

能源管理师试点培训教材(试用)之三

DIANQIGONGCHENGXUEJICHU YU JIENENGJISHU

电气工程学基础 与节能技术

国家节能中心 编著



中国发展出版社

能源管理师试点培训教材(试用)之三

DIANQIGONGCHENGXUEJICHU YU JIENENGJISHU

电气工程学基础 与节能技术

国家节能中心 编著



中国发展出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电气工程学基础与节能技术/国家节能中心编著. —北京: 中国发展出版社, 2011. 6

ISBN 978 - 7 - 80234 - 673 - 4

I. 电… II. 国… III. ①电工技术—技术培训—教材 ②电工技术—节能—技术培训—教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 094462 号

书 名: 电气工程学基础与节能技术

著作责任者: 国家节能中心

出版发行: 中国发展出版社

(北京市西城区百万庄大街 16 号 8 层 100037)

标准书号: ISBN 978 - 7 - 80234 - 673 - 4

印刷者: 北京广益印刷有限公司

开 本: 787 × 1092mm 1/16

印 张: 16

字 数: 320 千字

版 次: 2011 年 6 月第 1 版

印 次: 2011 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

咨询电话: (010) 68990642 68990692

购书热线: (010) 68990682 68990686

网 址: <http://www.developress.com.cn>

电子邮件: fazhanreader@163.com

fazhan02@drc.gov.cn

版权所有·翻印必究

本社图书若有缺页、倒页, 请向发行部调换

能源管理师试点教材

编写指导委员会

主 任：谢 极

副 主 任：李仰哲

成 员：徐志强 陆新明 王静波 郑晓光 赵旭东 朱 辉 齐 佳
张玉梅 杜志星 赵亚如 续大康 翟国富 朱天利 陶文铨
周双喜

编 委 会

主 编：李仰哲 赵旭东

副 主 编：徐志强 朱 辉

成 员：史兆宪 姜子刚 刘 伟 王 忠 徐 壮 王景甫 孙 涛
叶永青 杨 博 魏向阳 桂 华 张 宇 孙 颖 高 红
时希杰 苏有余 焦莉燕 陈仲伟 尹小兰 杨碧玉

《电气工程基础与节能技术》

主 编：王 忠

副 主 编：孙 涛

编写人员：（按姓氏笔画排序）

王济浩 王 勇 王 晶 石 峻 史兆宪 邢学荣 仲 慧
任香贵 范成贤 姜子刚 姚福安 陶英川 黄 兴



目 录



第一章 电磁学概论	1
第一节 电场的基本物理量及定律	1
第二节 磁场的基本物理量及定律	6
第二章 电工学与电子技术基础知识	17
第一节 直流电路	17
第二节 单相交流电路	23
第三节 三相交流电路	28
第四节 电子技术基础	31
第三章 电力基础知识	36
第一节 电力系统与电力网	36
第二节 电力负荷	39
第三节 供电系统	44
第四节 供电质量	47
第五节 用户供电电压与电源的选择	52
第六节 无功功率补偿	53

第四章 电机与拖动	58
第一节 电机分类	58
第二节 变压器及其应用	60
第三节 直流电动机	65
第四节 异步电动机	70
第五章 电气线路	81
第一节 电气线路	81
第二节 电力电缆	86
第三节 室内线路与照明	87
第六章 高压电器及成套装置	91
第一节 高压电器的定义及分类	91
第二节 高压电器基本理论	92
第三节 高压电器触头	97
第四节 高压电器开关设备	97
第五节 高压成套装置及变电站	100
第七章 低压电器及成套装置	102
第一节 低压电器的定义与分类	102
第二节 低压电器的开关及保护设备	104
第三节 低压成套设备	111
第八章 自动控制理论	115
第一节 控制理论简介	115
第二节 经典控制理论	117
第三节 现代控制理论	126
第九章 电气测量基础	131
第一节 电气测量基本知识	131
第二节 电参数的测量	134
第十章 输配电系统节能技术	151
第一节 输配电系统	151

