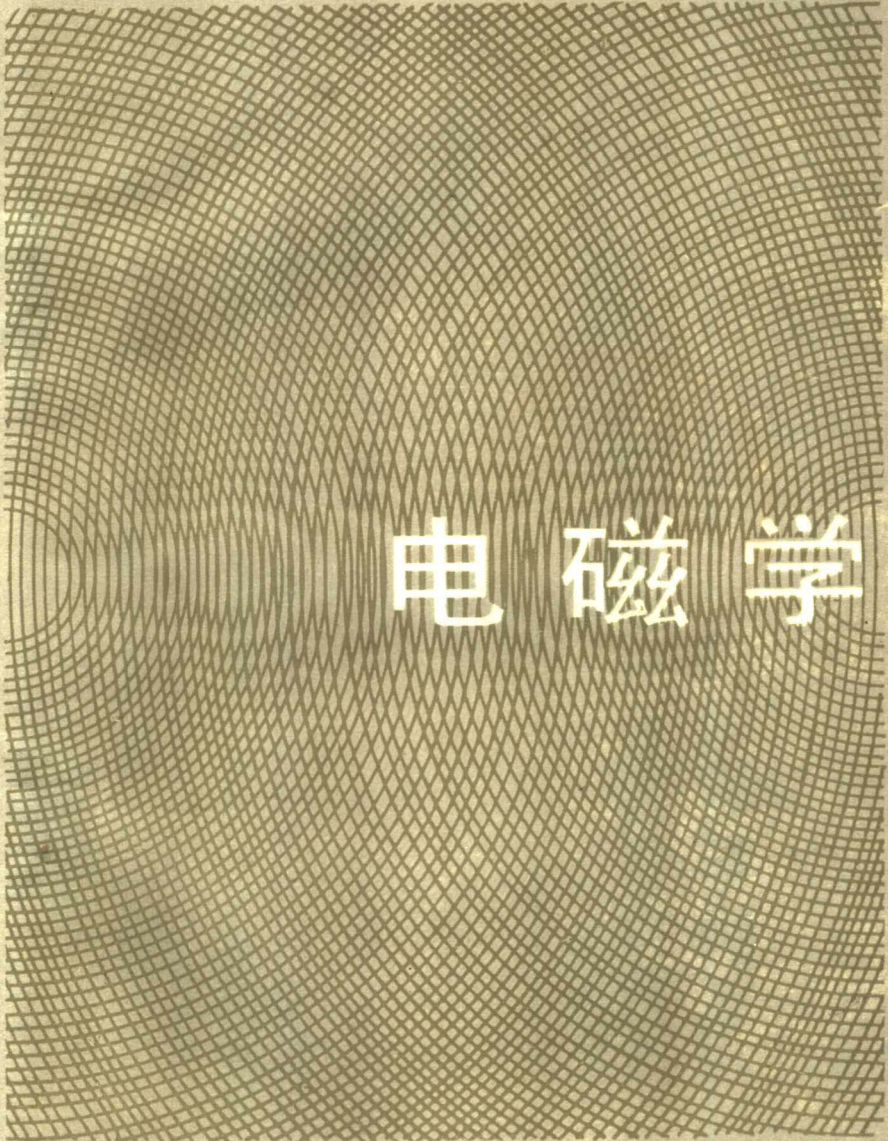


梁昆森 恽瑛 陈宏贲 苏耀中 石开屏 著

大学物理专题选讲



电 磁 学

大学物理专题选讲

电 磁 学

石开屏 张传坤 吴玉喜

江苏教育出版社

大学物理专题选讲

电 磁 学

石开屏 张传坤 吴玉喜

出版：江苏教育出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：江苏徐州印刷厂

开本787×1092毫米 1/32 印张13 字数268,800

1988年1月第1版 1988年1月第1次印刷

印数1—3,550册

ISBN 7—5343—0420—2

G·382 定价：2.70元

责任编辑 朱宝栋

前 言

大学物理学对于理、工、师范的大学生都是一门重要的基础课程。中学物理教师，出于对事业的追求和对工作的责任感，业务上精益求精，也希望深刻理解大学物理，这样就能从较高的立足点，得心应手地驾驭中学物理教材。

大学物理学的教本，国内外已经出版多种，其中不乏优秀之作。但是，作为教本，必须适应广泛的读者群，还受到篇幅和学时等诸多因素的限制，这样，某些问题的论述便不能充分展开，读来有意犹未尽之感。爱钻研的读者此种感觉或许更强些。我们这套书打算挑选教本中未能充分展开的一些专题，加以较深入地讨论，与读者一道享受追求知识的乐趣。有些问题还作了延伸和提高，希望有助于对大学物理学的掌握，也为进一步学习物理学提供一点帮助。

