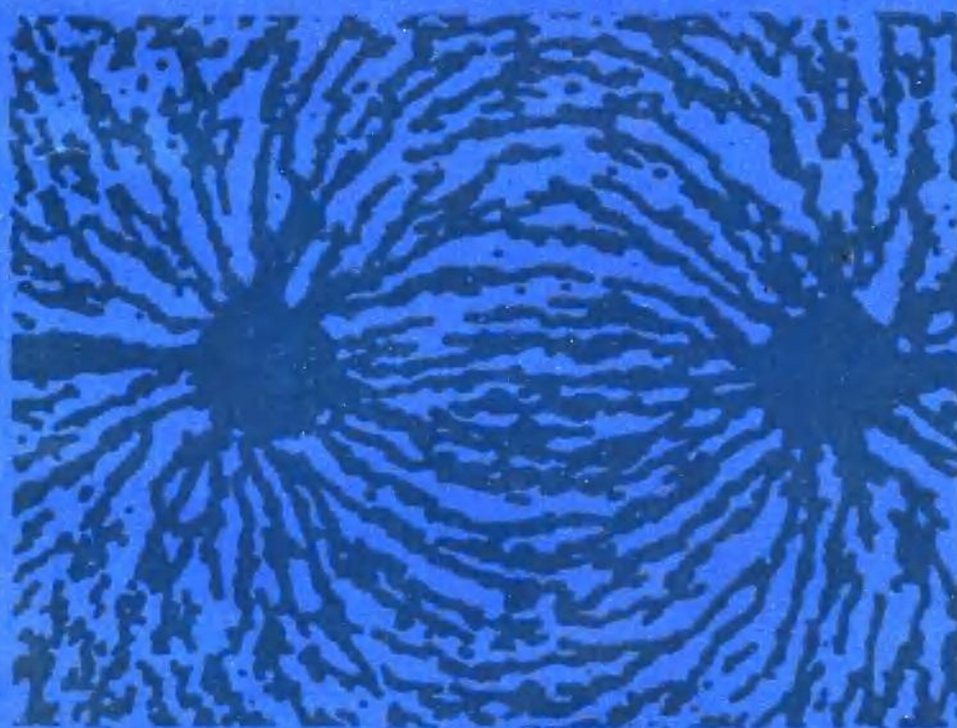


普通物理学教程之三

电磁学

胡友秋 程福臻 刘之景 编

高等教育出版社



0656593

0441-43

H514

普通物理学教程之三

电 磁 学

胡友秋 程福臻 刘之景 编

高等教育出版社

(京)112号

内 容 简 介

本书是中国科学技术大学汪克林教授主编的《普通物理学教程》的第三分册。

该书对经典电磁学的基本概念和基本规律作了较深入细致的阐述,并对若干前沿发展作了简单介绍。书中例题和习题甚多,其中不少选自国内外研究生考题,颇具新意和启发性。

本书可作为高等学校物理专业的教材或教学参考书,亦可供相关专业师生和科技工作者参考。

普通物理学教程之三

电 磁 学

胡友秋 程福臻 刘之景 编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

中国科学院印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 16.25 字数 420 000

1994年5月第1版 1994年5月第1次印刷

印数 0001—3 677

ISBN7-04-004316-5/O·1234

定价 7.45 元

序

中国科学技术大学建校已逾三十年。三十年来在普通物理的教学中，从我们开始到现在的中年教学工作者们一直力图在教学中走出一条自己的路，这套书的产生基本上就是总结了这些年科大在普通物理教学中的经验和概括了科大普通物理的教学现状。

据我所知，从事该书撰写的是一批长期活跃在教学第一线的中年教师。他们一方面教学，一方面进行科研，经过多次的教学实践和多方面的调研后写成了这一套书。在这套书中基本概念和基本方法的引入和阐述具有清晰的物理图象和清楚的物理思想。书中尽力把科学前沿的信息传递给同学，以新的观点整理材料并把科研的新成果充实到基础知识中去，注意培养学生的科研能力，并试图兼收并蓄国内外同种教材中的各家之长。总之，这是一套以探索精神撰写的，具有自己特色的普通物理教科书。

多年来在普通物理的教学中就存在如何更新教材使学生既能打好基础，增强能力的训练，又能培养他们的创造性和开拓精神的问题。这项工作难度颇大，不过我们要著书育人，要在教育事业上作一点有益的事，总应知难而进，锲而不舍，才能得到一步一步的进展。今天，这套书与读者见面了，我对科大三十年来的普通物理教学取得的这一成果感到由衷的高兴，盼望今后更多的好教材层出不穷。

