

普通物理学 辅导与答疑

(电磁学)

北京出版社

清华大学

现代应用物理系
基础物理教研组

编写



04-42
5049

普通物理学辅导与答疑

(电 磁 学)

清华大学 现代应用物理系 编写
基础物理教研组

北 京 出 版 社

普通物理学辅导与答疑
(电磁学)

PUTONG WULIXUE FUDAO YU DAYI

清华大学 现代应用物理系 编写
基础物理教研组

北京出版社出版
(北京北三环中路6号)

邮政编码: 100011

北京出版社总发行
新华书店北京发行所经销
北京市朝阳区新源印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 14.25印张 308 000字

1996年2月第1版 1996年2月第1次印刷

印数 1—4 000

ISBN 7-200-02761-8/G·892

定 价: 13.40元

编写说明

对于理工科大学生（包括职工大学和电视大学学员）来说，学习普通物理学的主要目的，在于掌握物理学的基本概念、基本规律和基本方法，培养运用物理学的基础知识分析和解决问题的能力。为此，我们参照了我国一些高等学校工科类与非物理专业理科类普通物理学的教学大纲，结合多年来的教学工作经验和心得体会，编写了这套《普通物理学辅导与答疑》。希望能够帮助理工科大学生对物理学的基本内容理解得更深一些，运用得更活一些；并希望有助于广大自学者和已经学完普通物理学的读者，在原有知识的基础上总结提高，启发他们深入钻研问题的积极性，回答他们曾经提出和思考过的某些疑难问题。

本书力图把物理学的基本概念、定律和方法准确地阐述清楚，力求在概括和总结的基础上分清主次，突出重点，解释重点中的难点和容易混淆的地方。为了使本书有较大的适用性，书中的每一章都大致可分为前后两部分，前面的部分属于基本内容，反映的是基本的教学要求；后面的部分则是略高于教学要求的内容和专题性的深入讨论与说明。我们希望这样的安排能够作到使不同水平的读者各得其所，使本书起到课外的辅导与答疑的作用。

本书是《普通物理学辅导与答疑》这套书的电磁学分册，高炳坤教授执笔主编了本书；沈慧君副教授提供了大量的素材，在“典型例题”这部分中编写了若干例题；臧庚媛副教授

提供了大量的素材，在“对若干问题的分析”这部分中编写了若干问题；王虎珠副教授提供了大量的素材；华基美副教授仔细审阅了本书的全部初稿，提出了不少宝贵的修改意见，已融合在本书之中。以上五位都是本书的编者。此外，陈惟蓉教授审阅了本书第一章、第三章和第四章的初稿，并就一些疑难问题与高炳坤教授反复进行了磋商，为本书作出了有益的贡献；牟绪程教授、邓新元教授审阅了本书第一章的初稿，并提出了自己的见解。以上三位的工作为本书的编写起了很好的参考作用。崔砚生教授是《普通物理学辅导与答疑》这套书总体结构的设计者，他仔细审阅了本书的全部书稿，提出了不少宝贵的修改意见，使本书得到了最后的润色。

本书的编写参考了若干现有教材，在许多方面得到了启发与教益，这里难于一一指明，在此一并致谢。

由于我们的水平有限，书中难免有缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

清华大学 现代应用物理系
基础物理教研组

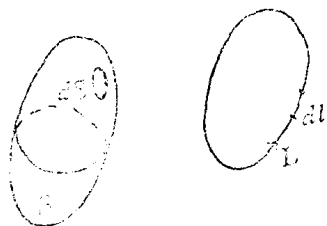
1995年2月

前 言

从微观上看，固体、液体、气体都是由带正、负电荷的粒子组成的，电荷的分布是不连续的。从宏观上看，物体中正、负电荷的分布相互抵消时，物体便呈电中性；物体中正、负电荷的分布不能相互抵消时，物体便带电荷。对于一个与外界没有带电粒子交换的系统来说，其内部正、负电荷的分布可以改变，但其电量的代数和不变。这便是电荷守恒定律。电荷只有两种，电荷守恒，这就是我们面对的电世界。

