

501/141/11

前 言

这是一套系统性、专题性和资料性相结合，以问题讨论为主要内容的基础物理教学参考丛书。掌握好普通物理，对中学物理教师和理工科大专院校的师生来说，是最基本的要求。近年来，各种类型的普通物理教材，品种日益增多，内容不断丰富。本书的目的，不是要增加一套详细陈述这些内容的参考书，而是希望针对学习和教学中遇到的各种问题，开展一些讨论。并力求注意以下几点：

(1) 一般书上讲得较少，又比较重要的知识，可着重讨论。

(2) 一般说法欠妥，常见疏忽，容易误解和混淆的，可提请注意，消除误解和混淆。

(3) 一般书上只给了结论，没有谈道理的，可给出分析过程和简单推证。

(4) 一般讲法单调或不够理想的，可从不同角度，提出几种选择。

(5) 教学中的难点，可介绍克服困难的经验；教学中不易做好的实验，可提供改进意见。

(6) 结合教学需要，介绍一些生动的、富于启发性的物理

责任编辑：赵璧辉

封面设计：许大成

技术设计：刘江

电磁学讨论

四川教育出版社

(成都盐道街三号)

四川省新华书店发行

攀枝花新华印刷厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 19.5 插页 4 字数 440 千

1988 年 4 月第一版

1988 年 4 月第一次印刷

印数：1—1360 册

ISBN7-5400-0220-0/G·217 定价：5.01 元

学史。

在结构上，一般按章编写，不分节，每章包括三部分：

第一部分，基本内容：对本章的基本规律、基本概念等重要内容，作精练的系统叙述和归纳，使读者用较短时间，对本章的主要内容有一个全面的、概括的认识，有关的定律、定义、公式和常数也便于查阅、比较。其篇幅约占全书的四分之一。所谓系统性，主要由这一部分体现。

第二部分，问题讨论：针对教学中和阅读这一部分教材时可能遇到的各种问题，选出若干个小专题，一个一个地加以阐述，每一个相当于一篇教学讨论或教学研究方面的文章。此部分篇幅占全书一半以上。本书的特点，主要由这一部分体现。

第三部分，参考资料：提供一些对教学有益，而一般教材又不便写入的参考资料。如介绍一些有关物理学家和物理定律的内容生动、思想性较强的物理学史，国内外教材中一些精华部分的摘要，一些有意义的参考文献等。

本丛书已编写三册。第一册《力学讨论》由梁昆森、俞超、邱树业编写，梁昆森并主持、审校全稿。第二册《电磁学讨论》由王忠亮、封小超编写。第三册《光学讨论》由李章铨、孙荣山、张阜权编写。

我们希望本丛书对中学物理教师进修普通物理和解决一些教学中遇到的疑难问题能有所帮助。也希望对理工院校学生和从事普通物理教学工作的教师有所帮助。由于涉及面较广，缺点错误在所难免，敬请读者批评指正。

《基础物理教学参考丛书》编写组

1985年3月

0644/37
1472849

出版说明

JY1/141/11

普通物理是中学物理教师和理工科大专院校学生的必修课程，是大学教师从事物理教学的基石，为了帮助中学教师结合教学实际进修普通物理，从较高角度去驾驭中学物理教材，也为了帮助各类理工科院校、电大、职工业余大学师生结合教与学的各种实际问题进一步研究普通物理，我们约请了南京大学物理系、北京师范大学物理系、四川师范大学物理系部分长期从事基础物理教学与研究的同志，如梁昆森教授、张阜权教授、王忠亮副教授、封小超副教授、俞超副教授等编写了这套丛书。

本丛书力求避免与国内已出版的中、外普通物理教材、教参和习题集重复或雷同，选材力求新颖、广泛，注意反映物理学的前沿。丛书包括《力学讨论》、《电磁学讨论》、《光学讨论》等三册。每册按普通物理教材顺序分章。每章分基本内容、问题讨论、参考资料三部分，以问题讨论为主，基础内容力求精练；问题讨论主要是作者多年教学经验的总结，是一般书上所没有的，并力求生动活泼；参考资料汇集了国内外有关书刊中一些精华部分的摘要。

这本《电磁学讨论》由王忠亮编写第一—四章，封小超编写第五—九章。问题讨论的不少文章具有一定学术水平，部分内容曾在一些全国性学术刊物上发表。全书行文流畅，深入浅出。文中小字系选学内容，可供不同程度的读者选用。