嚴清慈

致 谢

首先应该感谢尤峻汉教授，他认真、仔细地审阅了本书初稿的第一至六章及第二稿的第一至三章，提出了许多宝贵的建议。我们也应该感谢陈慧余副教授，她耐心、严格地审阅了初稿的第七至十二章及第二稿的第四至六章，提出了有价值的批评。戚伯云副教授和朱士尧副教授分别审阅了第二稿的第七至九章和第十至十二章，提出了不少有益的意见。在此基础上，我们作了许多修改，产生了第三稿。本书的底稿先后在中国科学技术大学的几个系（包括物理类和非物理类系）的大课中试用过，得到同学们的热情支持和鼓励，也发现了一些需要澄清和补充的地方。此外，中国科学技术大学基础物理中心的同事的关心和经常的鼓励也是我们完成此书的重要动力，在此一并表示感谢。

我们特别感谢北京大学的陈秉乾教授，他百忙抽闲，全面、细致、认真地审阅了第三稿，提出了许多富有启发性的意见和建议，也作了不少中肯的批评，使我们能够对全稿作进一步的修改和补充。

在编写本书过程中，我们得到高等教育出版社物理编辑室的同志自始至终的支持和帮助，在此谨致衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中恐有不少谬误和疏漏之处，诚望广大读者斧正。

编者

1992年于合肥

目 录

绪论.....	1
第一章 真空中的静电场	12
§ 1-1 电荷守恒.....	12
§ 1-2 库仑定律.....	14
§ 1-3 叠加原理.....	18
§ 1-4 电场强度.....	20
§ 1-5 高斯定理.....	25
§ 1-6 环路定理.....	36
§ 1-7 电势.....	40
习题	51
第二章 静电场和物质的相互作用.....	57
§ 2-1 物质的电性质.....	57
§ 2-2 静电场中的导体	62
§ 2-3 电容和电容器.....	71
§ 2-4 电介质.....	76
§ 2-5 极化强度矢量 $\mathbf{P}$	79
§ 2-6 电介质中静电场的基本定理.....	88
§ 2-7 边值关系和唯一性定理.....	93
§ 2-8 电像法.....	103
习题	111
第三章 静电能	118
§ 3-1 真空中点电荷间的相互作用能.....	118
§ 3-2 连续电荷分布的静电能.....	122
§ 3-3 电荷体系在外电场中的静电能.....	130
§ 3-4 电场的能量和能量密度.....	133
§ 3-5 非线性介质及电滞损耗.....	137
§ 3-6 利用静电能求静电力	139

习题	151
第四章 稳恒电流	156
§ 4-1 稳恒条件	156
§ 4-2 欧姆定律	161
§ 4-3 电源及电动势	168
§ 4-4 基尔霍夫定律	177
§ 4-5 稳恒电流和静电场的综合求解	181
习题	193
第五章 真空中的静磁场	200
§ 5-1 磁场	200
§ 5-2 毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律	205
§ 5-3 安培定律	215
§ 5-4 磁场的高斯定理和安培环路定理	220
习题	229
第六章 磁场和物质的相互作用	234
§ 6-1 磁场对电流的作用	234
§ 6-2 磁介质	238
§ 6-3 边值关系和唯一性定理	252
§ 6-4 磁荷法	260
§ 6-5 磁像法	269
§ 6-6 磁路定理	275
§ 6-7 带电粒子在磁场中的运动	280
习题	289
第七章 电磁感应	297
§ 7-1 电磁感应定律	297
§ 7-2 动生电动势和感生电动势	305
§ 7-3 互感和自感	314
§ 7-4 似稳电路和暂态过程	324
习题	335
第八章 磁能	341
§ 8-1 一个载流线圈的磁能	341
§ 8-2 N 个载流线圈系统的磁能	342

