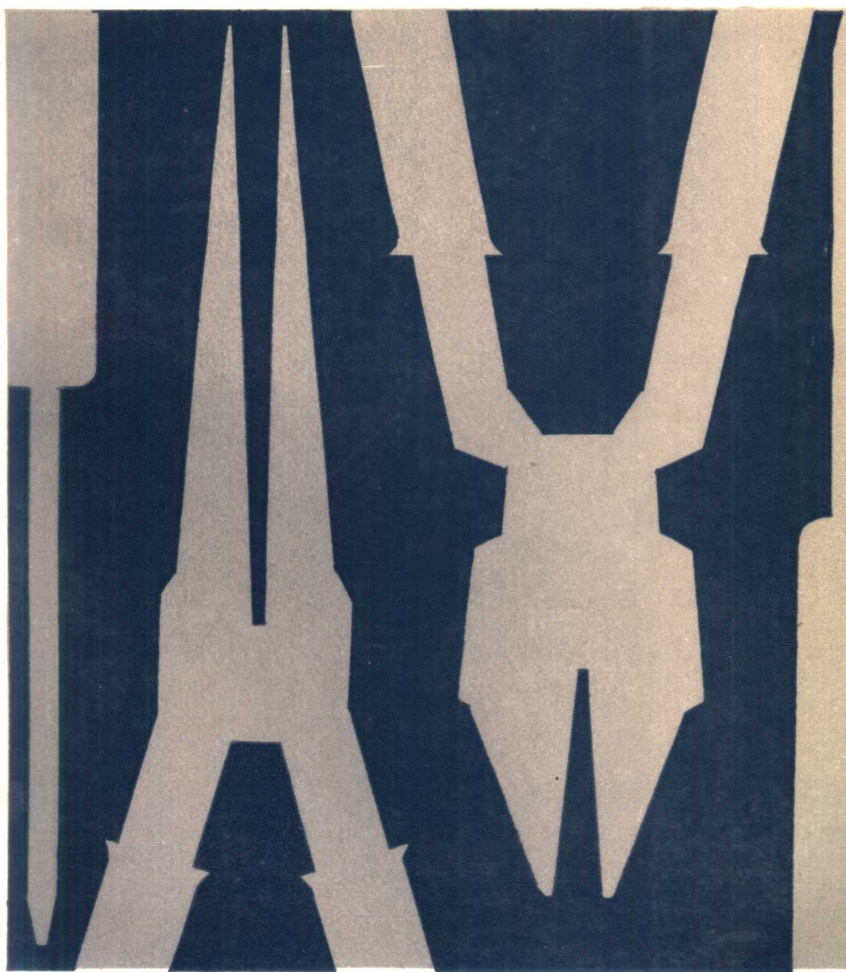


实用电工 技术浅析

秦显才 编著



中国建筑工业出版社

实用电工技术浅析

秦显才 编著

中国建筑工业出版社

本书系统而形象地阐明电工学与电磁学的基本概念，并结合电工技术的实际问题，浅近地讲述电工技术理论和应用；全书还通过精选的大量电工技术实例，对其中的疑难和易于误解的问题，做出简明的解答。

本书供初、中级工程技术人员阅读，也可作电工技术培训用教材。

* * *

责任编辑 强十渤

技术设计 马江燕

责任校对 廖晓明

实用电工技术浅析

秦显才 编著

*
中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*
开本：787×1092毫米 1/16 印张：17³/₄ 字数：430 千字

1991年11月第一版 1991年11月第一次印刷

印数：1—3,060册 定价：11.90元

ISBN7—112—01376—3/TU·1011

(6418)

