普通物理学专题研究

（下）

黄仁华　编著

广西师范大学出版社

普通物理学专题研究

（下）

黄仁华　　编著

广西师范大学出版社

(桂)新登字 04 号

普通物理学专题研究

(下)

黄仁华　编著

责任编辑:唐丹宁　　　　封面设计:吕毅林

广西师范大学出版社出版发行　　　　邮政编码:541001

(广西桂林市中华路 36 号)

桂林漓江印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32　　印张:5.25　　字数:127 千字

1994 年 8 月第一版　　1994 年 8 月第一次印刷

印数:0001—1000 册

ISBN 7-5633-1887-9/G・1507

定价:4.00 元

内 容 提 要

本书系作者根据其在广西师范大学物理系讲授“普通物理学专题研究”所用讲义基础上修订而成.

本书选取一般电磁学、基础光学教材中尚未充分展开的一些专题进行较为深入的分析，对初学者普遍存在的疑难问题加以讨论，并对其中一些问题的解决加以扩充.

本书可作为大学“电磁学”、“基础光学”课的教学参考书，也可供广大中学物理教师和理工科大学生阅读和参考.

序

《普通物理学专题研究》(下)一书,是作者在多年教学经验总结与教学实践基础上编著的教学参考资料,它与秦继民、萧化两同志编著的《普通物理学专题研究》(上)组成了姐妹篇.

普通物理学是大学物理专业的一门主要基础课,也是工科、农科、医科及其它相关专业的基础课.正确理解、掌握物理概念和规律是物理教与学的关键,然而,这又是教师与学生深感困惑的问题之一.长期以来,坚守在物理教学第一线的不少同志,都在为解决好这些问题作出艰苦的探索.本书的作者,通过长期的教学实践,积累了丰富的教学经验,尤其对普通物理电磁学和光学两部分的疑难问题作了认真的探讨,并多次在本、专科生和研究生中讲述了自己的见解,在这些坚实的教学基础上,终于编写出版了这本书.本书的出版,的确为广大普通物理教师和学习普通物理的学生提供了一本颇有价值的参考资料.

本书收入普通物理电磁学和光学方面的问题二十一讲，它们在提高对物理概念的理解，深 化对物理概念和物理规律的领会和应用，加强本课程各分支之间的横向联系，以及提高教学中的实践操作水平等方面起到较好的作用，它们不仅对拓宽学生的视野，激发学习兴趣，指导与改善学习方法有积极意义，还为教师的教学提供了一本教学参考材料.

但愿此书的出版发行，能对从事普通物理学教学的教师和学习普通物理学的同学有殷实的益处.

张振球

1994 年 6 月

目　录

电磁学篇

光学篇

电磁学篇

绪　　言

电磁学的基本思想是场. 由近距作用的基本思想到法拉第的场的概念，麦克斯韦关于场的进一步发展，形成电磁场方程组. 在研究场的方法上，是从场的“源”和“旋”的基本特性出发，进而研究电磁场的物质性.

电磁学的基本内容是：三个实验定律和两个基本假设，这就是库仑定律、毕奥-萨伐尔定律和法拉第定律，感应电场和位移电流，进而得到电磁场方程组，电磁波的存在及其应用. 电磁学的基本框架见下页表.

表中的式(1)、(2)、(3)、(4)为电磁场麦克斯韦方程组的积分形式，式(1′)、(2′)、(3′)、(4′)为电磁场麦克斯韦方程组的微分形式.

一般的经典电磁学包含两个方面的内容：一是电磁场基本理论；二是电路理论. 而电路理论的基础是场方程，因此原则上可以由场方程出发来解决电路问题. 尽管如此，人们常常从场的基本理