§ 8-3	载流线圈在外磁场中的磁能	344
§ 8-4	磁场的能量和磁能密度	345
§ 8-5	非线性介质及磁滞损耗	348
§ 8-6	利用磁能求磁力	351
习题		357
第九章	交流电路	360
§ 9-1	基本概念和描述方法	360
§ 9-2	交流电路的复数解法	369
§ 9-3	交流电的功率	375
§ 9-4	交流电路分析举例	378
习题		385
第十章	麦克斯韦电磁理论	390
§ 10-1	位移电流	390
§ 10-2	麦克斯韦方程组	395
§ 10-3	平面电磁波	397
§ 10-4	电磁场的能量、动量和角动量	405
习题		412
第十一章	特殊介质中的电磁场	416
§ 11-1	概述	416
§ 11-2	缓慢运动介质	417
§ 11-3	超导介质的电磁特性	430
§ 11-4	等离子体中的电磁波	442
习题		461
第十二章	单位制和量纲	464
§ 12-1	单位制	464
§ 12-2	量纲	466
§ 12-3	国际单位制和高斯单位制	467
§ 12-4	单位制间的公式变换和单位换算	469
习题		475
附录一	希腊字母表	477
附录二	科学家中英文姓名对照表	478
附录三	物理常数	481

附录四 物理量的符号与单位 483

附录五 矢量分析中的常用公式 485

习题答案 491

绪 论

一、电磁学的重要性

正如从高中物理的学习过程中所了解到的，电磁学的主要内容是研究电荷、电流产生电场、磁场的规律，电场和磁场的相互联系，以及电磁场与电荷、电流和各种物质的相互作用。简言之，电磁学是研究电磁相互作用规律的基础学科。在自然界中，迄今已发现有四种基本相互作用，即四种基本的力：万有引力（引力相互作用）、电磁力（电磁相互作用）、强力（强相互作用）和弱力（弱相互作用）。万有引力存在于一切物体之间，电磁力存在于带电物体或载流导体之间，强力存在于质子、中子、介子、重子等基本粒子之间，弱力主要存在于中子、质子、电子、中微子之间。从作用范围上看，强力和弱力在 10^{-13} 到 10^{-12} cm 的距离范围内很重要，这是原子核的尺度。电磁力在原子尺度以及分子尺度，即 10^{-8} 到 10^{-7} cm 的距离范围内特别重要。引力在大天体尺度上起着重要的作用，譬如地球、太阳、银河系以及现今能观测到的宇宙。

电磁相互作用是研究得最为广泛的一种相互作用。首先它在决定原子和分子的结构方面起着关键性的作用，因而在很大程度上决定着各种物质的物理和化学性质。其次，电磁相互作用的规律是其它许多学科，如电工电子学、等离子体物理学、磁流体力学、电化学、量子电动力学……的基础。此外，电磁学的知识在科研和生产中有着极为广泛的应用，从工业到农业，从日常生活到国防现代化无不涉及到电磁学的原理。综上所述，掌握这门学科的必要性是不言而喻的了。

二、电磁学的发展简史

一门学科的发展史是人类在该领域长期耕耘、艰苦奋斗的历史。在这一艰难、曲折的探索过程中，出现了许多杰出的科学家，他们是无数探索者的代表，为科学的发展作出了不可磨灭的贡献。一门学科的发展史常常与这些科学家的贡献息息相关。当然，在提到这些伟大探索者所取得的成就时，除了称颂他们本人的杰出智慧和卓越贡献之外，必须看到他们都是“站在巨人的肩上”才达到当时科学顶峰的。科学事业既需要继承，也需要发展，这是我们学习科学史所得到的深刻启迪。

远在我国古代和古希腊，人类从生产实践和日常生活中便了解到电和磁的一些现象和知识。我国春秋时代的《管子·地数》

（公元前六百多年）中写到“上有慈石者，其下有铜金。”这是我国最早关于磁石的记载。东汉王充的《论衡·是应》（公元82年左右）中有“司南之杓，投之于地，其柢指南”，表明已出现了指南针的前身。在《论衡·乱龙》中载有“顿牟缀芥，磁石引针”，这里王充把经过摩擦的顿牟（玳瑁）能吸引细小物体的电现象和磁吸引相提并论，在当时是很不容易的。东西方文明史的发展往往有不少相似之处。早在公元前约585年，古希腊哲学家泰勒斯（Thales）就记载了用木头摩擦过的琥珀能够吸引草屑等轻小物体，以及天然磁石吸引铁的现象。在随后漫长的一千多年间，由于人类对电磁现象缺乏系统的研究，只是靠零碎的自然知识的积累，所以整个电磁学的发展十分缓慢。

十三世纪前后，欧洲出现了历史上有名的学术复兴，通过实验研究自然规律已蔚然成风。当时英国著名的学者培根（Roger Bacon）提出：“应当靠实验来弄懂自然科学”。在他的影响下，马里古特（Pierre de Maricourt，英国人）做了不少磁学实验，并于1269年前后写了一本小册子，描述了他的发现。马里古特发现了磁石有两极，他把这两极分别叫做N极和S极。通过实验他