前 言

本书是为了满足初、中级技术人员的需要，以突出重点、简明扼要、饶有趣味、避免长篇冗述的编写方法，对电工学、电磁学的基础理论及实用电工技术，系统地阐明概念、分析理论，紧密结合生产、生活中的实际问题，作深入浅出的剖析，使大多数从事实际工作的初、中级技术人员，从电工学、电磁学（简称两学）中的基本物理量采用数学表达、定量计算的玄虚、烦琐的氛围中解脱出来，进而掌握“两学”的实质——即电场力做功和动磁生电及动电生磁的基本理论和应用的关键和要领。因此，本书的特点是：既力求达到系统地、完整而形象地阐明概念，避免传统的“两学”教材中大量推导物理量的计算模式，并且紧密结合电工技术的实际问题，浅显地说明电工技术理论的实质和应用，理论结合实际，增加了实感和趣味性。

全书还通过精选的大量电工技术实例，对其中的疑难和易于误解的问题，作了简明的解答。

限于编者的水平，本书能否达到上述要求和满足读者的期望，还有待于读者的热情支持和评价。

本书由秦显才主编，参加编写工作的还有秦勇、柏诚、赵志忠、何仞才、李琦、史毅夫，程一莘、柯郁绘图。

目 录

1 应用电磁系统相对论

1.1 电场与磁场的静态关系	1
1.1.1 静电场和恒定磁场的相似性	1
1.1.2 静电场与恒定磁场的不同性	1
1.1.3 电力线与磁力线	2
1.1.4 电场能量和磁场能量	2
1.2 静电场中的电介质和磁场中的 磁介质	3
1.2.1 极化现象与磁化现象	3
1.2.2 原电(磁)场和附加电(磁)场	5
1.2.3 击穿现象和饱和现象	5
1.2.4 介电系数和导磁系数	5
1.2.5 电介质损耗和铁磁介质损耗	6
1.3 电场和磁场的动态关系	7
1.3.1 动电生磁现象	7
1.3.2 动磁生电现象	9
1.4 自感应和互感应	12
1.4.1 自感现象和互感现象	12
1.4.2 自感系数(电感) L 和互感 系数 M	13
1.4.3 自感电动势 e_L 和互感电动势 e_M	14
1.5 电路和磁路	17
1.5.1 电路和磁路的对应量	17
1.5.2 电路与磁路的区别	17

2 静电学应用原理浅析

2.1 静电感应及其应用	19
2.1.1 静电感应	19
2.1.2 尖端放电	19
2.1.3 避雷针	20
2.2 静电屏蔽原理	20
2.3 超高压带电作业原理	21
2.4 气体放电及其应用	22
2.5 静电喷漆原理	24

2.6 静电植绒原理	25
2.7 静电除尘原理	26
2.8 静电防腐原理	26
2.9 静电分离原理	27
2.10 静电复印原理	30
2.11 静电水垢控制器原理	32
2.12 静电加速器原理	33
2.13 静电在宇宙航行中的应用	33
2.14 PN结自建的内电场	34
2.15 静电与人体的关系	38
2.16 静电与植物的关系	39
2.17 静电的危害及防治措施	40

3 电磁学应用原理浅析

3.1 动电生磁应用(1)——右手

螺旋定则

3.1.1 无感线圈电阻元件工作原理	42
3.1.2 起重电磁铁工作原理	42
3.1.3 电铃工作原理	42
3.1.4 干(舌)簧继电器工作原理	43
3.1.5 电磁吸盘工作原理	43
3.1.6 电磁系测量机构的工作原理	44
3.1.7 钳形电流表工作原理	45
3.1.8 旋转磁场是怎样产生的	45
3.1.9 录音原理	47
3.1.10 抹音原理	49

3.2 动电生磁应用(2)——

左手定则

3.2.1 直流电动机工作原理	49
3.2.2 磁电系测量机构的工作原理	49
3.2.3 电子射线在磁场中的偏转原理	50
3.2.4 磁吹法原理	51
3.2.5 摇表(兆欧表)的工作原理	52

