psi$
电场强度	$E$	电流	$I, i$	电动势	$\mathcal{E}$
电位移	$D$	电流密度	$j$	非静电性场场强	$E_s$
真空电容率	$\epsilon_0$	位移电流	$I_d$	有旋电场	$E_r$
相对电容率	$\epsilon_r$	位移电流密度	$j_d$	互感	$M$
电容率	$\epsilon$	磁矩	$m$	自感	$L$
电通量	$\Phi_e$	磁感应强度	$B$	磁场能量	$W_m$
电位移通量	$\Phi_D$	磁场强度	$H$	磁能密度	$w_m$

# 前 言

本书是为工科各专业编写的大学物理课程教材,是何世湘主编西南地区十一所院校联合编写的《大学物理学》的修订版。在原书的编写过程中,各参编单位进行了卓有成效的合作,对各校的教学工作都起到了积极的促进作用。教学形势在不断发展,为适应各校教改的需要,不少的院校已先后编出并在教学中使用了一批切合本校实际的新教材。作为主编和参编人员较集中的重庆大学,经连续 8 年的教学实践,也深感有必要对原书进行合理的修订,在各参编单位的理解和赞同下,决定继续发扬该书的成果,改由重庆大学修订再版。

再版充分吸收了原版的优点,并认真总结了校内广大教师长期积累的教学经验,力求编成一套便于学生阅读,有利教师教学的简明教材。再版在以下几个方面作了改进:

- (1)对教学中的重点和难点,作了更深入细致的分析。
- (2)根据修订后的《基本要求》,对内容作了相应的调整,删去了绝大部分的超纲部分,重点更突出,内容更精练。
- (3)物理概念和基本规律的阐述,更符合近代科学的发展水平。
- (4)例题更切合基础教学的需要,习题和思考题的配置,更符合当前教学的要求。

此外,鉴于物理学正在现代科学技术和工程实践中发挥着越来越重要的作用,为开阔学生视野,激发学生学习物理学和自然科学的兴趣,除基础内容之外,本书还选编了一些反映物理学在现代科学技术中应用的简明专题,供学生课外阅读或作专题选讲。

本教材由秦德培主编,唐南任副主编。参加编写的有王佳眉、陈宁、金属东和林德华(以姓氏笔划为序)。本分册由秦德培(第一、

二、四章)、林德华(第三章)和唐南(第五、六章)编写,由秦德培统稿。

前课程指导委员会委员、原主编何世湘教授对再版工作给予了热忱的指导和帮助,原版的一些作者也表达了对再版工作的关心。在此,我们对她(他)们表示衷心的感谢;对于编写过程中借鉴的其它教材的作者们,也谨致诚挚的谢意。限于编者的业务水平和教学经验,书中难免有不当和错误之处,敬请读者批评指正。

编者

1995年11月

# 目 录

## 第三篇 电磁学

第一章 静电场	2
§1.1 电场和电场强度	2
一、电荷	2
二、库仑定律	2
三、电场和电场强度	4
§1.2 电场强度的叠加计算	6
一、点电荷的场强	6
二、电荷连续分布带电体的场强	7
§1.3 电场线和电通量	15
一、电场线	15
二、电通量	17
§1.4 电场高斯定理	18
§1.5 电介质的极化和有介质存在时的高斯定理	22
一、电介质的极化	22
二、有介质存在时的高斯定理	24
§1.6 用高斯定理求特殊类型电场的场强分布	26
§1.7 静电场的环路定理	34
一、静电场的保守性	34
二、静电场的环路定理	35
§1.8 电势	36
一、电势能和电势	36
二、电势叠加原理	40
§1.9 场强与电势分布的关系	42
一、等势面	42
二、场强与电势分布的关系	43



内容提要 .....	47
思考题 .....	50
习题 .....	54
<b>第二章 静电场中的导体</b> .....	<b>62</b>
§ 2.1 静电场中的导体 .....	62
一、静电平衡时导体上的电荷分布 .....	62
二、导体电荷的电场 .....	64
三、导体表面附近的场强 .....	66
§ 2.2 电容 .....	74
一、电容器和电容 .....	74
二、几种常见电容器的电容 .....	75
三、电容器的并联和串联 .....	78
§ 2.3 静电场的能量 .....	79
一、电容器的能量 .....	79
二、电场的能量 .....	80
内容提要 .....	85
思考题 .....	86
习题 .....	88
<b>第三章 磁场</b> .....	<b>91</b>
§ 3.1 电流 .....	92
一、电流和电流密度 .....	92
二、恒定电流的特征 .....	94
三、电流密度与电荷定向速度的关系 .....	95
§ 3.2 磁感应强度 .....	96
一、磁感应强度 .....	96
二、磁感线 .....	97
三、磁场高斯定理 .....	99
§ 3.3 运动电荷的磁场 .....	101
§ 3.4 毕奥 - 萨伐尔定律 .....	104
一、毕奥 - 萨伐尔定律 .....	104