我们也注意对大学物理学中的难点以及初学者易犯错误之处加以讨论，希望有关的论述能够帮助读者克服难点、避免错误。

我们还适当注意到通过具体物理内容及某些物理学分支的发展历史来阐述物理学的思想方法。

我们也适当注意到扩大知识面，这对于一个人的科学素养或许是有意义的。

参加编写的同志大都从事大学物理学的教学工作多年，书中反映了他们的部分教学经验。

这套书分为五个分册，其中力学分册由梁昆淼主持，热学分册由苏耀中主持，电磁学分册由石开屏主持，波动与光学分册由恽瑛、梁昆淼主持，近代物理分册由陈宏赉、恽瑛主持。

本册共二十五个选题，第十三至十六四篇由张传坤编写，第二十、二十一两篇由吴玉喜编写，其余十七篇由石开屏编写。胡在铭曾参加过第二、三两篇初稿的讨论。复旦大学物理系蔡圣善审阅过本书的初稿，并提出了许多宝贵意见。

我们愿意借这套书出版的机会与从事大学物理教学研究的同行相互切磋，并热诚欢迎广大读者的批评指正。

大学物理专题选讲

编 委 会

一九八七年十月

目 录

一、电磁理论纵横谈	1
二、电磁学中的物理模型	21
三、迭加原理的应用	34
四、电磁学中类比方法的应用	54
五、场与图	67
六、函数图象的研究	84
七、“等效方法”的应用	101
八、电磁学公式中的正负号	116
九、狭义相对论与电磁学	126
十、电位零点选取的几个问题	158
十一、库仑定律表述的探讨	169
十二、D仅与自由电荷有关、H仅与传导电流有关的条件	186
十三、稳恒电路中的电荷和电场	200
十四、交流电路中电压的概念	214
十五、洛伦兹力和安培力的关系	225
十六、磁介质的磁化机理	233
十七、磁荷观点与电流观点的B、H	248
十八、感生电动势和动生电动势	269
十九、关于位移电流的讨论	293
二十、稳恒电磁场的能量	309
二十一、电场力与磁场力	329
二十二、解题中的“一题多变”	348
二十三、解题中“一题多解”的方法	366

一、电磁理论纵横谈

本篇从电磁理论的基本概念、基本规律的发现、总体规律的建立过程出发，纵观电磁理论的全貌，从而加深对整个理论体系的理解。同时，通过电磁理论建立过程的分析，说明研究物理学的某些科学思想和科学方法，如认识论的规律、“统一”的思想、“对称”的思想等。文中第三部分介绍电磁理论的两个基本内容——场和路，说明电路理论和电磁场理论之间的关系。

（一）电磁理论建立过程中几个关键性阶段

1. 人们对静电现象和静磁现象早有认识，在我国公元前250年左右，战国的《韩非子·有度篇》中，就有“先王立司南以端朝夕”的记载，“司南”大约就是古人用来识别南、北的器械。到了东汉时代（公元25—220年），王充在《论衡·乱龙篇》中就曾提到“顿牟（琥珀或玳瑁）掇芥，慈石引针”。至于在北宋年间（公元960—1127年），我们祖先利用“慈石召铁”现象制造的指南针，应用于航海事业，更是中华民族的骄傲。

英国的一位医生吉尔伯特是西方第一个研究电现象的，他从摩擦带电现象发现有两种不同的电。荷兰莱顿大学教授马森布洛克为了把电保存下来，于1745年向科学界提供了一种贮存电的有效方法，后人称之为莱顿瓶。就在莱顿瓶发现

的当年，消息传到了北美，富兰克林利用莱顿瓶做了重要的工作，发现了“正电”、“负电”以及电荷守恒定律。有趣的是，一天富兰克林为增加电容量，将几只莱顿瓶连接起来，当实验正在进行时，他的夫人丽达进来观看，不小心碰上了莱顿瓶，突然一阵“放电”响，一团电火，她被击倒在地，经抢救脱险。这意外的事故使富兰克林联想到暴风雨时的闪光和雷声，这是否就是大规模的电现象呢？1752年7月富兰克林冒着生命的危险，在风雨交加之时，同他的儿子一起做了著名的风筝实验，这就是当时震动世界的“费城实验”。他们通过风筝将天上的电引进莱顿瓶，证明了这和实验室里的电是一回事。俄国科学家利赫曼又作了进一步的研究，待雷雨欲来，他赶到实验室，不料一个劈雷，他被击倒了，等他的学生罗蒙诺索夫闻讯赶来时，利赫曼已经为科学事业捐躯了！