3.3 动电生磁应用(3)——右手螺旋和 左手定则的混用

3.3.1 电动系测量机构工作原理	53
-------------------------	----

3.3.2 平行载流导线间的相互作用力	54	3.6.16 放音工作原理	80
3.3.3 电磁泵的工作原理	55	3.6.17 零序电流互感器工作原理	82
3.4 动磁生电应用(1)——右手定则	55	3.7 动电与动磁互生的应用——左、	
3.4.1 交流发电机的工作原理	55	右手定则	82
3.4.2 单相正弦电动势的产生	56	3.7.1 异步电动机能耗制动原理	82
3.4.3 三相正弦电动势的产生	58	3.7.2 三相异步电动机工作原理	83
3.4.4 磁电传感器工作原理	58	3.7.3 感应式电度表工作原理	83
3.5 动磁生电(自感应)应用(2)——		3.7.4 扬声器工作原理	86
楞次定律	60		
3.5.1 日光灯工作原理	60	4 电路的基本概念及其应用	
3.5.2 利用自感电流使继电器缓放的		4.1 电路与电场的关系	87
原理	61	4.2 电路的组成和电路模型	87
3.5.3 直流电机绕组元件中的电流换向		4.3 电路的作用和工作状态	89
时产生火花的原因、危害及改善	62	4.4 强电和弱电的基本概念及应用	
3.5.4 变压器空载运行原理	63	实例	104
3.5.5 旋转磁场在定子绕组中产生的自感		4.5 简单电路和复杂电路的基本概念	
电动势	64	及应用实例	113
3.5.6 过电压及开关设备的灭弧原理	65	4.6 稳态电路和暂态电路的基本概念	
3.5.7 自感电动势与感抗的关系	68	及应用实例	130
3.5.8 趋肤效应原理	69	4.7 线性电路和非线性电路的基本	
3.6 动磁生电(互感应)应用(3)——		概念及应用实例	133
楞次定律	70	4.8 时变电路和非时变电路的基本	
3.6.1 变压器工作原理	70	概念及应用实例	137
3.6.2 高频感应炉原理	71	4.9 无源和有源二端网络的基本概	
3.6.3 电机的涡流烘干法原理	72	念及应用实例	155
3.6.4 感应圈工作原理	72	4.10 对偶电路的基本概念和应用	
3.6.5 钢结构检测仪原理	73	实例	159
3.6.6 交流电磁铁短路环的作用原理	73	5 电路中的物理量及其应用	
3.6.7 利用短路线圈使继电器缓动的		5.1 独立源和受控源	163
原理	74	5.2 理想电压源和理想电流源	164
3.6.8 异步电动机起动电流大的原因	75	5.3 实际电压源和实际电流源	165
3.6.9 电压互感器副绕圈不能短路的		5.4 电场力和电源力	169
原因	76	5.5 电流强度和电流密度	173
3.6.10 电流互感器副绕圈不能开路的		5.6 电位和电位差	186
原因	76	5.7 电位降和电位升	192
3.6.11 涡流损耗及其避免方法	77	5.8 电功率和电能	209
3.6.12 交流电磁铁芯的铆钉为什么必须用		5.9 储能元件的参数 L 和 C	214
单排而不能用双排	77	5.10 直流暂态电路参数和直流稳态	
3.6.13 雷电流的危害及其防止措施	77		
3.6.14 电传声的基本过程和接收机输入回			
路工作原理	78		
3.6.15 电话机桥式消除侧音电路原理	80		

电路参数	216	6.1.1 “安培”量纲及其量级关系	247
5.11 理想元件的参数和实际元件 的参数	216	6.1.2 “伏特”量纲及其量级关系	247
5.12 集中参数和分布参数	218	6.1.3 “欧姆”量纲及其量级关系	248
5.13 线性电阻和非线性电阻	219	6.2 三类电工量纲间的内在关系	250
5.14 线性电感和非线性电感	232	6.3 同类电工量纲间的内在关系	253
5.15 线性电容和非线性电容	236	6.4 两类电工量纲间的内在关系	255
5.16 二端电路元件和多端电路 元件	245	6.5 欧姆定律的应用	259
		6.6 基尔霍夫定律的应用	265
		6.7 功率计算的应用实例	271

