

高等师范专科学校交流讲义

电动力学简明教程

钟采池 钟克武 张东壁

高等师范专科学校交流讲义

电 动 力 学 简 明 教 程

钟采池 钟克武 张东壁

内 容 简 介

本书符合教育部制订的师专教学大纲精神，约用45个课时介绍电动力学基本内容和研究方法，重视讲述基础理论和物理图象、联系与加深普通物理电磁学知识，选配例题较多，数学推导较详细严密。

本书可供高等师范专科学校物理专业理论物理概论课程选作电动力学教材或参考书，也可供中学物理教师、理工科大学学生参考。

第一版序

1981年，我们根据教育部制订的高等师范专科学校教学大纲，参考国内外有关教材，结合教学中的体会，编写了《电动力学简明教程》，在省内外部分师专进行了试用。1982年5月，在南昌召开的江西省物理学会电动力学讨论会上，兄弟院校代表对本书进行了认真讨论，提出了修改意见。同年8月，在连云港召开的全国高等师范院校第四次电动力学讨论会上；以及同年10月，在庐山召开的全国部分高等师范院校电动力学讨论会上，先后广泛征求了意见。我们根据这些意见，将本书修改出版。

本书力图贯彻少而精的原则，约用45个课时介绍电动力学的基本内容。为了便于教学，本书对于基础理论的论述和基本方程、公式的推导，尽可能做到详细严密和条理清楚。

本书共分四章：第一章电磁现象的普遍规律；第二章静电场和稳恒磁场；第三章电磁波的传播和辐射；第四章狭义相对论。在取材安排上力图兼顾下述两方面的内容：既注意到在电磁学基础上对经典电磁理论作系统的总结和提高，又注意到对有关的现代物理基本理论作相应的介绍；既注意到电磁运动普遍规律的抽象概括，又注意到电磁波传播、辐射等实际问题基本理论的阐述。本教程还配备了适量习题，以便通过这些习题的自我练习，使学生加深对基本概念的理解和基本技能的训练。

本书由江西省物理学会组织编写，编写过程中得到宜春师专、九江师专、江西师大南昌分院等校大力支持。上海师范学院阚仲元先生、江西师范大学冯郁先生仔细地审阅了书稿；北京师范大学梁绍荣先生对本书的编写给予支持，提供了宝贵意见；江西农业大学夏忠义同志绘制了全部插图，谨此致谢。

由于我们水平有限，编写时间又较仓促，缺点错误在所难免，欢迎批评指正。

编者 1983. 1.

第 二 版 序

本书第一版在交流中,得到全国许多高等学校的帮助和支持。1983年7月,在杭州召开的全国高等师范院校第五次电动力学讨论会上,我们再一次广泛征求了意见。在兄弟学校的鼓励下,我们根据上海师范学院阚仲元先生、北京师范大学梁绍荣先生、江西师范大学冯郁先生等的宝贵意见,以及使用本书的兄弟学校的宝贵意见,结合我们教学中的体会,将本书修订再版。

本书第二版力图体现如下几点:重视对基础理论、基本概念和物理图象的阐述,以及数学过程的详细推导;重视对普通物理电磁学知识的联系与加深;重视选配一定份量的例题,以便有助于加强对基本概念的理解。总之,力求适应高等师范专科学校教学需要,便于教师教学和学生阅读。

我们衷心感谢兄弟学校的热情支持,欢迎对本书的缺点错误提出批评指正。

编者 1984. 1.

目 录

引 言	(1)
第一章 电磁现象的普遍规律	
§ 1. 1 真空中的电动力学基本方程	(3)
一、真空中的麦克斯韦方程组的积分形式和微分形式	(3)
二、洛仑兹力公式	(14)
三、电荷守恒定律	(15)
§ 1. 2 介质中的电磁场方程	(17)
一、电介质的极化和电场方程	(18)
二、磁介质的磁化和磁场方程	(26)
三、介质中的麦克斯韦方程组和介质的电磁性质方程	(35)
§ 1. 3 电磁场的边值关系	(37)
一、法向分量的边值关系	(38)
二、切向分量的边值关系	(42)
§ 1. 4 电磁场的能量、能流和动量	(47)
一、电磁场和带电系统的能量转化和守恒定律	(47)
二、稳恒电流的电磁场的能量传输	(52)
三、电磁场的动量和动量守恒	(58)
习 题	(59)