2. 大量的实验、观察，为法国工程师库仑的工作奠定了基础。1785年他利用扭秤实验总结出真空中两静止点电荷之间的作用力与其距离平方成反比的规律，建立了库仑定律

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \quad (1.1)$$

式中 r_{12} 是点电荷 q_1 到 q_2 的矢径， F_{12} 是 q_1 对 q_2 的作用力。以库仑定律的建立为标志，电磁理论从现象的观察、实验阶段进入了理论的定量研究阶段。

电场概念的引进，把电荷间作用力的理论分为两部分：一部分是电荷激发电场，一部分是电场对电荷有力作用。从电场强度矢量 E 的定义

$$E = \frac{F}{q}$$

出发，得出点电荷的电场

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \mathbf{r}$$

从而引出点电荷的高斯定理和环路定理

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = q/\epsilon_0$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

(1.2)

(1.3)

实验证明：电场服从迭加原理，即在空间任一点的电场是空间所有电荷在该点产生的电场的矢量和。因此，带电体的电场 $\mathbf{E}$ 为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r}$$

积分遍及所有的带电体。将式(1.2)、(1.3)中的 $\mathbf{E}$ 理解为任意电荷体系的电场，它便是真空中静电场的普遍规律。式(1.2)、(1.3)的微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0 \quad (1.2)'$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (1.3)'$$

在有介质存在的静电场中，介质发生极化，产生极化电荷

$$q' = -\oint \mathbf{P} \cdot d\mathbf{s}$$

$\mathbf{P}$ 是介质的电极化强度矢量。极化电荷 q' 和自由电荷 q 的电场应具有相同的性质，因此式(1.2)、(1.3)中的电荷应理解为总电荷，电场则是总电荷产生的。因此，式(1.3)应保持形式不变，式(1.2)改写为

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{q}{\epsilon_0} + \frac{q'}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0} - \frac{1}{\epsilon_0} \oint \mathbf{P} \cdot d\mathbf{s}$$

令 $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$, 则

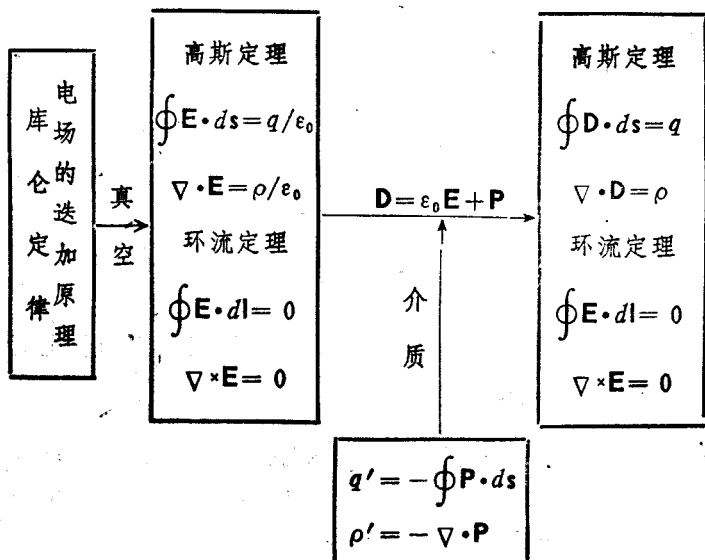
$$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q \quad (1.4)$$

$\mathbf{D}$ 叫做电位移矢量。相应的微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.4)'$$

式(1.4)、(1.4)'中的 q 和 ρ 不再是空间的总电荷,它只表示场中的自由电荷。

总结静电场的规律,可以将其理论的建立过程列表示意如下



3. 意大利的生理学教授伽伐尼和科学家伏打等人发现了电流并制成伏打电堆，使人们从静电的研究进入到研究动电的新阶段。研究稳恒电流的规律及其与其它运动形态的联系和转化（电流的热效应和电流的磁效应）是这一阶段的标志。

实验发现，通有稳恒电流的导线表面有稳恒的净电荷分布，因而导线周围空间的电场和静电场相似。在导线内部电流密度矢量 $\mathbf{j}$ 和导体的性质有关，并正比于导体内的电场强度 $\mathbf{E}$ ：