第二节 供配电系统的节能方法与措施	156
第三节 供配电系统的谐波抑制技术	162
第十一章 电机系统节能技术	170
第一节 电机系统	170
第二节 常用机械负载的特性	175
第三节 风机和泵类负载的节能	176
第四节 电动机的经济运行及软启动节能技术	178
第五节 变频调速节能技术	181
第六节 空气压缩机节能技术	186
第七节 制冷压缩机节能技术	188
第十二章 电化学节能技术	191
第一节 电化学简介	191
第二节 电化学基础知识	195
第三节 电化学工业的主要节能技术	204
第十三章 电加热节能技术	215
第一节 电加热设备	215
第二节 电加热设备节能技术	225
第十四章 照明节能技术	235
第一节 照明与光源	235
第二节 照明节能措施	240
第三节 采用高效电光源节电量的计算	245
参考文献	247

第一章 电磁学概论

第一节 电场的基本物理量及定律

一、电荷守恒和电流连续性原理

(一) 电荷守恒

电磁学是研究电磁现象的规律的学科。关于电磁现象的观察记录，可以追溯到公元前 6 世纪希腊学者泰勒斯（Thales）。他观察到用布摩擦过的琥珀能吸引轻微物体。物体能产生电磁现象，现在都归因于物体带上了电荷及这些电荷的运动。通过对电荷（包括静止的和运动的电荷）的各种相互作用和效应的研究，人们现在认识到电荷的基本性质有以下几方面：

1. 电荷的种类

电荷有两种，同种电荷相斥，异种电荷相吸。美国物理学家富兰克林（Benjamin Franklin, 1706~1790）首先以正电荷、负电荷的名称来区分两种电荷，这种命名法一直延续到现在。宏观带电体所带电荷种类的不同，根源在于组成它们的微观粒子所带电荷种类的不同：电子带负电荷；质子带正电荷；中子不带电荷。现代物理实验证实，电子的电荷集中在半径小于 10^{-18}m 的小体积内。因此，电子被当成是一个无内部结构而有有限质量和电荷的“点”。质子中只有正电荷，都集中在半径约为 10^{-15}m 的体积内。中子内部也有电荷，靠近中心为正电荷，靠外为负电荷；正负电荷电量相等，所以对

外不显带电。

带电体所带电荷的多少叫电量。谈到电量,就涉及如何测量它的问题。一个电荷的量值大小只能通过该电荷所产生的效应来测量。电量常用 Q 或 q 表示,在国际单位制(SI)中,它的单位为库仑,简记作 C。正电荷电量取正值,负电荷电量取负值。一个带电体所带总电量为其所带正负电量的代数和。

2. 电荷的量子性

实验证明,在自然界中,电荷总是以一个基本单元的整数倍出现。电荷的这个特性叫做电荷的量子性。电荷的基本单元就是一个电子所带电量的绝对值,常以 e 表示。经测定: $e=1.602\times 10^{-19}\text{C}$ 。

电荷具有基本单元的概念最初是根据电解现象中通过溶液的电量 and 析出物质的质量之间的关系提出的。法拉第(Michael Faraday, 1791~1867)、阿累尼乌斯(Arrhenius, 1859~1927)等都为此做过重要贡献。他们的结论是:一个离子的电量只能是一个基元电荷电量的整数倍。直到 1890 年斯通尼(John Stone Stoncy, 1826~1911)才引入“电子”(Electron)这一名称来表示带有负的基元电荷的粒子。其后,1913 年密立根(Robert Anolvews Millikan, 1868~1953)设计了有名的油滴试验,直接测定了此基元电荷的量值。现在已经知道许多基本粒子都带有正的或负的基元电荷。例如,一个正电子,一个质子都各带有一个正的基元电荷。一个反质子,一个负介子都带有一个负的基元电荷。微观粒子所带的基元电荷数常叫做它们各自的电荷数,都是正整数或负整数。

当一个带电体本身的线度比所研究的问题中所涉及的距离小很多时,该带电体的形状与电荷在其上的分布状况均无关紧要,该带电体就可看做一个带电的点,叫点电荷。由此可见,点电荷是个相对的概念。至于带电体的线度比所研究的问题所涉及的距离小多少时,才能被当做点电荷,这要依问题所要求的精度而定。当在宏观意义上谈论电子,质子等带电粒子时,完全可以把它们视为点电荷。

3. 电荷守恒定律

实验指出,对于一个系统,如果没有净电荷出入其边界,那该系统的正、负电荷的电量的代数和将保持不变,这就是电荷守恒定律。宏观物体的带电、电中和以及物体内的电流等现象实质上是由于微观带电粒子在物体内部运动的结果。因此,电荷守恒实际上也就是在各种变化中,系统内粒子的总电荷数守恒。