证实了异性磁极相吸；同性磁极相斥；一根磁针断为两半时，每一半又各自成为一根独立的小磁针。这股实验风气，立即遭到教廷中那些偏执狂的僧侣的反对，很快被压了下去，电和磁的研究又进入了停顿期。

十六世纪，由于工、商业及航海的发展，社会的需要再次推动了自然科学的研究。第一个从实验和理论上对电和磁作了较为系统研究的人是英国伊利莎白女王的御医吉尔伯特(William Gilbert, 1544—1603)，他发现了电和磁有一些不同的性质。如磁性是磁体本身固有的一种性质，磁体有两极能够指南北；而电性质是物质通过摩擦所激发的，没有指示南北的性质。他提出了解释电现象的理论，认为物质在摩擦激发下向它周围释放出一种类似大气的媒质，该媒质起着传递电的作用。吉尔伯特制作了第一只实验用的验电器，这是一根中心固定在支座上的极细金属棒，可以自由转动。当摩擦后的带电体靠近它时，金属棒会被吸引而转向带电体。随后在1660年，德国工程师盖利克(Otto von Guericke, 1602—1686)发明了第一台象小足球大的转动硫磺球的摩擦起电机，使较大量电荷的获得成为可能。1729年，英国的格雷(Stephen Gray, 1670—1736)发现了导体和绝缘体具有不同的导电特性：金属导体可以传递电荷，玻璃、丝绸不导电。这一发现为电荷的输运奠定了基础。1733年，法国的杜费(Charles Francois du Fay, 1698—1739)发现有两种性质完全不同的电荷，带相同电的物体互相排斥，带不同电的物体互相吸引。他把摩擦后玻璃上的电叫“玻璃电”，把摩擦后硬树脂上带的电叫“树脂电”，并提出了二元电液理论。1745年荷兰莱顿的物理学家穆欣布洛克(Pieter van Musschenbroek, 1692—1761)在寻找保存电的办法过程中，发明了莱顿瓶，即电容器的原形，为电荷的贮存提供了有效的手段，也为电的进一步研究提供了条件。紧接着，美国的富兰克林(Benjamin Franklin, 1706—1790)对莱顿瓶的功效进行了深入的分析，并用它作了许多的实验。1747年，

他在杜费的“玻璃电”和“树脂电”的基础上，根据两种电的相消性，提出了正电和负电的概念，认为只存在单元电液，物体缺少电液便带负电，对应着“树脂电”；多余电液便带正电，对应着“玻璃电”，分别用“-”、“+”号表示；而且正、负电可以抵消。尽管富兰克林的单元电液论并不正确，但他引入的正电和负电的规定至今仍被采用，它为定量研究电现象提供了一个基础，具有重大意义。富兰克林认为，摩擦的作用是使电从一物体转移到另一物体，而不是创造电荷；任何一与外界绝缘的体系中，电的总量是不变的。这就是通常所说的电荷守恒原理。

电荷的获得、贮存和传递为定量研究电现象提供了充分的条件。在认识了电荷分为正、负两种，同性相斥异性相吸后，人们很快便转向研究电荷之间相互作用力的定量规律。1750年前后，德国的埃皮诺斯(Franz Ulrich Theoder Aepinus, 1724—1802)发现了两电荷之间的相互作用力随其距离的减小而增大的现象，但是他没有深入研究下去给出定量的规律。1766年底德国科学家普里斯特利(Joseph Priestley, 1733—1804)通过一系列实验证明，带电的空心金属容器内表面上没有电荷，而且对内部空间没有任何电力作用。由此他作了一个猜测，认为电荷之间的作用力与万有引力相似，即与它们之间距离的平方成反比。但是他仅仅停留在猜测阶段。1769年，英国的罗宾逊(John Robinson, 1739—1805)通过作用在一个荷电小球上的电力和重力平衡的实验定出，两个同种电荷之间的排斥力与距离的2.06次方成反比，他进一步猜想正确的应当是平方反比关系。但是他和普里斯特利的工作都没有受到当时科学界的足够重视。直到1785年，法国的库仑(Charles Auguste de Coulomb, 1736—1806)设计了精巧的扭秤实验，才直接测定了两个静止同种点电荷之间的斥力与它们之间距离的平方成反比，与它们的电量乘积成正比。对于异号电荷，用扭秤实验出现了许多困难，后来经过不断探索，库仑用电扭摆实验对吸引力测出了相同的结果。至此，库仑定律得到世界