为组织这套丛书，四川师范大学物理系封小超等同志做了许多工作，特此鸣谢。

1985年3月

内 容 提 要

本书是系统性、专题性和资料性相结合，以专题讨论为主的普通物理教学参考书，分三册出版。

本册主要是针对电磁学学习和教学中存在的普遍问题进行较深入的讨论。主要内容有静电场的基本规律、静电场中的导体、静电场中的电介质、稳恒电流、电流的磁场、电磁感应、介质中的磁场、电磁场与电磁波、电磁学单位制。适宜于中学物理教师进一步研究电磁学之用，也可供大学、专科、电大等类高等学校师生教与学参考。

目 录

第一章 静电场的基本规律.....	1
第一部分 基本内容.....	1
(一) 电荷[2] (二) 库仑定律[3] (三) 静电场[6]	
(四) 高斯定理[8] (五) 环路定理·电位及电位梯度	
[12] (六) 电力线与等位面[18] (七) 基本计算[22]	
第二部分 问题讨论.....	31
(一) 怎样理解“电荷”概念.....	31
(二) 再议怎样理解“电荷”概念.....	33
(三) 电力平方反比律和适用范围.....	37
(四) 带电体间的相互作用力.....	42
(五) 怎样引入电通量概念和电力线概念.....	45
(六) 与电力线性质不相容的特例.....	49
(七) 关于与电位零点选择有关的几个问题.....	53
(八) 真空中电荷系静电平衡的性质.....	60
第三部分 参考资料.....	65
(一) 分数电荷问题[65] (二) 为何异号电荷相互吸	

引[67]

第二章 静电场中的导体.....73

第一部分 基本内容.....73

(一) 静电场中的导体[74] (二) 导体壳[78] (三)

电容及电容器[80] (四) 静电能[84]

第二部分 问题讨论.....87

(一) 再议电位的零点问题.....87

(二) 电力线的应用.....92

(三) 静电场环路定理的应用.....99

(四) 真空中静电场作用于导体上的力.....105

(五) 自能、互能和静电能.....108

第三部分 参考资料.....118

(一) 静电加速器的原理和应用[118] (二) 超高电压

脉冲器的基本原理[122]

第三章 静电场中的电介质.....127

第一部分 基本内容.....127

(一) 电介质的极化[129] (二) 电位移矢量 D ·有电

介质时的高斯定理[135] (三) 电介质中的电场能量

[141]

第二部分 问题讨论.....143

(一) D 只与自由电荷相联系吗.....143

(二) 电容与电阻的互换计算.....148

(三) 电介质中的电力线和电位移线.....151

(四) 电介质中的力与有介质时的库仑定律.....155

(五) 电介质中的能量密度分布的物理意义.....161

第三部分 参考资料.....166

(一) 压电效应和逆压电效应 [166]	(二) 铁电体与驻极体 [169]	
第四章 稳恒电流		175
第一部分 基本内容		175
(一) 稳恒电流的条件及导电规律 [176]	(二) 电动势 [184]	
(三) 直流电路 [190]	(四) 温差电现象·液体导电和气体导电 [196]	
第二部分 问题讨论		205
(一) 电荷分布的驰豫时间		205
(二) $\mathbf{j}$ 与 $\mathbf{D}$ 的对应性		207
(三) 稳恒电场的演示实验		210
(四) 稳恒电路的电荷分布		215
(五) 电动势概念		221
(六) 电压的定义		231
(七) 简单电路的等效电路		241
(八) 利用电阻组合的对称性求等效电阻的简易方法		246
第三部分 参考资料		251
(一) 电的传导性 [251]	(二) 超导电性的研究 [262]	
第五章 电流的磁场		273
第一部分 基本内容		273
(一) 磁场的描述 [275]	(二) 毕奥-萨伐尔定律 [279]	
(三) 高斯定理和环路定理 [282]	(四) 磁场的计算 [284]	
(五) 洛伦兹力及其应用 [288]	(六) 安培力及其应用 [294]	
第二部分 问题讨论		300