现代物理研究已表明,在粒子的相互作用过程中,电荷是可以产生和消失的。然而电荷守恒并未因此而遭到破坏。例如,一个高能光子与一个重原子核作用时,该光子可以转化为一个正电子和一个负电子(这叫电子对的“产生”);而一个正电子和一个负电子在一定条件下相遇,又会同时消失而产生两个或三个光子(这叫电子对的“湮灭”)。在已观察到的各种过程中,正、负电荷总是成对出现或成对消失。由于光子不带电,正、负电子又各带有等量异号电荷,所以这种电荷的产生和消失并不改变系统中的电荷数的代数和,因而电荷守恒定律仍然保持有效。

若在有体积电流的空间任取一闭合面 S , 那么单位时间内从 S 面流出去的电流, 必然等于 S 面所包围的体积 V 中单位时间总电荷的减少量, 如图 1.1-1。

(二) 电流连续性原理

公式 (1.1-1) 为电流连续性方程, 它是电荷守恒原理的必然结果。

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{\partial q}{\partial t} = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dV \quad (1.1-1)$$

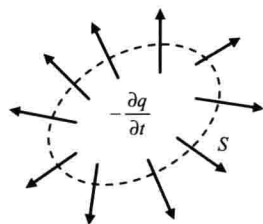


图 1.1-1 电荷守恒和电流连续性原理

式中:

$\mathbf{J}$ ——穿过闭合曲面 S 的电流密度, 单位为安培每平方米 (A/m^2);

q ——闭合曲面 S 内包围的自由电荷量, 单位为库仑 (C);

ρ ——体积 V 内的电荷密度, 单位为库仑每立方米 (C/m^3)。

对于恒定电流来说, 电荷运动速度不随时间而变化, 电荷在空间的分布也不随时间而变化, 此时电流连续性方程见式 (1.1-2):

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.1-2)$$

二、库仑力定律

在发现电现象后的两千多年的长时期内, 人们对电的认识一直停留在定性阶段。从 18 世纪中叶开始, 不少人着手研究电荷之间作用力的定量规律, 最先是研究静止电荷之间的作用力。研究静止电荷之间的相互作用的理论叫做静电学。它是以 1785 年法国科学家库仑 (Charles Augustin de Coulomb, 1736~1806) 通过实验总结出的规律——库仑定律为基础的。这一定律表述如下:

真空中两个静止的点电荷之间的作用力 (斥力或吸力) 与这两个电荷所带电量的乘积成正比, 与它们之间距离的平方成反比, 作用力的方向沿着这两个点电荷的连线。在图 1.1-2 所示的真空中点电荷 q_2 受到点电荷 q_1 的作用力见式 (1.1-3):

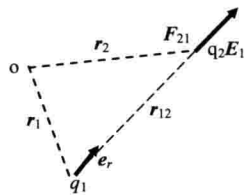


图 1.1-2 库仑力定律

$$\mathbf{F}_{21}(x, y, z, t) = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2} \mathbf{e}_r \quad (1.1-3)$$

式中, 真空的电容率 $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ (F/m)。

图中的 O 点为坐标原点; $\mathbf{r}_1$ 为点电荷 q_1 的位置矢量; $\mathbf{r}_2$ 为点电荷 q_2 的位置矢量; $|\mathbf{r}_{12}| = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| = |\mathbf{r}_{21}|$; $\mathbf{e}_r$ 为两电荷之间距离的单位矢量; $\mathbf{e}_r = \mathbf{r}_{12}/r_{12}$ 为由 q_1 指向 q_2 。

库仑定律只讨论两个静止的点电荷间的作用力, 当考虑两个以上的静止的点电荷

之间的作用时，就必须补充另一个实验事实：两个点电荷之间的作用力并不因第三个点电荷的存在而有所改变。因此，两个以上的点电荷对一个点电荷的作用力等于各个点电荷单独存在时对该点电荷的作用力的矢量和。这个结论叫电力的叠加原理。

三、电场力

过去曾认为电荷之间的作用力是“超距作用”。但现代观点认为电荷之间是通过“电场”来间接作用的。电场看不到，摸不着，我们可以通过测试电荷受力来感知它的存在。只要有电荷存在，电荷的周围就存在着电场，电场的基本性质是它对放入其中的电荷有力的作用，这种力就叫做电场力。电场力的作用广泛，它应用到离子加速器、航天事业中导航修正。对新物质的加工、对物质排列改变、在未来可能是主要动力之一。