二、毕奥 - 萨伐尔定律的应用 .....	106
§ 3.5 安培环路定理 .....	112
§ 3.6 介质的磁化和有介质存在时的安培环路定理 .....	117
一、磁性的起源 .....	117
二、磁介质的磁化 .....	117
三、有介质存在时的安培环路定理 .....	119
§ 3.7 由安培环路定理求特殊类型磁场的磁感应强度 .....	121
§ 3.8 铁磁质 .....	126
一、铁磁质的磁化特性 .....	126
二、磁畴理论 .....	129
内容提要 .....	130
思考题 .....	133
习题 .....	139
第四章 磁力 .....	145
§ 4.1 洛仑兹力 .....	145
一、洛仑兹力 .....	145
二、带电粒子在均匀磁场中的螺旋运动 .....	148
三、带电粒子在均匀磁场中运动的简单应用 .....	150
§ 4.2 霍耳效应 .....	152
§ 4.3 安培力 .....	155
一、安培力 .....	155
二、安培力的一般计算 .....	155
三、载流导线在均匀磁场中所受的磁力 .....	156
四、两平行无限长载流直导线间的相互作用力 .....	158
§ 4.4 载流导线在磁场中受到的磁力矩 .....	159
一、定轴转动磁力矩的一般表示 .....	159
二、平面载流回路在均匀磁场中受到的磁力矩 .....	161
§ 4.5 安培力的功 .....	164
内容提要 .....	166
思考题 .....	167

习题 .....	171
<b>第五章 电磁感应</b> .....	<b>176</b>
§ 5.1 电动势 .....	176
一、非静电性场 .....	176
二、电动势 .....	178
§ 5.2 电磁感应定律 .....	179
一、楞次定律 .....	180
二、法拉第电磁感应定律 .....	181
三、感应电流和感应电量 .....	185
§ 5.3 动生电动势 .....	187
§ 5.4 感生电动势 .....	191
§ 5.5 互感 .....	196
§ 5.6 自感 .....	199
一、自感 .....	199
二、线圈的串联 .....	202
§ 5.7 磁场的能量 .....	204
内容提要 .....	206
思考题 .....	207
习题 .....	215
<b>第六章 电磁场理论基础</b> .....	<b>223</b>
§ 6.1 有旋电场和位移电流 .....	223
一、有旋电场 .....	223
二、位移电流 .....	224
§ 6.2 麦克斯韦方程组和电磁场 .....	231
一、麦克斯韦方程组 .....	231
二、电磁场和电磁波 .....	232
内容提要 .....	234
思考题 .....	234
习题 .....	235
<b>习题答案</b> .....	<b>237</b>

## 第三篇 电 磁 学

力学研究质点和质点系的机械运动,热学研究大量分子、原子的无规热运动,它们的研究对象,都是具有粒子性的“实物”物质。电磁学也研究物质,是称为“场”的另一种存在形式的物质,而主要是研究电磁场。尽管场看不见,摸不着,但在它和实物发生相互作用时,同样会显示出实物所具有的质量、动量、能量等物质的基本属性。在一定的条件下,场和实物还可以互相转化。例如,作为电磁场一种存在形式的高能光子,在与重原子核作用时,可以转化为一个正电子和一个负电子;一个正电子和一个负电子,在一定条件下相遇时,会同时消失,产生两到三个光子。实物五花八门,场也有引力场、电磁场等多种形态。场常以波的形式出现,实物也有波动性;实物有粒子性,场也有粒子性,场和实物都具有波粒二象性。当然,场和实物也还是有差别的,例如,实物有质量,而场的静质量为零;实物都集中分布,而场往往弥散在广阔的空间;实物独自占有自己的位置,而场可以共存于同一空间。