静止的电荷仅激发电场，运动的电荷既激发电场又激发磁场，这是电磁学的基本观点。电磁场是物质的一种形态，它们弥漫于整个空间，俗称“一片”，用科学的术语来说就是“空间分布”或“空间函数”。在直角坐标中，空间一点的位置用 (x, y, z) 表示。所谓电磁场是“空间分布”，即它们是 (x, y, z) 的函数。当然，如果电磁场随时间变化的话，那它们还是时间 t 的函数。可以概括地说电磁场是 (x, y, z, t) 的函数。显然，电磁场这种物质形态不同于实体物质（固体、液体、气体）的形态，实体物质总是出现在局部空间内的。物质的形态不同，伴随的研究方法也不同。大家在力学和热学中都熟悉了实体物质的研究方法，这种研究方法的特点是：寻找作用量（力、冲量、力矩、功、热量）与状态量（动量、角动量、机械能、内能、熵）的变化之间的关系。而电磁学要研究电磁场这种矢量场的“空间分布”规律，即研究

电场、磁场、电荷和电流彼此之间的关系，如何研究呢？我们可以在电磁场中任意作闭合曲面 S 和闭合曲线 L (如图)，



任一面元 dS 和线元 dl 上都有电磁场，故可对闭合曲面和闭合曲线上的电磁场进行积分。这两种积分都有明确的规律，因此它们是研究电磁场这种“空间分布”的有效方法。用

这两种积分来研究电磁场，这是贯穿整个电磁学的一条主要线索。

需要强调的是，在电磁场中作闭合曲面 S 和闭合曲线 L ，纯粹是一种研究方法。这种闭合曲面和闭合曲线不是电磁场中客观存在的物理闭合曲面和闭合曲线，它们仅存在于人的思维中。闭合曲面是无厚度的几何闭合曲面，闭合曲线是无粗细的几何闭合曲线。

目 录

前 言	(1)
第一章 真空中的静电场	(1)
§ 1.1 静电场的基本概念	(1)
1.1.1 点电荷 面电荷 线电荷	(1)
1.1.2 电场强度 E 电势 U	(3)
1.1.3 电通量 电场强度的环流	(5)
1.1.4 电力线 等势面	(6)
§ 1.2 静电场的基本规律	(8)
1.2.1 库仑定律 叠加原理	(8)
1.2.2 电场强度的叠加原理 电势的叠加原理	(9)
1.2.3 电场强度 E 与电荷分布的关系 电势 U 与 电荷分布的关系	(11)
1.2.4 电场强度 E 与电势 U 的关系	(15)
1.2.5 静电场的高斯定理 静电场的环流定理	(20)
1.2.6 静电场的理论结构	(23)
§ 1.3 求解和分析静电场问题的方法	(24)
1.3.1 计算电场强度的三种方法	(24)
1.3.2 计算电势的两种方法	(29)
1.3.3 利用高斯定理和环流定理分析静电场	(31)
1.3.4 由电场分布求电荷分布	(32)
§ 1.4 典型例题	(34)
§ 1.5 对若干问题的分析	(53)

1.5.1	对称性的分析	(53)
1.5.2	从 $\oiint_{(S)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q(S_{\text{内}})}{\varepsilon_0}$ 和 $\oint_{(L)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$ 看电力线 的特点	(55)
1.5.3	通过 $\mathbf{E} = \int \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \hat{r}$ 与 $\oiint_{(S)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} Q(S_{\text{内}})$ 的比较来理解高斯定理	(57)
1.5.4	“点电荷”在闭合曲面 S 上时高斯定理是 否成立?	(59)
1.5.5	从均匀带电球的电场看电荷的体积能否为 无限小?	(59)
1.5.6	面电荷两侧电场强度突变的规律	(60)
1.5.7	面电荷所受电力的规律	(64)
1.5.8	“无限大”均匀带电平板和“无限长”均匀带电 圆柱的电势零点的选择	(66)
1.5.9	静电场的高斯定理与静电场是平方反比场的 叠加等价吗? 静电场的环流定理与静电场是平方反比场的 叠加等价吗? 静电场的高斯定理加环流定理与静电场是 平方反比场的叠加等价吗?	(67)
第二章 静电场中的导体		(71)
§ 2.1	基本规律	(72)
2.1.1	导体上的电荷分布与导体表面上的电场强度	(72)
2.1.2	封闭导体壳内外的电场	(73)
§ 2.2	典型例题	(78)
§ 2.3	对若干问题的分析	(93)
2.3.1	对 $\mathbf{E}(\text{表}) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \hat{n}$ 的剖析	(93)