电场力的方向为：正电荷沿电场线的切线方向，负电荷沿电场线的切线方向的反方向。

四、电场强度

电场的一个重要特性是对处在场内的其他静止电荷有力作用。因此，我们可以通过电场对电荷的作用力来研究电场，并用电荷作为研究和检测电场的工具。例如，把一点电荷逐次置于空间某个区域的各个位置上，如果该点电荷总是不受力的作用，则该区域内无其他电荷的电场存在；反之，则存在电场。

用于研究和检测电场的电荷称为试探电荷或检测电荷。产生被研究电场的电荷称为源电荷。源电荷可以是若干个电荷，也可以是具有某种电荷分布和某种形状的带电物体。试探电荷应满足一定的条件。首先，它的电量 q_0 应尽可能小，使它对源电荷的作用非常小，这样，试探电荷的引入几乎不会引起源电荷分布的变化；其次，试探电荷本身的几何线度应尽可能小，这样才可能用它来探测场内每一点的性质。在电场内任一确定点，试探电荷受到的电场作用力与试探电荷的电量有关。

电场对试探电荷的作用力是由电场与试探电荷共同决定的，但是电场对试探电荷的作用力与试探电荷电量之比是一个与试探电荷无关而仅由电场本身性质决定的物理量，我们用它来描写电场，称为电场强度，简称场强。即把一个体积很小、电量很少的测试电荷 q 静止地 ($v=0$) 放在电场中某场点 (x, y, z) ，测出它在某一时刻 t 所受的力 $F(x, y, z, t)$ ，可定义该场点的电场强度，见式 (1.1-4)：

$$E(x, y, z, t) = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{F(x, y, z, t)}{q} \quad (1.1-4)$$

电场强度是一个矢量，具有明确的物理意义：其方向为正电荷在该点受力的方向，其大小为单位正电荷在该点所受的电场力。在力学上其单位为 N/C，在电磁学中其单位

为 V/m 。在 n 个点电荷产生的电场中某点的电场强度等于每个点电荷单独存在时在该点所产生的电场强度的矢量和。这个结论叫做场强叠加原理。

五、介质的极化

从微观上看,电介质内部的带电粒子都被束缚在原子或分子结构上,没有自由电荷。组成电介质的分子有两类:一类为无极分子,无外加电场时正负电荷作用中心重合,没有电偶极矩;另一类为有极分子,无外加电场时正负电荷中心不重合,存在固有电偶极矩,但由于分子的热运动,原有的电偶极矩摆列杂乱无章,总的电偶极矩 $\sum \mathbf{p} = 0$ 。所以无论哪种电介质,在无外加电场时都保持电中性。

在外电场的作用下电介质会产生三种极化现象。第一种是无极分子原子核外围的电子云,在外电场作用下发生相对位移而出现电偶极矩,称为电子极化。第二种是无极分子的正负离子,在外电场的作用下发生位移而出现电偶极矩,称为离子极化。第三种是有极分子的固有电偶极矩,在外电场的作用下顺电场方向转动,产生合成电矩 $\sum \mathbf{p} \neq 0$,称为取向极化。一般单原子的电介质只有电子极化,所有化合物都存在电子极化和离子极化,某些化合物分子同时具有三种极化。

电介质被极化的程度用“极化强度”表示。假设在电场的作用下,电介质体积元 $\Delta \tau$ 内的合成电矩为 $\sum \mathbf{p}$,则该点的极化强度按式(1.1-5)计算:

$$\mathbf{P} = \lim_{\Delta \tau \rightarrow 0} \frac{\sum \mathbf{p}}{\Delta \tau} = N \cdot \mathbf{p}_{av} \quad (1.1-5)$$

式中:

$\mathbf{P}$ ——极化强度,其方向由负束缚电荷指向正束缚电荷,单位为库仑每平方米 (C/m^2);

$\mathbf{p}$ ——电偶极矩, $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$, 单位为库仑米 ($C \cdot m$); q 是一对距离很近的等量异号电荷所带电, l 为电荷之间的距离;

$\mathbf{p}_{av}$ ——分子平均电偶极矩,单位为库仑米 ($C \cdot m$);