实验定律	真空中电磁场	介质中电磁场	时变电磁场
库仑定律 $\boldsymbol{F}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q_1\cdot q_2}{r^2}\hat{\boldsymbol{r}}$	$\oint\!\!\oint_S \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{S}=\frac{1}{\varepsilon_0}\sum q$(有源场)	$\oint\!\!\oint_S \boldsymbol{D}\cdot d\boldsymbol{S}=\sum q_0$	$\oint\!\!\oint_S \boldsymbol{D}\cdot d\boldsymbol{S}=\sum q_0$ (1)
	$\nabla\cdot\boldsymbol{E}=\frac{1}{\varepsilon_0}\rho$(有散场)	$\nabla\cdot\boldsymbol{D}=\rho_0$	$\nabla\cdot\boldsymbol{D}=\rho_0$ (1′)
定义 $\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{F}}{q_0}$	$\oint \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{l}=0$(有位场)	$\oint_L \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{l}=0$	$\oint_L \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{l}=-\oint\!\!\oint_S \frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}\cdot d\boldsymbol{S}$ (2)
	$\nabla\times\boldsymbol{E}=0$(无旋场)	$\nabla\times\boldsymbol{E}=0$	$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}$ (2′)
	$U_a=\int_a^{\infty}\boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{l}$		
毕奥-萨伐尔定律	$\oint\!\!\oint_S \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{S}=0$(无源场)	$\oint\!\!\oint_S \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{S}=0$	$\oint\!\!\oint_S \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{S}=0$ (3)
	$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0$(无散场)	$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0$	$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0$ (3′)
$d\boldsymbol{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\boldsymbol{l}\times\hat{\boldsymbol{r}}}{r^2}$	$\oint_L \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{l}=\mu_0\sum I_0$(无位场)	$\oint_L \boldsymbol{H}\cdot d\boldsymbol{l}=\sum I_0$	$\oint_L H\cdot d\boldsymbol{l}=\sum I_0+\iint_S \frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}\cdot d\boldsymbol{S}$ (4)
	$\nabla\times\boldsymbol{B}=\mu_0\boldsymbol{j}$(有旋场)	$\nabla\times\boldsymbol{H}=\boldsymbol{j}$	$\nabla\times\boldsymbol{H}=\boldsymbol{j}+\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}$ (4′)
			$I_d=\iint_S \frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}\cdot d\boldsymbol{S}$(位移电流)
法拉第定律	$\mathscr{E}=-\frac{d\Phi}{dt}=-\frac{d}{dt}\iint \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{S}$(涡旋电场)		

论出发，根据电路的不同结构，总结出了一套完整的处理问题的方法，使得对实际中的电路问题的计算大大简化.因此形成电磁学中的一个独立分支——交直流电路的基本规律.

为了进一步对电磁场中的问题加深理解，将以下列的专题加以探讨.

第一讲　电力线的性质与高斯定理的逻辑关系

静电场的形象描述可用电力线或等势面，两者是相互紧密联系的．电力线有许多性质，其主要的特性是电力线始于正电荷终于负电荷，在无电荷处不中断，这是高斯定理的逻辑产物．然而对电力线的教学处理中有两种讲法，通过对比看哪种讲法逻辑上是正确的．

第一种讲法：先讲电力线，再讲电通量，最后讲高斯定理．

1．电力线

（1）定义：电场中的一些曲线，曲线上每一点的切线方向与该点的场强方向一致，这样的曲线叫做电力线．但由一点画出的电力线只能表示 $\boldsymbol{E}$ 的方向，要使它能表示 $\boldsymbol{E}$ 的大小还必须对它的画法有一个附加规定．

（2）附加规定：电力线的密度等于场强的大小．

（3）电力线的性质：电力线发自正电荷，终于负电荷，在无电荷处不中断．怎样证明这一观点呢？如果仅仅根据电力线的定义和它的附加规定是不可能证明这一性质对一般的静电场是普遍正确的．

2．电通量

（1）定义：一个面的电通量就是穿过这个面的电力线数．其表达式为

$$\mathrm{d}\Phi=\boldsymbol{E}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}\quad 或\quad \Phi=\oint\!\!\!\oint_S \boldsymbol{E}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

（2）高斯定理：通过任意一闭合面的电通量，等于该面所包围的电荷的 4π 倍（所用单位为绝对静电制，若用国际单位制则为该面所包围的电荷的 $1/\varepsilon_0$ 倍）. 在福里斯著的《普通物理学》中对此定理有两种证法. 一种是用电力线的性质，即由每一个点电荷作 $4\pi q$ 条对称配置的电力线（绝对静电制）. 这里有逻辑上的漏洞，因为电力线的主要性质恰恰是高斯定理的逻辑产物，这就造成了因果倒置. 另一种，在许多有关电磁学书中（如程守洙，江之永. 普通物理学，第二册. 第三版. 北京：人民教育出版社，1980. 33～35.）是采用立体角的方法证明高斯定理. 它的优点是不要用到电力线的性质. 因此，这种证明在逻辑上是合理的. 也只有此种证法，才可认为第一种讲法在大体上可以说得过去.

第二种讲法：先讲电通量，然后讲高斯定理，最后讲电力线，在逻辑顺序上是合理的.