(一) 从一个容易疏忽的问题谈 B 的定义	300
(二) 关于静磁学的实验基础	303
(三) 电场高斯定理和磁场环路定理	306
(四) 安培环路定理中的 I, L, B 及其它	311
(五) 均匀密绕螺线管外部磁场的进一步探讨	317
(六) 普通物理中如何证明安培环路定理	324
(七) 一个可能遇到的问题	327
(八) 电流元之间的作用力与牛顿第三定律	334
(九) 关于安培力与洛伦兹力相互关系的几个问题	337
(十) E 和 B 同时存在时带电粒子的运动	344
(十一) 洛伦兹力公式中的 v 究竟是什么	347

第三部分 参考资料.....352

- (一) 奥斯特与电流的磁效应[352] (二) 毕-萨定律的建立[355] (三) 尼·特斯拉[360] (四) 磁单极子[361] (五) 汤姆孙是怎样发现电子的[365] (六) 磁场中载流导线受力的起源[370] (七) 任意横截面的螺线管引起的磁场[372]

第六章 电磁感应.....375

△第一部分 基本内容.....375

- (一) 感应电流产生的条件和方向[377] (二) 法拉第电磁感应定律[381] (三) 电磁感应的实质和计算[384] (四) 电磁感应的应用[390] (五) 自感、互感和磁能[396] (六) 三种典型的暂态过程[403]

第二部分 问题讨论.....412

- (一) 电磁感应定律两种表述的比较.....412
(二) 涡旋电场中的电势差.....416

(三) 洛仑兹力不作功与动生电动势	421
(四) 运用公式 $\mathcal{E} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} + \oint_L \mathbf{v} \times \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ 的常见误解	424
(五) 判断“感生”与“动生”互相转化的一般法则	426
(六) 感应电动势的大小与参考系有关吗	432
(七) 计算感生电场的三种方法	434
(八) RL 暂态过程中若干容易混淆的问题	439
1. 公式 $i = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$ 的适用条件和 I_0 , R 的物理意义	439
2. 自感电动势都可以大于电源电动势吗	440
3. 暂态电流可否大于稳定时的电流	442
4. 灯泡更亮的一闪与断路时自感现象的演示	442
5. 自感电动势与 L 成正比吗	444
6. 一个不能演示的实验装置	445
(九) 电容器放电过程中的几个问题	447
(十) $1/e$ 在电磁现象中的重要性及其物理意义	451
(十一) 涡流与截面的关系	457
(十二) 趋肤效应和跳环实验	461
第三部分 参考资料	468
(一) 电磁感应是怎样发现的[468] (二) 戴维与法拉第[476] (三) 电磁感应的历史经验[479] (四) 用线圈和磁场演示狭义相对论[480] (五) 关于法拉第定律的一些评论[484]	
第七章 介质中的磁场	489
第一部分 基本内容	489
(一) 电介质与磁介质基本理论的比较[491] (二)	

三个电矢量与三个磁矢量的比较[493] (三)分子电流观点与磁荷观点的比较[497] (四)铁磁质的磁化规律[499] (五)铁磁质与非铁磁质的比较[502] (六)电路与磁路的比较[504]

第二部分 问题讨论.....507

(一)为什么磁荷观点是“错误”的,而它的计算结论却仍然正确.....507

(二)轨道磁矩、自旋磁矩和核磁矩.....511

(三)用两种不同的观点讨论磁介质中的空腔.....516

(四)从三个角度理解永磁铁中 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 的方向相反.....519

(五)磁介质中细长螺线管和螺绕环是否等效.....522

(六)“任意介质”、“各向同性”和“均匀充满”.....526

(七)如何用磁路定理计算永磁铁提供的磁场.....530

第三部分 参考资料.....533

(一) $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 之间的区别是什么[533] (二)核磁共振[537]

第八章 电磁场与电磁波.....541

第一部分 基本内容.....541

(一)实验基础[541] (二)基本假设[544] (三)麦克斯韦方程组[547] (四)电磁波的预言、性质及证实[549] (五)偶极振子的场[552] (六)光的电磁本性及电磁波谱[555]

第二部分 问题讨论.....558

(一)关于位移电流的几个问题.....558

1. 位移电流服从环路定理吗.....558

2. 能够这样计算位移电流的磁场吗.....559

3. 位移电流的方向与 $\mathbf{D}$ 平行吗.....	560
4. 位移电流与参考系有关吗.....	561
(二)电磁场的物质性、场与实物的比较.....	561
(三)能量在电路中的真实传输过程.....	565
(四)电偶极辐射公式的适用条件.....	567
第三部分 参考资料.....	571
(一)一种用电力线研究电磁辐射的简单方法[571]	
(二)麦克斯韦与法拉弟[575]	
第九章 电磁学单位制.....	581
第一部分 基本内容.....	581
(一)单位制的基本知识[582] (二)四种电磁学单位制[585] (三)不同单位制间物理公式的转换[588]	
第二部分 问题讨论.....	591
(一)物理公式中的比例系数.....	591
(二)电磁学中几个常量的关系.....	593
(三)定义方程不一定是教学中对物理量下定义的 方程.....	594
(四)单位制与大数假设.....	596
第三部分 参考资料.....	599
米的新定义及其它[599]	