第二章 静电场和稳恒磁场

§ 2.1 静电场的标势及其微分方程	(63)
一、电势、电势梯度	(63)
二、静电势的微分方程和边值关系	(67)
§ 2.2 唯一性定理 电象法	(72)
一、唯一性定理	(72)
二、电象法	(77)
§ 2.3 分离变量法	(84)
§ 2.4 稳恒磁场的矢势及其微分方程	(90)
一、矢势	(90)
二、矢势的微分方程和边值关系	(92)
三、求矢势的方法	(96)
§ 2.5 磁偶极子	(105)
习 题	(113)

第三章 电磁波的传播和辐射

§ 3.1 平面单色电磁波在均匀介质中的传播	(116)
一、真空中的电磁波方程	(117)
二、平面电磁波	(119)
三、平面单色电磁波在均匀介质中的传播	(123)
§ 3.2 平面单色电磁波在导体中的传播	(132)
一、均匀导体内电磁场的基本方程	(133)
二、在导体中传播的平面电磁波的性质	(135)
§ 3.3 电磁波在介质界面上的反射和折射	(140)
一、反射定律和折射定律	(140)
二、菲涅耳公式	(143)

§ 3. 4	迅变电磁场的势 推迟势	(148)
一、	用势描述迅变电磁场	(148)
二、	规范变换和规范不变性	(150)
三、	达朗贝方程	(152)
四、	达朗贝方程的解, 推迟势	(156)
§ 3. 5	电偶极辐射	(160)
习 题		(167)

第四章 狭义相对论

§ 4. 1	相对论的基本原理 洛伦兹变换	(171)
一、	经典时空理论和伽里略变换	(171)
二、	狭义相对论基本原理	(175)
三、	洛伦兹变换	(179)
§ 4. 2	相对论的时空理论	(183)
一、	运动尺度缩短	(183)
二、	运动时钟变慢	(185)
三、	同时的相对性	(187)
四、	因果律和最大讯号速度	(188)
五、	速度变换公式	(189)
§ 4. 3	相对论力学	(193)
一、	相对论理论的四维形式	(194)
二、	四维力学矢量与相对论力学方程	(197)
三、	质能公式, 能量与动量的关系	(204)
§ 4. 4	电磁规律的相对论协变性	(206)
一、	四维电流密度、四维势、四维势方程	(207)
二、	麦克斯韦方程组的相对论协变性	(211)
三、	电磁场的变换	(216)

习 题	(224)
本书内容概要	(226)

附 录

附录一 矢量运算公式	(232)
附录二 常用的曲线正交坐标系	(236)
附录三 球坐标中拉普拉斯方程的通解	(238)

引 言

就电磁运动规律来说，麦克斯韦方程组在电磁学中的地位，相当牛顿运动定律在力学中的地位。要认识这一点，如果不学习电动力学，而只依靠普通物理，是难于作到的。因为普通物理中的电磁学，一般是先介绍静电场，引入高斯定理和环路定理；再介绍稳恒磁场，引入磁场中的高斯定理和安培环路定理；然后介绍法拉第电磁感应定律，引入位移电流密度；最后才总结出麦克斯韦方程组。

可见，它不象力学那样，在介绍了牛顿运动定律之后，以此为出发点，研究动量定理和动量守恒律、动量矩定理和动量矩守恒律、动能定理和机械能守恒律，并且应用于各种运动情况，例如直线运动、圆周运动、抛体运动和简谐振动等。

因此，学了普通物理之后，学生对麦克斯韦方程组的意义和作用，远不如对牛顿运动定律认识得那样深刻。对于电磁运动规律的认识就受到限制，对于电磁学中的一些问题也就无法解释。作为一个从事物理教学工作的人来说，应该对电磁运动规律有较深刻的了解，因此，在高等师范专科学校物理专业开设电动力学是完全有必要的。