2.3.2	用电力线定性分析导体外电场的分布	(95)
2.3.3	两个带同号电荷的导体相互接近时, 其中之一 上可否出现异号电荷? 二者可否都出现异 号电荷?	(97)
2.3.4	静电场的唯一性定理	(98)
2.3.5	电象法	(102)
第三章 静电场中的电介质		(109)
§ 3.1	基本概念	(109)
3.1.1	电介质极化的概述	(109)
3.1.2	电介质极化的微观机制	(111)
3.1.3	电介质极化的宏观描述	(112)
§ 3.2	基本规律	(113)
3.2.1	极化电荷与极化强度的关系	(113)
3.2.2	\mathbf{P} 与 \mathbf{E} 的关系	(116)
3.2.3	电位移 \mathbf{D}	(117)
3.2.4	静电场的基本方程	(119)
§ 3.3	典型例题	(120)
§ 3.4	对若干问题的分析	(131)
3.4.1	介质对 \mathbf{D} 有影响吗?	(131)
3.4.2	\mathbf{D} 与介质无关的充分必要条件	(138)
3.4.3	边值关系的剖析	(139)
3.4.4	各向同性均匀介质内极化电荷体密度 ρ' 的 分布规律	(144)
3.4.5	介质与导体的交界面上极化电荷面密度 σ' 的 分布规律	(145)
3.4.6	介质中的“扁平洞”和“细长洞”	(146)
3.4.7	无限大又无限厚的介质板模型可能吗?	(148)
3.4.8	金属的介电系数是多大?	(151)
第四章 电容与电能		(152)

§ 4.1	电容	(152)
4.1.1	孤立导体的电容	(152)
4.1.2	电容器的电容	(153)
4.1.3	电容器的并、串联	(156)
§ 4.2	电能	(156)
4.2.1	电荷系的电能	(157)
4.2.2	电荷系的自能和互能	(160)
4.2.3	电场的能量	(163)
§ 4.3	典型例题	(164)
§ 4.4	对若干问题的分析	(172)
4.4.1	广义电容	(172)
4.4.2	用导体壳将平行板电容器罩住后其电容 是否改变?	(175)
4.4.3	电荷系的电能公式 $W_e = \frac{1}{2} \int U dq$ 中的 dq 是否包含极化电荷?	(177)
4.4.4	电荷系的互能可正可负, 总电能是否也可正 可负?	(178)
4.4.5	电场能是否可分为自能和互能?	(179)
4.4.6	电场能可分成纯电能和极化能	(179)
4.4.7	有关电容器能量转化的种种问题	(181)
4.4.8	忽略平行板电容器的边缘效应所造成的一个 谬误	(189)
第五章	电流	(192)
§ 5.1	电流的描述	(192)
5.1.1	电流密度 j 与面电流密度 i	(192)
5.1.2	电流强度 I	(194)
5.1.3	电流的连续性方程与稳恒条件	(195)
§ 5.2	稳恒电流的基本规律	(197)

5.2.1	稳恒电流的电场	(197)
5.2.2	单靠静电场不可能形成稳恒电流	(197)
5.2.3	欧姆定律及其微分形式	(198)
5.2.4	电动势 \mathcal{E}	(199)
5.2.5	电源的欧姆定律	(200)
5.2.6	一段含源电路的欧姆定律	(202)
5.2.7	电路中各种能量的转化关系	(203)
5.2.8	基尔霍夫定律	(205)
§ 5.3	典型例题	(206)
§ 5.4	对若干问题的分析	(215)
5.4.1	电流的经典微观图象	(215)
5.4.2	真空中的电子并不一定逆着电力线运动, 导线中的自由电子为何一定逆着电力线 运动呢?	(218)
5.4.3	单靠电源正负极上的电荷能使通电导线中的 电力线沿着导线吗?	(219)
5.4.4	通电导体上的电荷是如何分布的呢?	(221)
5.4.5	电源正极的电势可以比负极的电势低吗?	(224)
第六章	稳恒电流的磁场	(226)
§ 6.1	磁场的基本概念	(226)
6.1.1	磁感应强度 B	(226)
6.1.2	磁通量 磁场的环流	(228)
6.1.3	磁感应线	(228)
§ 6.2	稳恒磁场的基本规律	(229)
6.2.1	磁场的叠加原理	(229)
6.2.2	毕奥—萨伐尔—拉普拉斯定律	(230)
6.2.3	B 的高斯定理 安培环流定理	(232)
6.2.4	洛仑兹力 带电粒子在均匀磁场中的运动	(235)
6.2.5	霍尔效应	(236)