# 第一章 静电场

## § 1.1 电场和电场强度

### 一、电荷

用丝绸摩擦过的玻璃棒和用毛皮摩擦过的硬橡胶棒,都有吸引轻小物体的能力,人们称它们带了电或带有电荷。带电的物体叫做带电体。电荷还常指带电体本身,也用来表示带电的多少,即表示电量。电荷有正电荷(用正号表示)和负电荷(用负号表示)两种,同种电荷相斥,异种电荷相吸。电荷是量子化的,所有带电体和微观粒子的电量,都是电子电量  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  库仑(C)的整数倍(近代物理的一种理论认为,有可能存在电量为  $\pm \frac{1}{3}e$  或  $\pm \frac{2}{3}e$  的基本粒子,但至今尚未为实验所证实)。不过,由于  $e$  很小,对于电量比它大得多的宏观带电体,电荷分布仍然可以认为是连续的。电荷是守恒的,与外界没有电荷交换的系统,无论发生什么样的变化,系统内正、负电荷的代数和或系统的净电荷都将保持不变。电荷还具有相对论的不变性,即在不同的参考系中观察时,同一带电粒子的电量不变。

### 二、库仑定律

库仑定律是关于点电荷间相互作用力的规律。点电荷是电磁学中一个重要的理想模型。不考虑形状、大小和电荷分布状况,可以将电荷看作是集中于一点的带电体,叫做点电荷。在微观上,它

可以是正或负电子、质子、原子核等带电粒子,在宏观上,可以是包含了大量基元电荷  $e$  的带电体,只要它的形状、大小和电荷分布在具体问题中显得无关紧要,可以忽略其影响,就可以将它看作是点电荷。例如,研究两个带电体之间的相互作用时,只要两带电体的几何线度远小于它们之间的距离,就可以将它们看作是点电荷。

实验表明,两个静止点电荷之间的相互作用力,可以表示为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (1.1)$$

或

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (1.2)$$

这一由大量实践所总结出的规律,叫做库仑定律。式中  $q_1, q_2$  是真空中两个静止点电荷的电量(正电荷用正值表示,负电荷用负值表示),  $r$  是两点电荷之间的距离,  $\hat{r}$  是从施力电荷到受力电荷的径矢  $r$  方向的单位矢量,可以表示为  $\hat{r} = r/r$ , 比例系数  $k$  和  $\epsilon_0$  为常量。在国际单位制中,电量的单位为库仑(C),  $k = 8.99 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ ,  $\epsilon_0 = 1/4\pi k = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $\epsilon_0$  称为真空电容率或真空介电常量。

图 1.1 所表示的是  $q_1, q_2$  皆为正电荷时,  $q_2$  受到的作用力。

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  $q_1, \dots, q_n$  等各点电荷单独存在时作用于它的静电力的矢量和,即

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n \quad (1.3)$$

这叫做静电力的叠加性。按照这一性质,如果作用于  $q$  的是电荷连续分布的带电体,就可以将它分割成无数的点电荷元  $dq$ (微分),

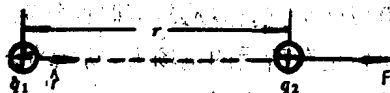


图 1.1 两个点电荷之间的作用力

视带电体为这些点电荷元的集合,并把  $q$  受到的静电力,看成是所有这些  $dq$  单独存在时对  $q$  作用力  $dF$  的矢量和(积分),用积分式表示为

$$F = \int dF \quad (1.4)$$

### 三、电场和电场强度

研究表明,带电体的周围都存在一种特殊的物质——**电场**,两个带电体之间的相互作用力,实际上就是一个带电体产生的电场对另一个带电体的作用力。因而,这种力也叫做**电场力**。

电场的对外表现是对电场中的电荷有作用力,人们也正是通过电荷在电场中的受力情况去认识电场,并且可以用一个与电场力有关的矢量去描述电场。将一个点电荷  $q_0$  引入电场中, $q_0$  应该很小,不致于因它和场源电荷的相互作用而改变原有的电场,这样的点电荷称为**试验电荷**。实验发现,试验电荷受到的电场力  $F$ ,除与电场中场点的位置有关外,还和试验电荷  $q_0$  本身有关,但比值  $F/q_0$  只决定场点的位置。这就说明, $F$  只能反映电场的**一个侧面**, $F/q_0$  才能客观地表达电场的特性。这个描述电场的物理量

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1.5)$$

称为**电场强度**,简称**场强**,有时也称**电场**。(1.5)式表明场强的大小等于**单位电荷所受的电场力**,场强的**方向**指向正电荷受力的方向,场强的方向也称**电场的方向**。