高等师范专科学校开设电动力学，必须考虑到在培养目标和修业年限方面与四年制本科的差别。那末，应该讲些什么内容，讲到什么程度呢？

师专开设电动力学的目的，主要应该是让学生了解电动

力学的基本内容和研究方法，了解麦克斯韦方程组在电磁学中的地位，以它为基础进一步认识电磁场的基本属性和时空概念，开扩眼界，启发思维，并能初步应用来解决一些简单问题。这样，既有利于指导物理教学，又有利于自学提高，以不断适应四化建设发展的需要。因此，要求在阐述基本理论时，重视讲述物理概念、物理图象和思维方法，培养抽象思维、逻辑推理和数学表达能力，以便能够深入浅出地处理一些问题。

从上述目的要求出发，师专电动力学的基本内容应该包括：从电磁学的实验定律着手，总结出最基本的经典电磁理论；然后从麦氏方程组出发，研究静场和迅变场；最后介绍狭义相对论的基本理论，得出电磁规律的相对论协变性，认识电磁场的统一性与相对性。在讲述电动力学内容时，要重视联系与加深普通物理知识，使学生在进一步理解普通物理的基础上加深对电磁规律的认识。

以上就是我们编写这本教材时的一些想法，就以它作为开场白吧！

第一章 电磁现象的普遍规律

本章我们将把电磁现象的实验定律加以总结，提高为电磁现象的普遍规律，其中麦克斯韦方程组在经典电动力学中的地位，相当于牛顿运动定律在经典力学中的地位。

我们首先讨论真空的情况，接着研究介质中的情况，进而研究介质界面上麦氏方程组的形式；最后由麦氏方程组得出电磁场能量守恒定律的数学表示式，讨论稳恒电流的电磁场的能量传输。

§ 1.1 真空中的电动力学基本方程

一、真空中的麦克斯韦 (Maxwell) 方程组的积分形式和微分形式

我们在电磁学中学习过静电场和稳定电流磁场中的一些基本实验定律，变化的电场与磁场中的一些基本实验现象，以及涡旋电场和位移电流等重要概念。现在让我们回顾一下电磁场的这些基本规律。

1. 静电场的高斯 (Gauss) 定理

设真空中有两个静止的点电荷 q 、 q' ，若 q 到 q' 的距离为 r ，真空介电常数为 ϵ_0 ，则它们之间的相互作用力 $\vec{F}$ 由库仑 (Coulomb) 定律给出：

$$\vec{F} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r} \quad (1.1)$$

库仑定律是静电现象的基本实验定律。从它出发，可以得到静止点电荷 q 在周围空间所激发的电场强度为：

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r} \quad (1.2a)$$

由于电场满足叠加原理，在 P 点，点电荷系激发的电场等于每个电荷所单独激发的电场的矢量和，即

$$\vec{E} = \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^3} \vec{r}_i \quad (1.2b)$$

式中 r_i 为第 i 个电荷 q_i 到 P 点的距离。

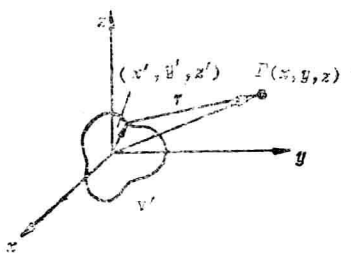


图 1.1

若电荷为连续分布，则电场为

$$\vec{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(x', y', z')}{r^3} \vec{r} dV' \quad (1.2c)$$

式中 (x, y, z) 为 P 点的坐标， (x', y', z') 为体积元 dV' 的坐标， dV' 所含的电荷 $dq = \rho dV'$ ， ρ 为该点的电荷密度， r 为 dV' 到 P 点的距离（如图1.1）。

由库仑定律可以推出静电场的高斯定理。

设闭合曲面 S 包围着点电荷 q ， $d\vec{S}$ 为 S 上的面元，外法线上的单位矢为 $\vec{n}$ ，如图 1.2a，则穿过 $d\vec{S}$ 的电通量为

$$\vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r} \cdot \vec{n} dS = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{dS \cos\theta}{r^2} \quad (1.3a)$$