6 电工量纲间的内在关系及其应用

6.1 主要电工量纲的类别	247
---------------------	-----

1 应用电磁系统相对论

从应用的角度看，电磁学研究的主要对象是各种电器、设备、仪表等工作原理，研究的主要内容是电与磁的相对运动关系。这种关系概括起来是：动电生磁，动磁生电，二者在动态中生，静态中息。所谓有电必有磁，有磁必有电，必须是处于在动态的前提下，若置于静态中则这种关系是不存在的。“动”是电与磁联系的“媒介”，“静”是电与磁的“隔屏”。动是绝对的，静是相对的。动和静的内在联系贯穿于电磁学的全部内涵，用动和静的观点去研究电磁现象和电路理论就是抓住了主要矛盾和主要分析方法，在学习中必须注意到这一点。下面按电路的需要来介绍一下电场和磁场。

1.1 电场与磁场的静态关系

静电场是静止电荷产生的。恒定电流（直流）产生的恒定磁场，因大小和方向不随时间变化，故属于静态磁场。在静态时，电场和磁场是不相关联的，它们既有共性，也有区别，二者各保持其独立性。现将它们的异同点分析比较如下。

1.1.1 静电场和恒定磁场的相似性

1. 静电场和恒定磁场都是一种特殊形态的物质。静止电荷之间的电力作用和运动电荷或电流间的磁力作用，都是直接发生的所谓“超距作用”。电力和磁力是通过电场和磁场来传递的，电场和磁场都是电磁场的一种特殊物质形式。电磁场与实物（由原子、分子组成的物质）一样，也有质量、能量和动量，当产生场的源（静电荷与动电荷）已经消失，而场仍能继续存在。场既不能创生，也不能消灭，只能由一种形式转变为另一种形式。场与实物的主要区别是：场是弥漫在空间的特殊形态的物质，一种场所占据的空间能为其它场（如引力场……等）同时占有，而且互不发生影响；而实物具有不可入性，即一种实物的原子分子占据的空间，不能同时为其它原子分子所占有。场以光速传播，而实物达不到光速，平常说的电流速度为每秒三十万公里是指电场在电路中传播的速度，自由电子在导线中的流速每秒只有0.02厘米。场受力不能被加速，而实物受力可产生加速。场的质量密度比实物小得多。场和实物是物质存在的两种不同形式。

2. 电场对静止电荷能施加电场力并能移动做功，磁场对载流导体或磁铁能施加磁场力并能移动做功。这说明电场和磁场都具有力和能量的特性，电场和磁场的实用性就是取源于这一特性的。电路和磁路是电场和磁场集中存在和应用的主要形式。

1.1.2 静电场与恒定磁场的不同性

1. 电场起源于电荷。不论是静止电荷或运动电荷在其周围空间都会引生电场，而磁场只起源于电流或运动电荷。磁铁产生的磁场，究其本质，也是运动电荷产生的，静止电荷

不可能引生磁场。

2. 电场对静止电荷和运动电荷都要施加作用力，而磁场只对运动电荷施加作用力。

3. 电场对在场中的运动电荷做功，而磁场对在场中的运动电荷不做功，因为磁场对运动电荷的作用力垂直于电荷的速度方向。

4. 静电场是无旋场。电荷在场中移动时电场力所做的功与起点和终点的位置有关，与电荷移动的路径无关，经过任一闭合回路时，电场力所做的总功等于零；而磁场是有旋场，在磁场里移动磁铁或载流导体时，磁场力所做的功与路径有关，沿着任一闭合回路磁场所做的总功不一定等于零。