1. 电通量

从流体力学中流量的概念引伸而得，是描述电场中任一曲面的性质的量. 面元的电通量等于面元矢量 $\mathrm{d}\boldsymbol{S}$ 与面元所在点处的场强 $\boldsymbol{E}$ 的点积. 即

$$\mathrm{d}\Phi=\boldsymbol{E}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S} \quad 或 \quad \Phi=\oiint_S \boldsymbol{E}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

2. 高斯定理

采用立体角方法推导出来. 以 q（点电荷）为顶点作一任意形状的小锥体在 S_1 及 S 上截出面元 $\mathrm{d}S_1$ 及 $\mathrm{d}S$. $\mathrm{d}S_1$ 的电通量 $\mathrm{d}\Phi_1=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r_1^2}\mathrm{d}S_1$，$\mathrm{d}S$ 的电通量 $\mathrm{d}\Phi=\boldsymbol{E}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q}{r_2^2}\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\boldsymbol{n}\mathrm{d}S$. $\mathrm{d}S$ 上的电场大小近似为 P 点的电场，即用 $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r_2^2}$ 表示，而 $\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\boldsymbol{n}=\cos\theta$，故 $\mathrm{d}\Phi=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r_2^2}\mathrm{d}S\cos\theta$，由图 1-1 可看出 $\mathrm{d}S\cos\theta=\mathrm{d}S_2$，所以有 $\mathrm{d}\Phi=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r_2^2}\mathrm{d}S_2$. 由立体几何得知 $\mathrm{d}S_2/\mathrm{d}S_1=r_2^2/r_1^2$，故有 $\mathrm{d}\Phi=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\mathrm{d}S_1}{r_1^2}=$

$d\Phi_1$，即面元 dS 与 dS_1 有相同的电通量，而 S_1 是球面，考虑到 S 面与 S_1 面可由许多锥体分成这样的一对对的面元，即得 S 面的电通量等于 S_1 面的电通量，故有 $\oiint_S \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{S}=\frac{q}{\varepsilon_0}$. 于是得到闭合曲面包围点电荷时的高斯定理.

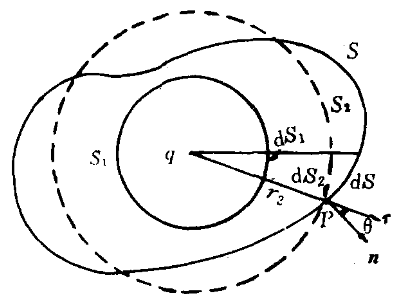

图 1-1

闭合曲面不包围点电荷时高斯定理的证明，可在图 1-2 中的曲面 S_0 上，任意选一闭合曲线 L 将 S_0 分割成 S_1 与 S_2 两部分来加以证明. 以 L 为边界作一不闭合曲面 S_3，使 S_3 与 S_1 组成一闭合曲面且包围点电荷 q，此闭合曲面(S_1+S_3)的电通量为 q/ε_0，而曲面 S_1 和 S_3 的电通量分别为 Φ_1 和 Φ_3，故 $\Phi_{S_1+S_2}=\Phi_1+\Phi_3=q/\varepsilon$. 另一方面 S_2' 与 S_3 也组成一个包围电荷 q 的闭合曲面，记作 $S_2'+S_3$，根据闭合曲面法线向外为正的规定，有 $\Phi_2'=-\Phi_2$，则 $S_2'+S_3$ 闭合曲面与 S_1 和 S_3 闭合曲面的电通量分别为

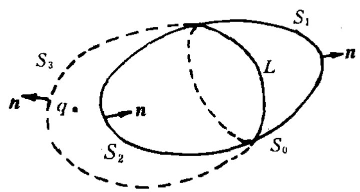

图 1-2

$$\Phi_2'+\Phi_3=q/\varepsilon_0 \tag{1-1}$$

$$\Phi_1+\Phi_3=q/\varepsilon_0 \tag{1-2}$$

式(1-2)－(1-1)得

$$\Phi_1+\Phi_2=0.$$

3. 电力线

(1)定义：电力线是电场中的一些曲线，其曲线上每一点的切

线方向与该点的场强方向一致.

(2)附加规定:电场中穿过任一曲面的电力线条数应该等于该曲面的电通量.

这样的定义和规定与第一种讲法是一致的.因为附加规定中的条件是对某一曲面的电力线条数等于电通量:

$$\text{电力线密度}=\text{穿过 }\Delta S\text{ 的条数}/\Delta S_L=\Delta S\text{ 的磁通量}/\Delta S_L$$
$$=\boldsymbol{E}\cdot\Delta\boldsymbol{S}/\Delta S_L=E.$$

(3)电力线性质:

(a)电力线起于正电荷终于负电荷,在无电荷处不中断;(b)沿着电力线方向电势越来越低.这是电力线的两个最突出的性质.