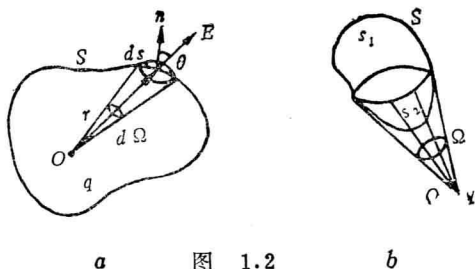


图 1.2

式中 θ 为 $\vec{dS}$ 与 $\vec{r}$ 的夹角, $dS \cos \theta$ 为面元在以 r 为半径的球面上的投影, 而

$$\frac{dS \cos \theta}{r^2} = \frac{\vec{r} \cdot \vec{dS}}{r^3} = d\Omega \quad (1.4)$$

(1.4) 式所示为面元 dS 对 q 所在处 O 点所张的立体角。因而可将 (1.3a) 式写成:

$$\vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} d\Omega \quad (1.3b)$$

则 $\vec{E}$ 对闭合曲面 S 的电通量为

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \oint_S d\Omega = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1.5a)$$

式 (1.5a) 中的 q 为闭合面 S 所包围的电荷。若电荷在 S 面以外, 如图 1.2b 所示, 则从式 (1.4) 可知, 曲面 S_1 和 S_2 对 Q 点所张的立体角等值反号, 使得

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = 0$$

若闭合曲面 S 中包围一组点电荷, 则

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i \quad (1.5b)$$

若电荷为连续分布，则

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV \quad (1.5c)$$

式中 V 是闭合曲面 S 所包围的体积。

式 (1.5b) 和 (1.5c) 是高斯定理的积分形式，它说明：通过任意闭合面的总电通量，等于该面所包围的自由电荷总量的 ϵ_0 分之一。这里要注意的是，不论是式 (1.5b) 右端的 $\sum_i q_i$ ，还是式 (1.5c) 右端的 $\int_V \rho dV$ ，都是闭合面 S 内所包的总电荷量。与面外的电荷无关。

2. 静电场与涡旋电场的环路定理

根据静电场中点电荷的场强公式 (1.2a) 和静电场的叠加原理，可以证明静电场是一个保守力场。即在静电场中，电场力移动单位电荷做功与路径无关。只与始点和终点的位置有关。设单位正电荷在电场中移动的位移为 $d\vec{l}$ ，电场力做功为 $\vec{E} \cdot d\vec{l}$ ，则

$$\int_{L_1}^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{L_2}^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

因而，将单位正电荷沿着闭合回路移动一周时，电场力做功必为零。这就得出了静电场的环路定理：静电场的电场强度的环流等于零：

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (1.6)$$

法拉第 (Faraday) 在研究电磁感应现象时发现，当磁场变化时，置于其中的闭合线圈内有电流通过，闭合线圈中的感应电动势 ϵ 与穿过该线圈的磁通量 Φ 的变化率成正比，即

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1.7a)$$

式中负号表示回路中感生电流的磁场要阻止 Φ 的变化。磁通量 $\Phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$ ，感应电动势是感应电场（亦称涡旋电场） $\vec{E}'$ 沿闭合回路的线积分，因此，式（1.7a）可以写为：

$$\oint_L \vec{E}' \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1.7b)$$

这就是法拉第电磁感应定律，它是电磁感应现象的实验定律，既适用于导体运动而磁场不变的情况，也适用于导体不动而磁场变化的情况。如果回路 L 不变，则式（1.7b）中对 t 的全微商可以写为偏微商，即

$$\oint_L \vec{E}' \cdot d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (1.7c)$$

式（1.7c）的重要意义在于，它揭示了：随时间变化的磁场产生涡旋电场。在实验室范围内，在变化的磁场中沿着任一闭合回路的涡旋电场的线积分等于通过以该闭合回路为周界的曲面内的磁通量对时间的变化率的负值。这里所说的闭合回路，并不一定是指导体。因为涡旋电场的存在与有无导体无关。只不过是有了导体，才有感生电流流通。

当空间中同时存在静电场和涡旋电场时，合电场强度应为静电场与涡旋电场场强之矢量和，所以综合（1.6）式与（1.7c）式，可以得出在任意电场中的环路定理为

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (1.8)$$

（1.8）式中的 $\vec{E}$ 为空间的合电场强度。

3. 磁场中的安培（Ampere）环路定理