第一章 静电场的基本规律

第一部分 基本内容

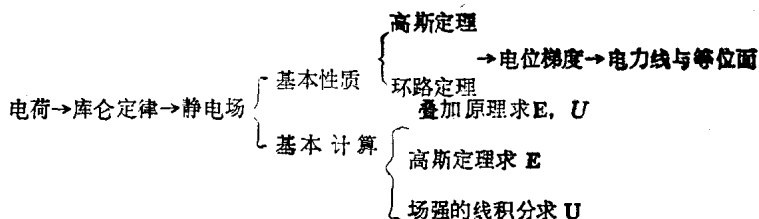


表 1-1 本章公式

名 称	表 达 式	名 称	表 达 式
库仑定律	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$	高斯定理	$\oiint E \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} \Sigma q$
电场强度	$E = \frac{F}{q}$	环路定理	$\oint E \cdot dl = 0$
场强的 叠加原理	$E = \Sigma \frac{F_i}{q} = \Sigma E_i$	电位 (P_0 为 参考点)	$U_{(P)} = \int_P^{\infty} E \cdot dl$
线电荷密度	$\lambda = \frac{dq}{dl}$	电位梯度	$E = -\frac{\partial U}{\partial n} \hat{n} = -\nabla U$
面电荷密度	$\sigma = \frac{dq}{dS}$	点电荷的 场 强	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \hat{r}$
体电荷密度	$\rho = \frac{dq}{d\tau}$	点电荷的 电 位	$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}$

续表

名 称	表 达 式
静电力所做的功 电偶极子在均匀电场 中受到的力矩	$W_{PQ} = A_{PQ} = qU_{PQ} = q[U(P) - U(Q)]$ $L = p \times E$

(一) 电荷

物质由分子、原子组成，而原子又由电子、质子和中子组成，这些粒子无论是稳定的或不稳定的，都可用质量、电荷和内禀角动量等物理性质来表征。电荷有正负两种，质量不能分成正、负，但电荷和质量都是物质的基本属性。迄今为止，我们检测到的最小电荷的电量是质子和电子的电荷电量，称它为基本电荷的电量，常用 e 表示。电子带负电荷，其电量为 $-e$ ，质子带正电荷，其电量为 e ，物质内部固有地存在着电子和质子，这是各种物体带电过程的内在依据。若物体中任何一部分所包含的电子总数和质子总数相等，其净电荷为零，因而它对外界不显电性。

摩擦起电和静电感应是两种基本的起电方法，实验表明，电荷总是等量异号地同时产生同时消失，从而人们总结出物理学的一个普遍而重要的规律：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意物理过程中始终保持不变，这叫做电荷守恒定律。

电荷的另一个特征，叫做电荷的量子化，即任何带电体的电荷都只能是一基本电荷的整数倍，最近一些理论物理学家，提出了可能存在 $\pm \frac{1}{3}e$ 和 $\pm \frac{2}{3}e$ 电量的基本粒子（称为层子或夸克）的理论推测，认为电子、质子和中子等许多粒子都由层子组成，

但这种类型的粒子还未在实验中观测到。

(二) 库仑定律

法国科学家库仑于1777年开始进行著名的扭秤实验，1785年发表了实验总结，从而确定了静电荷间相互作用的基本规律——库仑定律，它是电磁学理论的三大基本实验定律之一。

库仑定律是以引进“点电荷”模型为基础的。如果带电体本身的几何线度比起它到其它带电体的距离小得多，带电体的形状和电荷在其中的分布已无关紧要，就可以把带电体抽象为一个点模型，叫做点电荷。

1. 表述及表达式

(1) 表述. 两个静止点电荷 q_1 和 q_2 ，在真空中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，同号电荷相排斥，异号电荷相吸引。