6.2.6	安培力	(238)
6.2.7	均匀磁场对平面载流线圈的作用	(238)
6.2.8	小电流圈在外磁场中的能量	(240)
6.2.9	磁力的功	(241)
§ 6.3	典型例题	(241)
§ 6.4	对若干问题的分析	(257)
6.4.1	磁感应强度 \mathbf{B} 的三种定义方法	(257)
6.4.2	安培环流定理 $\oint_{(L)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \Sigma I(L \text{ 内})$ 对稳恒 电流中一段电流的磁场成立吗?	(259)
6.4.3	$\mathbf{B} = \int \frac{\mu_0 I d\mathbf{l} \times \hat{r}}{4\pi r^2}$ 与 $\oint_{(L)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \Sigma I(L \text{ 内})$ 的比较	(260)
6.4.4	载流导线中的自由电子在磁场中所受的洛仑 兹力是如何传给晶格的?	(261)
6.4.5	任意非平面载流线圈的磁矩及其在外磁场中 所受的力和力矩	(262)
6.4.6	面电流两侧磁场突变的规律	(263)
6.4.7	面电流受力的规律	(265)
6.4.8	安培力公式 $d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$ 与载流导线的运动 是否有关?	(266)
6.4.9	磁力是否满足牛顿第三定律?	(267)
第七章	磁场中的磁介质	(271)
§ 7.1	基本概念	(271)
7.1.1	磁介质磁化的概述	(271)
7.1.2	磁介质磁化的微观机制	(272)
7.1.3	磁介质磁化的宏观描述	(274)
§ 7.2	基本规律	(274)
7.2.1	磁化电流与磁化强度的关系	(274)

7.2.2	M 与 B 的关系	(278)
7.2.3	磁场强度 H	(278)
7.2.4	铁磁质中 B 与 H 的关系——磁滞回线	(281)
7.2.5	稳恒磁场的基本方程	(282)
§ 7.3	典型例题	(283)
§ 7.4	对若干问题的分析	(289)
7.4.1	磁介质内磁化电流密度 j' 的分布规律	(289)
7.4.2	边值关系的剖析	(290)
7.4.3	磁路定律	(294)
7.4.4	磁荷观点	(297)
7.4.5	介质对 H 有影响吗?	(305)
7.4.6	H 与介质无关的充分必要条件	(306)
第八章	电磁感应	(308)
§ 8.1	基本规律	(308)
8.1.1	楞次定律	(308)
8.1.2	法拉第电磁感应定律	(309)
8.1.3	动生电动势	(311)
8.1.4	感生电动势 感生电场	(313)
8.1.5	自感	(315)
8.1.6	互感	(316)
8.1.7	磁能	(317)
§ 8.2	求解电磁感应问题的方法	(322)
8.2.1	求解动生电动势的方法	(322)
8.2.2	求解感生电动势的方法	(325)
8.2.3	求解自感系数的方法	(330)
8.2.4	求解互感系数的方法	(332)
§ 8.3	典型例题	(336)
§ 8.4	对若干问题的分析	(352)
8.4.1	螺线管的自感系数等于各匝的自感系数之	