1.1.3 电力线与磁力线

因电场和磁场的物质形态特殊，比较抽象，不易被人理解，为便于掌握电场和磁场的大小和方向，人们科学地假想出一种线，用以形象地描述电场与磁场。电场和磁场的强弱视电力线和磁力线分布的疏密程度而定，密强疏弱；电场和磁场中某一点的方向就是沿着力线方向通过该点的切线方向；因电场和磁场具有单值性（即场中各点场强大小和方向只有一个），故电力线和磁力线不会相交，也不会重迭。不同的是电力线不闭合，磁力线总是闭合的；电力线从正电荷出发终止于负电荷；磁力线在磁体外部从 N 极到 S 极，在内部从 S 极到 N 极。如图1-1所示。

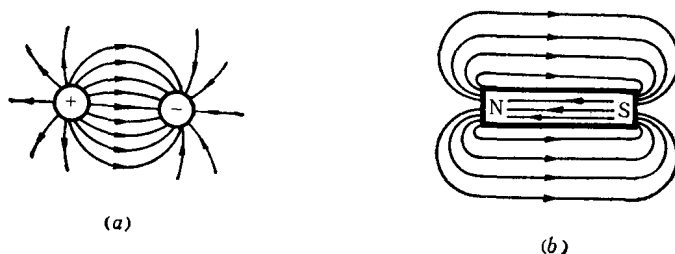


图 1-1 电力线与磁力线分布图

1.1.4 电场能量和磁场能量

电场和磁场具有能量的特性，在电路中体现在电容器和电感线圈两个储能元件上。下面对两种能量的建立过程和其它特性加以比较：

1. 电容器的电场能量和线圈的磁场能量的建立。电场能量是怎样储存在电容器里的呢？先让我们举一个例子，生活中给机械手表上弦，就是将人体内的能量通过手传递给手表，将手上的动能逐渐变成机械能储存在具有弹性的发条里，发条里储存的机械能不能突然消失，必须经过一定的时间通过指针的旋转逐渐释放出来，这个例子说明两个问题：一是能量建立的过程，二是能量储存或释放时都不能突变，必须经历一定的时间或过程。与此相仿，相互吸引的异性电荷相当于具有弹性的发条，要把正负电荷分开必须克服它们之间的吸引力而做功。当电源对电容器充电时，就是把原来呈中性的电容器极板上的正负电荷分离（如同给手表发条上弦），这时电源必须提供一定的能量去克服电荷间的吸引力（即库仑力 F ），把负电荷从电容器的一个极板迁移到另一个极板而做功，这样使一个极板上的负电荷逐渐增加而带负电，另一极板上负电荷逐渐减少而带正电。随着电荷的积

累，电容器两极板间就产生一定的电压（电位差），于是就建立了一定的电场，有了电场就有电场能量。根据能量守恒定律，这部分电场能量，只能由外电源克服电荷间相互作用力做功时转化而来的，这就是电容器中电场能量的由来。

磁场能量是怎样储存在线圈里的呢？设线圈的初始电流为零，磁场能量为零。当我们把线圈接通电源时，线圈中的电流就从零增大到某一定值 I （称原电流）。由电流产生的磁场随电流的增加而增加，变化的电流产生了变化的磁场，变化的磁场（或磁通）穿过自身线圈时就要在线圈导体中产生自感电动势 e_L ，若线圈是闭合的，则在线圈回路中还会产生与自感电动势 e_L 方向相同的感应电流 i 。根据楞次定律得知，自感电动势 e_L （或感应电流 i ）总是阻碍原电流的变化，当原电流增大时，自感电动势 e_L （或 i ）与原电流 I 的方向相反，企图阻止原电流增大，因此要使原电流由零增大到 I 值，外电源必须克服这个自感电动势而做功。外电源克服自感电动势做功必须消耗一部分电能，这部分电能就变成了磁能储存在线圈中，这就是线圈中磁场能的由来。综上所述，电容器的电场能量是由外电源克服电荷间的相互作用力做功转化而来的；线圈中的磁场能量是由外电源克服自感电动势做功转化而来的。电容器和线圈自身不会产生能量，它们在电路中的作用是对能量进行储存、转换、传递、调节和控制等。