(2) 表达式

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}.$$

令

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

则

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}}. \quad (1.1)$$

$\mathbf{F}$ 代表电荷 q_1 给电荷 q_2 的力， $\hat{\mathbf{r}}$ 代表由 q_1 到 q_2 方向的单位矢量，当 q_1, q_2 同号时， $\mathbf{F}$ 沿 $\hat{\mathbf{r}}$ 方向，为斥力；当 q_1, q_2 异号时， q_1 与 q_2 乘积为负， $\mathbf{F}$ 沿 $-\hat{\mathbf{r}}$ 方向，为吸力。 q_2 给 q_1 的力为 $-\mathbf{F}$ 。

2. k 值的确定

k 的数值与采用的单位制有关，说明如下：

(1) MKSA 有理化。国际单位制(记作 SI)电磁学部分叫做 MKSA 有理化,它以长度、质量、时间及电流强度为基本量,以米、千克、秒及安培为基本单位,其它各物理量的单位由这些基本单位导出,称为导出单位。国际单位制还规定电磁学部分有理化,即比例系数 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$,这样做可使部分电学量的基本关系式在形式上更合理。例如具有球对称的点电荷场强公式 $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r}$ 有 4π 因子,而没有球对称的无限带电平面的场强公式 $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{n}$ 没有 4π 因子。

(2) ϵ_0 值的确定。 ϵ_0 称为真空中的介电常数,其值由实验测出:

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ 库仑}^2/\text{牛顿} \cdot \text{米}^2,$$

于是
$$k = \frac{1}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12}} = 8.99 \times 10^9 \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2/\text{库仑}^2.$$

通常令 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2/\text{库仑}^2$ 已足够准确。由于(1.1)式中 F 的单位为牛顿, q_1 、 q_2 的单位为库仑, r 的单位为米,故 ϵ_0 和 k 具有上述单位。

根据电磁理论, ϵ_0 也可由下式确定:

$$\epsilon_0 = (4\pi \times 10^{-7} \text{c}^2)^{-1} \approx \frac{10^{-9}}{36\pi} \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ 库仑}^2/\text{牛顿} \cdot \text{米}^2.$$

这里 c 是光在真空中的速率($c = 3 \times 10^8 \text{ 米/秒}$)。把光速和介电常数联系起来是19世纪末电磁学理论发展的一个重要结果,这表明光是一种电磁波。

3. 静电力的叠加原理

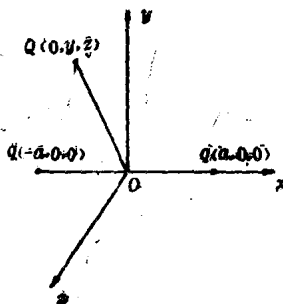
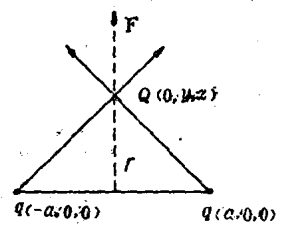
由实验总结出的库仑定律表明两个点电荷的相互作用力与二者电量乘积成正比,大量事实说明,不管系统中有多少电荷,每对点电荷之间的作用力都可以用库仑定律来计算,这就是静电力的叠加原理的基础。

静电力的叠加原理是, 当真空中除了电荷 q_0 之外还存在电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 时, 作用于 q_0 的合力, 等于其它电荷单独作用于 q_0 的力的矢量和, 表达式为

$$\mathbf{F}_0 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_i}{r_{i0}^2} \hat{\mathbf{r}}_{i0} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{i0}. \quad (1.2)$$

库仑定律与叠加原理相配合, 原则上可以解决静电学的全部问题。

表 1-2 库仑定律和叠加原理的用例

问 题	已知: 两点电荷 q, 坐标分别为 $(-a, 0, 0)$、$(a, 0, 0)$; 在其连线的中垂面 yOz 平面上有另一点电荷 $Q(0, y, z)$, 如图 a 所示 求: 点电荷 Q 受的力   (a) (b)
计 算	设 $\mathbf{r} = y\hat{\mathbf{j}} + z\hat{\mathbf{k}}$, $r^2 = y^2 + z^2$, r 为中垂面上的点到坐标原点的距离, 如图(b), 根据对称性, 点电荷 Q 所受的合力方向与 $\mathbf{r}$ 方向一致。 $\mathbf{F} = \frac{2kQqr}{(r^2 + a^2)^{3/2}} \hat{\mathbf{r}}$