和吗?	(352)
8.4.2 二线圈串联后的自感系数是多大?	(353)
8.4.3 二电路的耦合系数	(355)
8.4.4 发电机中能量转化过程的剖析	(356)
8.4.5 小载流线圈的两种磁能	(358)
8.4.6 一个叠解的自感系数 $L = \frac{\mu_1}{8\pi} + \frac{\mu_2}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}$...	(361)
第九章 电磁场	(366)
§ 9.1 麦克斯韦方程组	(366)
9.1.1 真空中的位移电流	(366)
9.1.2 有介质时的位移电流	(370)
9.1.3 麦克斯韦方程组的积分形式	(371)
9.1.4 麦克斯韦方程组的微分形式	(374)
§ 9.2 电磁波	(375)
9.2.1 平面电磁波	(376)
9.2.2 电磁波的能量密度 坡印亭矢量 电磁波的 动量密度 简谐电磁波的强度	(381)
§ 9.3 电磁场的相对性	(383)
9.3.1 磁场是电场运动的相对论效应	(387)
9.3.2 电场是磁场运动的相对论效应	(391)
9.3.3 电磁场的相对论变换	(398)
§ 9.4 典型例题	(403)
§ 9.5 对若干问题的分析	(411)
9.5.1 匀速运动的点电荷的电磁场	(411)
9.5.2 点电荷之间的相互作用力	(417)
9.5.3 四种电流的特点	(423)
9.5.4 不闭合的电流激发的磁场虽有环流但不遵从 安培环流定理	(424)
9.5.5 将电场分为电荷的电场和感生电场两部分是	

一种思辨的方法 (426)

9.5.6 导出“电磁场的相对论变换”的另一种方法 (427)

附录一 \mathbf{D} 与介质无关的充分必要条件 (432)

附录二 \mathbf{H} 与介质无关的充分必要条件 (436)

附录三 关于 $\overline{t^2} = 2\tau^2$ 的推导 (438)

未立专题的若干问题

△某一点上的 \mathbf{E} 与 U 有联系吗? (见 1.2.4)

△有介质时公式 “ $\oiint_{(S)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} [Q_0(S \text{ 内}) + Q'(S \text{ 内})]$ ”

中为何用 ϵ_0 而不用 ϵ 呢? (见 3.1.1)

△ $\oint_{(L)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ 恒等于零, $\oint_{(L)} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{l}$ 也恒等于零吗? (见 3.4.3)

△有介质时公式 “ $\oint_{(L)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 [\Sigma I_0(L \text{ 内}) + \Sigma I'(L \text{ 内})]$ ”

中为何用 μ_0 而不用 μ 呢? (见 7.1.1)

△“ $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ ”对铁磁质成立吗? (见 7.2.4)

△ $\oiint_{(S)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$ 恒等于零, $\oiint_{(S)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S}$ 也恒等于零吗? (见 7.4.2)

△磁铁有裂缝时其磁场为什么要削弱? (见 7.4.3)

△互感系数 M 可以为负吗? (见 8.2.4)

△感应电动势与参考系有关吗? (见 § 9.4 的例 5)

△库仑定律满足相对性原理吗? (见 9.5.2)

△电荷之间的“相互作用力”遵从牛顿第三定律吗? (见 9.5.2)

第一章 真空中的静电场

相对于某一惯性参照系静止的电荷所激发的电场，叫静电场。静电场是不随时间变化的，即它是稳定的。

§ 1.1 静电场的基本概念

1.1.1 点电荷 面电荷 线电荷

任何电荷都是带电体，如电子和质子也是有体积的，但在某些情况下忽略电荷的体积，更便于研究电磁场的规律。

点电荷 带有电量 Q 的物体，在仅研究远大于其线度处的电场时，便可忽略它的大小，而视为一个几何点，这就是点电荷 Q 。在研究带电体近处的电场时，就不能把它视为点电荷了，这时可把带电体分成很多体积为 $d\tau$ 的小块，如图 1.1，每一小块可视为点电荷 dq 。

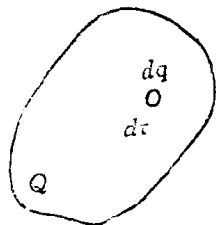


图 1.1

电荷的体密度 ρ 的定义为 $\rho = \frac{dq}{d\tau}$ ，这样就有 $dq = \rho d\tau$ 。

点电荷的地位与力学中质点的地位相当。在力学中，没有质点的概念就无法形成力学的理论，同样在电磁学中，没有点电荷的概念就无法形成电磁学的理论。

面电荷 实际的带电面都是有厚度 d 的一个薄层，如图