相对观察者静止的电荷所产生的电场,称为**静电场**。在一般情况下,静电场的场强是空间位置的函数。 $E$  为恒矢量的电场称为**均匀电场**或**匀强电场**。在本书中,静电场也常简称**电场**。

由于静电力的叠加性,当试验电荷  $q_0$  处在由多个点电荷组成的点电荷系的电场中时,所受的电场力,应为  $F = \sum F_i$ ,故**电场强度**

$$E = \frac{F}{q_0} = \sum_i \frac{F_i}{q_0}$$

如用  $E_i = F_i/q_0$  表示点电荷  $q_i$  单独存在时所产生电场的场强, 就会有

$$E = \sum_i E_i \quad (1.6)$$

类似地, 对于电荷连续分布的带电体, 可以将它分割成无数多的点电荷元  $dq$ , 并用  $dF$  表示各  $dq$  对  $q_0$  的作用力, 用  $dE = dF/q_0$  表示  $dq$  单独存在时所产生电场的场强, 只须根据静电力的叠加性  $F = \int dF$ , 将(1.6)式中的矢量和改为矢量定积分, 即得

$$E = \int_q dE \quad (1.7)$$

积分号下的  $q$ , 表示对带电体上所有的场源电荷的场强求积分。

(1.6)式和(1.7)式表示, 场源电荷电场中任一点的场强, 等于各点电荷单独存在时所产生的电场场强的矢量和。这一规律称为场强叠加原理, 是电场的最重要性质之一。

场强的单位是牛顿/库仑(N/C)或伏特/米(V/m)。

例 1.1 电偶极子是一个重要的电模型, 由相距很近的两个等值异号点电荷  $+q$  和  $-q$  组成。从  $-q$  到  $+q$  的径矢  $l$  称为电偶极子的轴线,  $p = ql$  称为电偶极子的电矩或电偶极矩。设电偶极子处在匀强电场  $E$  中, 如图 1.2 所示。求  $p, E$  的夹角由  $\theta_1$  变为  $\theta_2$  过程中电场力所作的功。

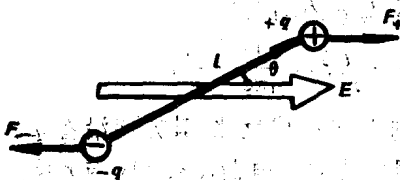


图 1.2 均匀电场中的电偶极子

解 电偶极子的两个极电荷分别受电场力

$$F_+ = +qE$$

$$F_- = -qE$$

它们的大小相等, 方向相反, 形成一对力偶, 力矩

$$M = F_+ l \sin\theta = qEl \sin\theta = pE \sin\theta$$



其作用是使  $\theta$  角减小。因此,当  $\rho, E$  的夹角增量为  $d\theta$  时,电场力做功

$$dA = -Md\theta = -\rho E \sin\theta d\theta$$

故在  $\theta$  由  $\theta_1$  变为  $\theta_2$  的整个过程中,电场力做功

$$\begin{aligned} A &= \int dA = \int_{\theta_1}^{\theta_2} -\rho E \sin\theta d\theta \\ &= \rho E (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) \end{aligned}$$

## § 1.2 电场强度的叠加计算

根据场强叠加原理,任何带电体系电场的场强,都可以在点电荷场强公式的基础上,由  $E = \sum E_i$  或  $E = \int dE$ , 通过计算矢量和或矢量定积分求出。对于由多个电荷连续分布的带电体组成的带电体系,则可先求每一个带电体的场强,再由  $E = E_1 + E_2 + \dots$  计算它们的合场强。

### 一、点电荷的场强

根据库仑定律,在点电荷  $q$  的电场中,试验电荷  $q_0$  受到的电场力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_0 q}{r^2} \hat{r}$$

按场强的定义  $E = F/q_0$ , 点电荷  $q$  的场强为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^3} \hat{r} \quad (1.8)$$

其大小与场点到  $q$  的距离的平方  $r^2$  成反比,其方向沿着  $q$  与场点的连线方向,  $q > 0$  时与  $r$  同向背向点电荷,  $q < 0$  时与  $r$  反向指向点电荷,如图 1.3 所示。

应该指出,由(1.8)式所表达的点电荷的场强公式,仅适用于由静止点电荷产生的静电场。我们知道,当带电体相对观察者运动