N ——单位体积内的极化分子数。

电介质极化的结果使束缚电荷分布不平衡,出现局部过剩的宏观附加电荷。可以证明,在任意闭合面 S 所包围的电介质体积中,极化电荷总量按式(1.1-6)计算:

$$q_p = -\oint_S \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.1-6)$$

任何电介质所能承受的电场强度是有限的。当其达到一定数值时,其中的束缚电荷会脱离它们的分子结构而自由移动,这时电介质就丧失了它的绝缘性能,在电工技术里就说它被击穿。电介质能安全地承受的最大电场强度,称为该材料的电介质强度,或称击穿场强。

六、电位移矢量

存在电介质的电场中, 自由电荷是产生外加电场的“一次源”; 电介质极化后产生的极化电荷是激发电场的“二次源”, 在电介质中, 既包含自由电荷, 也包含极化电荷, 如图 1.1-3 所示, 因此按式 (1.1-7) 定义:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (1.1-7)$$

式中, $\mathbf{D}$ 为电位移矢量或电感应强度, 其单位为库仑每平方米 (C/m^2)。

因此得到介质中的高斯通量定理, 见式 (1.1-8):

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q \quad (1.1-8)$$

式中, $\mathbf{D}$ 为垂直穿过单位面积的电通量, 因此 $\mathbf{D}$ 又称为“电通量面密度”(简称“电通密度”)。

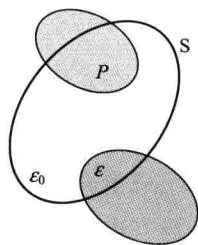


图 1.1-3 介质中的电荷

第二节 磁场的基本物理量及定律

能够产生磁力的空间存在着磁场。磁场是一种特殊的物质, 磁体周围存在磁场, 磁体间的相互作用就是以磁场作为媒介的。电流、运动电荷、磁体或变化电场周围空间存在的一种特殊形态的物质, 就是磁场。由于磁体的磁性来源于电流, 电流是电荷的运动, 因而概括地说, 磁场是由运动电荷或变化电场产生的。

一、安培力定律

两个电流回路之间不但有电场力作用, 还会受到另外一种特性完全不同于电场力的磁场力作用。安培力定律是研究磁场力的基础。如图 1.2-1 所示, 真空中电流回路 I_2 受到电流回路 I_1 的作用力按式 (1.2-1) 计算:

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{I_2 d\mathbf{l}_2 \times (I_1 d\mathbf{l}_1 \times \mathbf{e}_r)}{r_{12}^2} \quad (1.2-1)$$

式中:

μ_0 ——真空的磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$;

r_{12} ——两个电流元之间的距离;

$\mathbf{r}_r$ ——单位矢量, 为 $\mathbf{r}_{12}/r_{12}$, 其方向由 $I_1 d\mathbf{l}_1$ 指向 $I_2 d\mathbf{l}_2$ 。

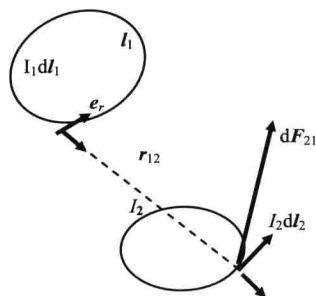


图 1.2-1 真空中两个电流回路作用力

二、磁感应强度

根据“电磁场”的观点，两个电流回路之间的作用力实质上是通过“磁场”来间接作用的磁场力，用毕奥-萨伐尔定律（简称毕-萨定律）描述磁感应强度如式（1.2-2）：

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l_1} \frac{Idl_1 \times e_r}{r^2} \quad (1.2-2)$$

式中， B ——磁感应强度，单位为特斯拉（T）。

考虑体电流、面电流和线电流产生的磁场，真空中电流回路用式（1.2-3）计算：

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'} \frac{J \times e_r}{r^2} dV + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{s'} \frac{K \times e_r}{r^2} ds + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_l \frac{Idl \times e_r}{r^2} \quad (1.2-3)$$

式中：

J ——体电流密度，单位为安培每平方米（A/m²）；

K ——面电流密度，单位为安培每米（A/m）。

磁感应强度 B 的定义式为洛仑兹力，按式（1.2-4）计算：

$$F_m = qv \times B \quad (1.2-4)$$

或安培力定律可用式（1.2-5）计算：

$$F_m = \oint_l Idl \times B \quad (1.2-5)$$

载流导体周围存在着磁场，即电流产生磁场称为电流的磁效应。通电导线（或线圈）周围磁场（磁力线）的方向，可以用右手定则来判断。试验证明，通电导线在磁场中会受到力的作用，这种力叫做电磁力或电动力。通电导线在磁场中受力的方向，可以应用电动机左手定则来确定，伸出左手使掌心迎着磁力线，即磁力线垂直穿过掌心，伸直的四指与导线中的电流方向一致，则与四指成直角的大拇指所指方向就是导线受力的方向。