2. 电场能量和磁场能量的计算式

电容器的电场能量计算式为：

$$W_C = \frac{1}{2} CU_0^2 \quad (1-1)$$

式中 W_C ——电容器的电场能量（焦）；

C ——电容器的电容值（法）；

U_0 ——电源电压（伏）。

线圈的磁场能量计算式为：

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1-2)$$

式中 W_L ——线圈的磁场能量（焦）；

L ——线圈的电感值（亨）；

i ——线圈中流过的电流（安）。

3. 电场能量和磁场能量在电路中的转换是可逆的。电容器充电时，外电源的能量被转换为电场能量，储存在电容中。放电时电容又把原先储存的能量还给电源或电路。与此相似，通入线圈的电流增加时，电流的能量被转换为磁场能量，储存在线圈中。电流减少时，线圈又把原先储入的磁场能量，通过电磁感应转换为电能退还给电源或电路。

1.2 静电场中的电介质和磁场中的磁介质

置于静电场中的绝缘材料称电介质，能影响磁场的物质叫做磁介质。下面讨论介质在外场的作用下所引起的变化。

1.2.1 极化现象与磁化现象

电介质按其分子的电结构可分为两类：一类是无极分子，如氢、氮等气体；另一类是

有极分子如水、有机酸等。无极分子的正负电荷“重心”重合，在无外电场作用时，完全呈现中性状态，如图1-2(a)所示。无极分子在受外电场作用时，分子的正负电荷的重心产生相对的位移，这种过程称为位移极化，如图1-2(b)所示。极化的电荷不能离开电介质，故属于束缚电荷，当外电场撤去时，正负电荷的“重心”又重合，恢复原中性状态，无极分子好似由弹性力联系着的两个异号电荷。有极分子的正负电荷“重心”不重合，相当于一个电偶极子，在无外电场作用时，由于分子的热运动，使电偶极子处于杂乱状态，对外不产生电场，呈现中性，如图1-3(a)所示；当有外电场作用时，部分有极分子随外电场转向，外电场越强，分子偶极子排列得越整齐，这种极化机制称为有极分子的取向极化，如图1-3(b)所示。当外电场方向改变时，有极分子的取向也随着改变；当外电场撤消后，由于分子的热运动，使它们的排列又变得杂乱无章，电介质又恢复到原来的中性状态。但也有些电介质如酒石酸钾钠在外电场撤去后仍能保持其极化状态，即有剩余电荷。应当指出，有极分子取向极化时，同时也发生位移极化，但前者的极化