我们可用高斯定理推导出电力线性质(a).假设某点有电力线发出,我们以这点为中心作一个半径足够小的球面,其内包围有电荷,且电通量为正值.利用 $\boldsymbol{E}$ 的环路定理我们可证明电力线性质(b),即

$$\int_P^\infty \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=\int_{r_P}^\infty \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q}{r^2}\mathrm{d}r=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_P}-\frac{1}{r_\infty}\right)$$

因 r_P 点的电势比 r_∞ 点的电势高,所以 $\boldsymbol{E}$ 的环路定理是电力线性质(b)的直观表述,高斯定理必然导致电力线的性质(a).

为形象地描述电场分布而引入的电力线,它不是在电场中存在的实在的曲线,即在电场中并无这样的实在线,但它可以通过实验间接显示出来.这是在电场中的电介质被极化后,在电场作用下,呈现电场分布的曲线.

第二讲　静电感应问题中的定性和定量解释

静电场中金属导体是普通物理电磁学的重要内容之一，它的解释可以采用定性和定量两种方法．定性讨论，形象、直观，并能得到肯定而又满意的回答．定量讨论是对静电感应现象的若干问题，在定性的简要说明后加以定量讨论，使之深入理解．

一、静电场中导体问题的电力线讨论

借助于电力线的概念和性质（即电力线发自正电荷终于负电荷；电力线方向指向电势降低方向等），通过下面两个实例，对处于静电场中导体静电性质进行讨论．

例 1　将一个带正电的导体 A，移近一个不带电的绝缘导体 B 时，导体 B 的电势是升高还是降低？

当带电体 A 未移近中性导体时，导体 B 的周围无电力线，故其电势 $U_B=U_\infty=0$．当导体 A 移近中性导体 B 时，由于静电感应，在导体 B 的两端分别带上等量异号的感应电荷，如图 2-1 所示．静电平衡时，导体 B 为一等势体，故导体 B 上的正电荷发出的电力线不能终止于自身的负电荷（电力线上各点

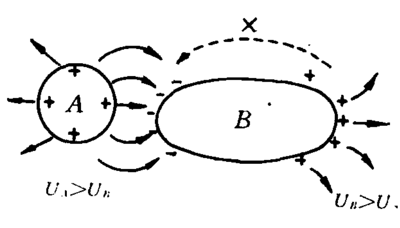

图 2-1

的电势沿着电力线的方向不断减小，而导体 B 是一等势体)，只能终止于无穷远，故 $U_B>U_{\infty}=0$. 因此，由于带正电荷的导体 A 的移近，使导体 B 的电势升高，即由 $U_B=0$ 变为 $U_B>0$. 反之，若由带负电荷导体 A 移近中性导体 B 时，B 的电势降低.

进一步分析得知，带正电荷导体 A 移近中性导体 B 时，导体 A 的电势降低；导体 B 上的感应电荷(近 A 导体一端)q' 小于导体 A 上的电荷量 q，即 $|q'|<q$.

例 2 金属球壳 B 带正电荷，壳内金属小球 A 接地，小球 A 是否带电？带何种电荷？

分四种情况进行讨论：

(1)设 B 球外表面有正电荷，A 球不带电，如图 2-2. 因 B 带正电则 B 有电力线从 B 球外壳伸向无限远，即有 $U_B>U_{\infty}=U_{地}$；又因 A 无电荷且接地，A、B 间无电力线，故 A、B 等电势，即 $U_A=U_B=U_{地}$. 这样前后出现矛盾，所以这种情况不成立.

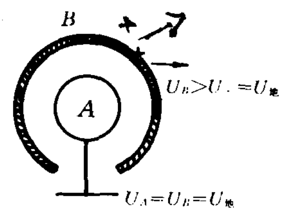

图 2-2

(2)设 B 的外表面有正电荷，内表面有负电荷，如图 2-3 所示. 这样 B 球外表面就有电力线伸向无限远处，可得 $U_B>U_{\infty}=U_{地}$，又由于假设 B 的内表面有负电荷，就有电力线从 A 发出终于 B 的内表面，可得 $U_A>U_B>U_{\infty}$，这又与 A 球接地 $U_A=U_{\infty}$ 相矛盾，故这种情况不存在.

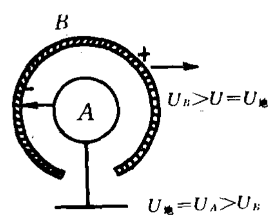

图 2-3

(3)假设导体 B 外壁带负电荷，内壁带正电荷，如图 2-4. 此时