电动力的大小与磁场的强弱、电流的大小和方向、通电导线的有效长度有关。一般情况下，磁场对电流的电动力可以用公式（1.2-6）计算：

$$F = IBl \sin \alpha \quad (1.2-6)$$

式中：

F ——导体在磁场中所受到的电磁力，单位为牛顿（N）；

I ——导体中通过的电流，单位为安培（A）；

B ——磁感应强度，单位为特斯拉（T）；

l ——导体的有效长度，单位为米（m）；

α ——载流导体与磁场方向间的夹角，单位为度（°）。

从数值上说， B 等于单位电荷（ $q=1C$ ），以单位速度（ $v=1m/s$ ），沿着与磁场垂直方向（ $\theta=90^\circ$ ）运动时，所受的洛伦兹力 $F_m = l \times I \times B \times \sin 90^\circ = B$ 等于单位长度（ $l=1m$ ）

的单位电流 ($I=1\text{A}$), 在其垂直于磁场方向上 (Idl 与 B 夹角 $\theta=90^\circ$) 所受的安培力为 $F_m = I \times B \times \sin 90^\circ = B$ 。

从物理意义上说, B 并不是“磁场力”。因为磁场力 F_m 与电荷运动方向 qv (或 Idl) 以及 B 的方向, 三者之间符合右手定则, 如图 1.2-2。磁场力 F_m 的方向总与 B 的方向垂直, 只能使运动的电荷偏转方向, 而不能做功。

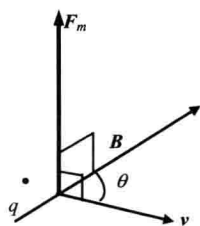


图 1.2-2 洛伦兹力

三、物质的磁化

物质结构理论证实, 任何物质都是由分子、原子构成的。每个电子既围绕原子核不停地运动, 又其绕自身的轴自旋。电子的这两种运动都可以用分子内在的分子电流来等效。从电磁场的角度来看, 每个分子电流都可视为一个很小的环形电流, 相当于一个磁偶极子。

磁介质可分为顺磁物质、抗磁物质和铁磁物质。无外加磁场时, 顺磁物质和抗磁物质合成磁矩 $\sum m=0$, 在外磁场作用下, 各个分子磁矩在一定程度上沿磁场方向排列, 从而使其 $\sum m \neq 0$ 显示出磁性。铁磁物质与前两种磁介质有很大差别, 其内部存在很多天然的具有很强磁性的小区域, 称为磁畴。无外磁场时磁畴方向杂乱无章, 因此其 $\sum m=0$, 对外不显磁性。在外磁场作用下磁畴顺外磁场排列, 使其 $\sum m \neq 0$, 对外呈现很强的磁性。铁磁物质是一种特殊的顺磁物质, 其磁化强度远比一般磁介质要大几百万倍; 而且在外磁场撤去之后, 仍能保留相当的磁性 (磁滞)。

磁介质被磁化的程度用“磁化强度”表示。假设磁介质体积元 $\Delta\tau$ 内的净磁矩为 $\sum m$, 则该点的磁化强度按式 (1.2-7) 计算:

$$M = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\sum m}{\Delta\tau} = N \cdot m_{av} \quad (1.2-7)$$

式中:

M ——磁化强度, 其方向由分子电流的绕行方向按右手定则决定, 单位为安培每米 (A/m);

m_{av} ——分子平均磁矩, 单位为安培每米 (A/m)。

磁化强度 M 与磁场强度 H 的关系与磁介质的物理性质有关, 而且相差极大。对于各向同性的磁介质可按式 (1.2-8) 计算:

$$M = M_0 + \kappa H \quad (1.2-8)$$

M_0 代表物质的固有磁化强度。对于铁磁物质, 即使没有外磁场也有一定的固有磁化, $M_0 \neq 0$ 。对于顺物磁质和抗磁物质, 都没有固有磁化, $M_0=0$ 。其磁化强度与磁场强度成正比, 且同方向, 见公式 (1.2-9):

$$\mathbf{M} = \kappa \mathbf{H} \quad (1.2-9)$$

式中, κ 为磁介质的磁化率。对于顺磁物质 $\kappa > 1$, 抗磁物质 $\kappa < 1$, 都是接近于 1 的常数; 对于铁磁物质 κ 数值极大。