公认,从而开辟了近代电磁理论研究的新纪元。值得提到的是,在此之前1773年英国科学家卡文迪许(Henry Cavendish, 1731—1810)发现带电导体球壳内表面不存在电荷,而且球壳空腔中任何一点都没有电的作用,继之用数学方法设电荷相互作用力与距离的关系为 $f \propto r^{-2 \pm \delta}$,他得出带电导体球壳内表面的电量 Q (或电势 V)与小量 δ 及几何因素(球壳内外半径)的关系。然后用实验确定 Q (或 V)的上限,他给出 δ 的上限值为0.02,即 $\delta < 0.02$ 。但是他的成果未公开发表,一直到1879年才由英国物理学家麦克斯韦(Jamas Clark Maxwell, 1831—1879)整理、注释出版了这些手稿。

经过多年的研究,1800年春,意大利的伏打(Count Alessandro Volta, 1745—1827)制成了伏打电堆,他在给英国皇家学会的报告中谈到:“用30片、40片、60片、甚至更多的铜片(当然最好是银片),将它们中的每一片与一片锡片(最好是锌片)相间排列,然后充一层水或导电性能比水更好的食盐水、碱水等液层,或填上一层用这些液体浸透的纸皮或皮革等……就能产生相当多的电荷”。当把电堆的两端用金属导线连接起来,便可获得持续的电流。这便是电池的原型。有了稳定的电源,就为人类从研究静电现象过渡到研究动电现象提供了坚实的技术基础。

自吉尔伯特将电现象和磁现象进行对比研究以来,两百多年中,人们一直认为电和磁没有什么关系,尽管1735年英国的哲学会报(*Philosophical Transactions*)上曾刊载过文章,报导了1731年7月的一次大雷雨使某处吃饭用的钢刀叉磁化的事实;1751年富兰克林曾用莱顿瓶放电使缝衣针磁化。但是这些发现没有引起人们的重视。直到50多年后,在德国哲学家康德(Immanuel Kant, 1724—1804)和谢林(Friedrich Schelling)关于自然力统一的哲学思想影响下,丹麦的奥斯特(Hans Christian Oersted, 1777—1804)坚持从实验中寻找电和磁之间的联系,为此作了十多年不懈的努力,才终于在1820年初发现了电流的磁效

应：当导线通过电流时，会使其近旁的磁针向与导线垂直的方向偏转。奥斯特的发现是电磁学发展史上的又一里程碑，轰动了整个欧洲的科学界，其中反应最为敏捷的首推法国的物理学界。法国的毕奥(Jean Baptiste Biot, 1774—1862)和萨伐尔(Felix Savart, 1791—1841)于同年10月30日发表了论文，阐述了载流长直导线对磁极的作用力反比于距离的实验结果。为了进一步掌握电流元和磁极位置矢之间夹角与作用力的关系，他们将长直导线从中间弯折成一定角度，由实验总结出了弯折载流导线对磁极的作用力与弯折角度之间的函数关系。随之，法国的数学家拉普拉斯(Pierre Simon Laplace, 1729—1827)在他们前后两个实验结果的基础上，用数学分析方法将其表达成微分和积分的形式，这便是毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律。这一定律给出了由电流产生磁场的定量表述，是电流磁效应的理论基础。几乎与此同时，法国的安培(Andre Marie Ampere, 1775—1836)迅即重复了奥斯特的实验并加以发展，设计、进行了一系列精巧的实验，从中总结出磁针转动的方向与电流方向的关系服从右手螺旋法则、两电流元之间的作用力与其距离的平方成反比的公式（即安培定律）和物质磁性的分子电流假说。毫无疑问，在深化人类对电流的磁效应的认识方面，安培作出了重大贡献。电流磁效应的发现开辟了电应用的新领域。随后发明的电磁铁、检流计、电报、电话等等，为科学的发展和现代化的通讯奠定了基础。