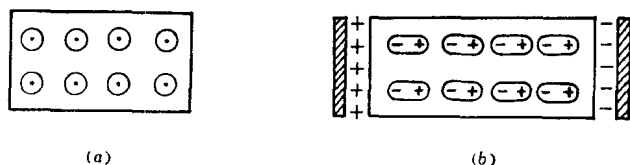


图 1-2 介质分子的电结构
(a) 中性状态的无极分子；(b) 无极分子的位移极化

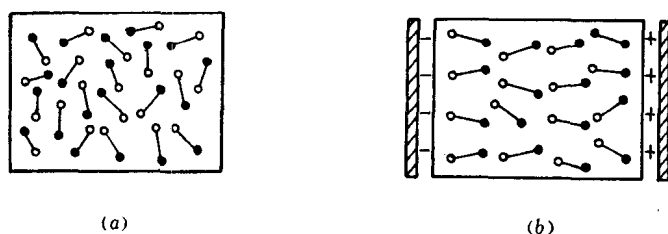


图 1-3 电偶极子
(a) 无外电场作用时；(b) 有极分子的取向极化

效应比后者强得多。在很高频率的电场作用下，分子的取向极化跟不上外电场的变化，这时只有很小部分的位移极化在起作用。

磁介质按其磁化的不同效果可分为顺磁质（如氧、锰等），反磁质（铜、铋、惰性气体等）和铁磁质（如铁、钴、镍、合金等），在这里我们主要研究铁磁质。试想用一个永久磁铁或电磁铁为什么能吸住铁块而对铜块却不产生吸力呢？这主要是内因不同。铁磁质里含有磁畴（或磁荷）而非铁磁质里不含磁畴。从微观角度看，磁畴是由运动的电荷产生的，它很像一个小磁铁。为了形象地说明问题，我们把磁畴称为小磁分子。在无外磁场作用时，铁磁质里的小磁分子处于杂乱无章状态，磁性互相抵消，对外不产生磁场，如图1-4(a)所示；在外磁场作用下，铁磁质里的小磁分子便按外磁场方向取向排列，在其内部产生很强的与外磁场方向相同的附加磁场，铁磁质呈现磁性的这种现象称为铁磁质被磁化，如图1-4(b)所示。磁化后若撤去外磁场，大部分磁介质的磁性也随之消失，这种磁介质称为软磁材料，如软铁、硅钢及坡莫合金等，常被用做交流电机、电器、变压器等的铁芯。有些铁磁质磁化后若撤去外磁场时，仍能保持

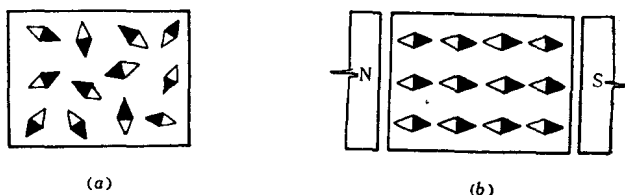


图 1-4 小磁分子
(a) 无外磁场时；(b) 在外磁场作用下

其磁化状态,即存有剩磁,这种磁介质称为硬磁材料,如碳钢、钨钢、钴钢等,常被用来做永久磁铁,许多电气设备中,如电话机、磁电式仪表等都用到永久磁铁。

1.2.2 原电(磁)场和附加电(磁)场

电介质极化时,在其内部产生的附加电场的方向总是与外电场(或称原电场)方向相反,故削弱了原电场,使总电场(或合成电场)减小。原电场减小的程度为 ϵ_r 倍,其表达式为:

$$E = \frac{E_0}{\epsilon_r} \quad (1-3)$$

式中 E_0 ——电荷在真空中产生的电场,即原电场(伏);

E ——电荷在电介质中产生的电场(伏);

ϵ_r ——相对介电系数。

磁介质(铁磁介质)磁化时,在其内部产生的附加磁场方向总是与外磁场方向相同,故增强了原磁场,使总磁场(或合成磁场)增大。原磁场增大的程度为 μ_r 倍,其表达式为:

$$B = \mu_r B_0 \quad (1-4)$$

式中 B_0 ——电流在真空中的磁感应强度(韦伯/米²);

B ——电流在铁磁介质中的磁感应强度(韦伯/米²);

μ_r ——相对导磁系数。

1.2.3 击穿现象和饱和现象

电介质在外电场增加到超过某一数值时会发生击穿现象,从而使绝缘体变成导体。击穿时有三种不同现象,即:游离击穿——发生在电介质中含有气泡处受强电场冲击游离作用而导致的击穿;电击穿——在强电场作用下,介质中为数不多的自由电子获得很大动能后撞击其它原子、离子等造成雪崩现象,使内部原子结构遭到破坏而导致的击穿;热击穿——是介质中热的平衡遭受破坏后引起的,易发生在具有高导电系数和介质损耗大的绝缘材料中。

铁磁介质在外磁场作用下,里面的小磁分子逐渐排列起来,外电场越强,参加排列的磁分子就越多越整齐,当外磁场增强到一定数值时,小磁分子已全部排列完毕,再增强外磁场也无小磁分子参加排列了,就是说铁磁介质的磁化已达到饱和程度,此时不论怎样增强外磁场,磁介质内所产生的附加磁场也不会增加了,但磁介质不会像电介质那样产生任何击穿现象。