物质磁化的结果是出现大量微观分子电流所应引起的宏观剩余电流, 称为磁化电流。如果磁介质均匀, 只在其表面出现磁化面电流; 如果磁介质不均匀, 还会在其体积内部出现磁化体电流。

四、磁场强度

物质磁化后出现的磁化电流产生附加磁场(二次源), 将会引起磁场的变化。因此, 安培环路定理用于磁介质时, 既要包含自由电流, 也要包含磁化电流。定义见式(1.2-10):

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \quad (1.2-10)$$

$\mathbf{H}$ 称为磁场强度。因此, 磁媒质中的安培环路定理见公式(1.2-11):

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i \quad (1.2-11)$$

式中, i 为闭合曲线 l 所匝链的电流代数和。

上式表明: $\mathbf{H}$ 的闭合环路积分只与穿过闭合环路围成面积 S 的自由电流有关, 磁化电流对磁场的附加激励作用, 已包含在磁场强度 $\mathbf{H}$ 之内。

五、电磁感应定律

1820 年奥斯特通过实验发现了电流的磁效应。后来人们自然想到, 能否利用磁效应来产生电流。从 1822 年起, 法拉第就开始对这一问题进行有目的的实验研究。经过多次的失败, 终于在 1831 年取得了突破性的进展, 发现了电磁感应现象。他曾做了许多这方面的实验。他的实验大体上可归结为两类: 一类实验是磁铁与线圈有相对运动时, 线圈中产生了电流; 另一类实验是当一个线圈中电流发生变化时, 在它附近的其它线圈中也产生了电流。法拉第将这些现象与静电感应类比, 把它们称作“电磁感应”。

对所有电磁感应实验的分析表明, 当穿过一个闭合导体回路所限定的面积的磁通量(磁感应强度通量)发生变化时, 回路中就出现电流。这电流叫感应电流。

当穿过导体回路的磁通量发生变化时, 回路中产生了电流, 这说明此时在回路中产生了电动势。由这一原因产生的电动势叫感应电动势, 如图 1.2-3 所示。

实验表明, 感应电动势的大小和通过导体回路的磁通量

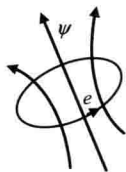


图 1.2-3 电磁感应定律

的变化率成正比，感应电动势的方向有赖于磁场的方向和它的变化情况。

法拉第 (M.Faraday) 通过大量实验总结出电磁感应定律：当穿过导体回路围成面积的磁链随时间变化时，导体回路中将产生感应电动势，其公式见 (1.2-12)：

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1.2-12)$$

式中：

e ——线圈的感应电动势；

ψ ——线圈匝链的磁链。

电磁感应定律表明：变化的磁场可以产生电场。从一个方面说明了电场和磁场不再各自独立，两者联系在一起。

六、全电流定律

所谓全电流是指传导电流、运流电流以及位移电流的总和，它们都能产生磁场。

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left(\mathbf{J}_C + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \rho \cdot \mathbf{v} \right) \cdot d\mathbf{s} \quad (1.2-13)$$

式中：

$\mathbf{J}_C$ ——存在于导体和电解液中的传导电流密度；

$\rho \cdot \mathbf{v}$ ——存在于真空或稀薄气体中的运流电流密度；

$\partial \mathbf{D} / \partial t$ ——位移电流密度，存在于磁场随时间变化的任何实体物质和真空之中。

七、麦克斯韦方程组

库仑力定律、安培力定律、法拉第定律为电磁场理论提供了坚实的实验基础。麦克斯韦在总结前人研究成果的基础上，根据电荷守恒原理，提出了位移电流的假设，将静电场和恒定磁场的基本方程加以扩展，得到时变电磁场的基本方程组，通常称为“麦克斯韦方程组”。在静止媒质中，麦克斯韦方程组的积分见公式 (1.2-14) ~ 公式 (1.2-17)：

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left(\mathbf{J}_C + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \rho \cdot \mathbf{v} \right) \cdot d\mathbf{s} \quad (1.2-14)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.2-15)$$

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1.2-16)$$

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_v \rho \cdot dV \quad (1.2-17)$$

这个方程组完全决定了由电荷和电流所激发的电磁场的运动规律，它们与“库仑—