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}$$

γ 叫做导体的电导率。上式写成积分形式为

$$I = \frac{U}{R}$$

这就是欧姆定律。其中

$$I = \int \mathbf{j} \cdot d\mathbf{s}$$

$$U_a - U_b = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

R 是面积为 S 、长度 $ab = l$ 的一段导线的电阻

$$R = \frac{l}{\gamma S}$$

电流通过电阻，电能会转化成为热能，电功率 P 和电功率密度 p 分别为

$$P = I^2 R$$

$$p = \gamma E^2$$

这就是焦耳定律。欧姆定律和焦耳定律是讨论电流运动规律的基础。

丹麦物理学家奥斯特曾致力于电对磁的影响的研究，在1820年4月的一天晚上，他讲课中来了“灵感”，快要结束时，他毫不犹豫地当场把导线接上电源，发现旁边的小磁针微微地跳动了一下。当时，听众无动于衷，而奥斯特却激动万分。经过反复实验，连续三个月的研究，终于在1820年7月21日奥斯特向科学界宣布了“电流磁效应”的发现。从此，古老的磁学获得了新生，开创了磁学和电学相联系的电磁学。

在奥斯特实验的基础上，法国科学家安培发现了载流导线间以及通电线圈间的吸引和排斥作用。如果设想把载流回路间的相互作用视为无限多个无限小的电流元间的相互作用力之和，则第一个电流元 $I_1 d\mathbf{l}_1$ 对第二个电流元 $I_2 d\mathbf{l}_2$ 的作用力 $d\mathbf{F}_{12}$ 为

$$d\mathbf{F}_{12} = I_2 d\mathbf{l}_2 \times \left[\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 d\mathbf{l}_1 \times \mathbf{r}_{12}}{r_{12}^3} \right] \quad (1.5)$$

式中 $\mathbf{r}_{12}$ 是第一个电流元到第二个电流元的矢径。此式称为安培定律或安培力公式。上式右端的方括号定义为 $I_1 d\mathbf{l}_1$ 在 $\mathbf{r}_{12}$ 处激发的磁感应强度矢量 $d\mathbf{B}$ 。写成通式为

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (1.6)$$

这就是毕奥—沙伐尔定律。

载流导线受到的安培力实际上是作用在导体中大量自由电子上的洛伦兹力的宏观表现。利用安培力公式能够推导出以速度 $\mathbf{v}$ 运动的电荷 q 在磁场 $\mathbf{B}$ 中受到的洛伦兹力公式

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1.7)$$

如果以洛伦兹力为实验基础，可用类似的方法推导出安培力

公式。

在毕奥—沙伐尔定律的基础上，根据磁场的迭加原理，可以求得真空中稳恒电流磁场（又叫静磁场）的规律

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1.8)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (1.9)$$

介质在磁场中会发生磁化，1825年安培提出“磁的分子电流假说”，解释了介质磁化的原因，并求得介质磁化电流强度 I' 和磁化电流密度 $\mathbf{J}'$ 与介质磁化强度矢量 $\mathbf{M}$ 的关系

$$I' = \oint \mathbf{M} \cdot d\mathbf{l}$$

$$\mathbf{J}' = \nabla \times \mathbf{M}$$

磁化电流和传导电流的磁场应有相同的性质，因此，(1.8)式应保持不变，(1.9)式右端的电流应理解为传导电流 I 与磁化电流 I' 之和， $\mathbf{B}$ 则是总电流的磁场。

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I + \mu_0 I' = \mu_0 I + \mu_0 \oint \mathbf{M} \cdot d\mathbf{l}$$

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}, \text{ 则有}$$

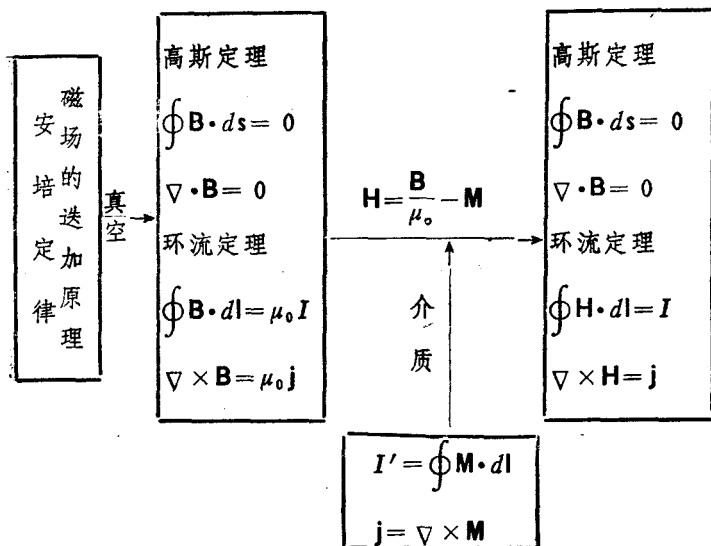
$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (1.10)$$