在安培集中精力研究电流的磁效应时，德国的欧姆(Georg Simon Ohm, 1787—1854)受到热传导规律的启发而致力于对导线中电流规律的探索。他认为电流好象热流，电源的作用好象热传导中的温差。在经历了许多失败之后，欧姆在实验中采用了温差电池保证了电流的稳定，并利用电流的磁效应设计了一个电流扭秤，保证了电流的准确测量。他最后取得了成功，于1827年发表了简单而又极为有用的欧姆定律。这个定律是电工学最基本的规律之一。二十年后，德国的基尔霍夫(Gustav Robert Kir-

h hoff, 1824—1887)从电荷守恒及能量角度出发,将欧姆定律推广,建立了两个基尔霍夫方程组,以便于求解复杂的电路问题。

1821年,英国的法拉第(Michael Faraday, 1791—1867)在了解和重复了奥斯特的实验后,逐渐形成了一个想法:既然电流会产生磁,那么磁也应能转化成电。通过十年的求索,历经了多次实验上的失败,终于在1831年发现了电磁感应现象,即当一个导线线圈中的电流发生改变时,会在其近旁的另一个闭合导线线圈中产生电流。接着他又做了多种实验,广泛而全面地研究了电磁感应现象。1932年,法拉第发现,在相同条件下,不同金属导体中产生的感应电流与导体的导电能力成正比。由此他意识到感应电流是由与导体性质无关的感应电动势产生的,并相信即使不形成闭合回路(无感应电流),也会有感应电动势。在解释电磁感应现象中,法拉第运用了他提出的力线概念,认为当通过回路的磁感应线根数变化时,回路里就会产生感应电流,从而揭示了感应电动势产生的原因。按现代的语言即是说,当回路的磁通量发生变化时,回路里便产生感应电动势。由于实验难于测量物理量的变化率,直接从实验上得出定量规律有困难,定律只得由分析产生,当然其正确性取决于由此得出的结论是否与实验相符。电磁感应定律的定量表述是由德国科学家诺埃曼(Franz Ernst Neumann, 1798—1895)和韦伯(Wilhelm Weber, 1804—1890)分别于1845年和1846年给出的。诺埃曼在法拉第深刻的物理思想(力线概念)的启发下,实际上是以假设的方式给出电磁感应定律的。他的分析过程包含两部分:首先,运用毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律和安培定律,给出两载流线圈的相互作用能;其次,考虑两线圈相对运动,并假设被感线圈中的感应电动势与两线圈的相互作用能的变化率成正比。而韦伯则是从安培公式出发,计算运动电荷之间的相互作用力入手诱导出电磁感应定律。

与法拉第几乎同时探索磁产生电流的还有其它国家的物理学家。如美国的亨利(Joseph Henry, 1797—1878)先于法拉第一

年左右发现了电磁感应现象，但他等待积累更多的资料而没有发表。当他看到一本杂志上介绍法拉第的成果时，感到无限沮丧。此外，1833年俄国的楞次(Heinrich Friedrich Emil Lenz, 1804—1865)发表了他的实验结果，明确给出了确定感应电流方向的法则，即楞次定律。法拉第的伟大发现是电磁学史上的一块丰碑。同年他发明了世界上第一个直流发电机，此后各类电力发电机不断问世，导致了一场新的能源革命，其影响一直延续至今。同时，法拉第以极大的勇气和丰富的想象力提出了场和媒递作用的概念。在他之前的许多著名的物理学家，如富兰克林、库仑、安培等都追随牛顿的超距作用观点，认为电磁相互作用中的平方反比定律与万有引力类似，是能够超越一无所有的绝对空间的一种作用力，它的传递不需要媒介，也不需要时间。而法拉第首先从实验发现，电力和磁力跟带电体或磁体之间的媒质有关，不同的媒质中进行同样的实验，作用力并不相同。这引起了他的深思。通过分析和类比，他相信电荷及磁体周围空间存在着我们现在称之为场的物质。为了显示场，他用一张撒了铁屑的纸板覆盖在一根磁棒上，当轻轻敲动纸板时，铁屑便清楚地呈现出磁场的力线。法拉第认为这些力线具有实在的意义。场源不变时，力线不变；场源运动或变化时，力线也随之变化，电力和磁力便是通过电场线和磁感应线传递的，这种传递不可能是超距作用。法拉第这种场的观念是物理学中一个开创性的见解，正如爱因斯坦(Albert Einstein, 1879—1955, 德国人)所说，它的价值要比电磁感应的发现高出许多。

英国的物理学家麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831—1879) 于1854年前后便致力于将法拉第的力线观念写成便于数学处理的形式。开始时，他把力线看成不可压缩的流体的流线，力线管看成流管，电、磁场强度比作流速，建立了各物理量之间的矢量微分方程，得到法拉第的赞扬。后来麦克斯韦认为，为更好地表达法拉第的力线思想，需要引进一种媒质，便提出了电磁以