$\mathbf{H}$ 叫做磁场强度矢量。式(1.8)、(1.10)是静磁场的普遍规律，写成微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.8)'$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1.10)'$$

总结静磁场的规律，可以将其理论的建立过程列表示意如下



4. 奥斯特的发现给十九世纪最伟大的实验物理学家、英国的法拉第以极大的启示,他想:既然电荷运动能产生磁场,那么磁的运动能否产生电呢?经过十年的努力,他终于在1831年发现了电磁感应现象。这标志着电磁理论由静态的研究进到了动态研究的新阶段。众所周知,法拉第电磁感应定律表示为

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt}$$

等式左端的感应电动势为

$$\varepsilon = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

等式右端磁通量的变化率可以分成为两部分

$$\begin{aligned}
 -\frac{d\phi}{dt} &= -\frac{d\phi}{dt} \Big|_{\text{回路不动}} - \frac{d\phi}{dt} \Big|_{\text{磁场不变}} \\
 &= -\oint \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} + \oint (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l}
 \end{aligned}$$

上式第二项与洛伦兹力有关,放在洛伦兹力公式中另作讨论。

其中的第一项为

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.11)$$

相应的微分形式为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.11)'$$

可见,随时间变化的磁场能激发涡旋电场,涡旋电场的中心在磁场交变的区域。可以看出,电场分为两类:一是静止电荷的电场——静电场,二是变化磁场的感应电场——涡旋电场。前者有源无旋,后者无源有旋。将(1.3)、(1.11)式相加,方程的形式保持(1.11)式不变,不过 $\mathbf{E}$ 应理解为总场,(1.4)式中的 $\mathbf{E}$ 也是这样。式(1.4)、(1.4)和(1.11)、(1.11)'便是电场的普遍规律。

既然变化的磁场能够激发电场,那么变化的电场能否激发磁场呢?麦克斯韦在1862年作了大胆地假设,他认为电位移矢量的变化也能激发磁场,就好象传导电流激发的磁场一样。

$$I_D = \int \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.12)$$

$$\mathbf{J}_D = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.12)'$$

可见,形成磁场的电流有:传导电流 $\mathbf{J}$ 、磁化电流 $\mathbf{J}'$ 、位移电流 $\mathbf{J}_D$ 三部分。考虑到位移电流对磁场的贡献,式(1.10)、

(1.10)' 变成

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + I_D = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} + \int \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.13)$$

$$\Delta \cdot \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

静电 $\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{E} = 0$ 静磁 $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}$	电 感 现 象 ↓ ↑ 位 移 电 流 假 说	$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \oint \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$ $\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \int \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$ $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
---	---	--

$$I_D = \int \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$$

$$\mathbf{j}_D = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

麦克斯韦对电磁理论的伟大贡献，一方面是他提出了涡旋电场和位移电流的概念，另一方面他集其大成，于1864年建立了以他的名字命名的麦克斯韦方程组，它是电磁理论的

核心。经典电磁理论的大厦就此落成了！

5. 由库仑定律和安培定律定义了电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 和感应强度矢量 $\mathbf{B}$ ，并导出了这两个矢量场的物理性质；同时还给出了点电荷和电流元分别在电场和磁场中受到的电场力 $\mathbf{F}_e$ 和磁场力 $\mathbf{F}_m$ 。

$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}$$

$$d\mathbf{F}_m = Id\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

点电荷在电磁场中受到的总力统称为洛伦兹力

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

有时把它写成力密度——单位体积带电体所受到的电磁力——的形式

$$\mathbf{f} = \rho\mathbf{E} + \rho\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \rho\mathbf{E} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式连同电荷守恒定律，构成了经典电磁理论的全部内容。

(二) 电磁理论建立过程中的物理思想

1. 电磁理论的建立过程符合认识规律

电磁理论的建立经历了从实践到理论、从简单到复杂，从静止到运动的曲折发展过程。漫长的实践过程积累了大量的感性材料，库仑定律的建立实现了认识的第一次飞跃，运动电荷的磁现象的发现实现了认识的第二次飞跃，法拉第、麦克斯韦对变化电磁场的研究成果则实现了认识的第三次飞跃。每一次认识上的飞跃都是前一次飞跃的发展，都是以大量实验材料为基础的。

理论来源于实践，但并不否定理论的预见性和对实践的指导作用。例如安培提出的分子电流假说、麦克斯韦提出的