1.2.4 介电系数和导磁系数

导磁系数(导磁率) μ 是表示磁介质对磁场影响程度的量。 μ 值大的磁介质在外磁场作用下被磁化的程度深,在其内部产生的附加磁场强,对外磁场影响(加强)程度大。即 μ 值越大,导磁能力越好。介电系数 ϵ 是表示电介质对电场影响程度的量。 ϵ 值大的电介质在外电场作用下被极化的程度深,在其内部产生的附加电场强,对外电场影响(减弱)程度大。对电容器来说, ϵ 值越大,极板上储存的电荷就会越多。

在研究电介质对电场的影响时，一般引用相对介电系数，它是无单位的量，在数值上等于：

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1-5)$$

式中 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ——为真空时的绝对介电系数；

ϵ ——为其它电介质的绝对介电系数；

ϵ_r ——为相对介电系数。

在研究磁介质对磁场的影响时，一般引用相对导磁系数，它也是无单位的量，在数值上等于：

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1-6)$$

式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ——为真空的绝对导磁系数；

μ ——为其它磁介质的绝对导磁系数；

μ_r ——为相对导磁系数。

电介质的介电系数是常数；铁磁介质的导磁系数不是常数，非铁磁介质的导磁系数是常数。

相对介电系数 ϵ_r 和相对导磁系数 μ_r

表 1-1

电 介 质 名 称	ϵ_r	磁 介 质 名 称	μ_r
空 气	1	非铁磁质(空气、铜)	1
云 母	3.7~7.5	铸 铁	200~400
瓷	5.7~8.5	铸 钢	500~2200
纸	3.5	硅 钢 片	几百~几千
纯 水	78~80	锰锌铁氧体	6000
钛 酸 钡	1000~10000	坡莫合金	100000

1.2.5 电介质损耗和铁磁介质损耗

将电容器和铁芯线圈接到交流电源上时，电容器中的电介质和线圈中的铁芯常常会发热，这是介质从电路中吸收一部分电能在其内部转换成热能而消耗的结果，前者叫电介质损耗，后者叫铁磁介质损耗，简称铁损。两种损耗的异同点比较如下：

电介质损耗的原因有两种：一种是由于电介质在交变电场作用下，被极化的分子（束缚电荷）随外电场方向的改变而来回翻转着（形成位移电流），故使介质中的分子热运动加剧，将一部分电能转变成热能消耗掉，这种损耗叫电滞损耗。另一种是漏电损耗，电介质虽是绝缘的，但并不是天衣无缝地绝对不漏电，电介质也存在漏电电阻，故仍有微弱电流（传导电流）流过漏电电阻产生热效应，将一部分电能转变成热能消耗掉。与此相似，铁磁介质损耗的原因也有两种：一种是铁磁介质在交变磁场的作用下，被磁化的小磁分子（磁畴）随外磁场方向的改变而来回翻转着，在这过程中外磁场不断克服磁介质内部的摩擦而作功，将一部分电能转换成热能，这种损耗叫磁滞损耗。另一种损耗是涡流损耗，即线圈中的铁芯在交变磁场的作用下，由于动磁生电，在铁芯中感应出一种像旋涡一样的电流，叫涡流，涡流流过铁芯电阻引起发热造成的电能损耗叫涡流损耗。

电介质损耗与介质的种类、体积及电源的频率、电压有关。与此相似铁磁介质损耗也与介质的种类、体积及电源的频率、电压（或磁感应强度）有关。

1.3 电场和磁场的动态关系

运动的电荷或电流称为动电，变化的磁通（如增加或减少）称为动磁。根据电磁学的基本定律得知：任何变化的电场会产生磁场，任何变化的磁场也会产生电场，在动态中二者是互相产生、互相影响、互相作用的，这就是电场和磁场的动态关系。下面从动电生磁和动磁生电两个方面进行分析比较。

1.3.1 动电生磁现象

1. 电流和磁场的方向——右手螺旋定则

电流和电流产生的磁场方向之间符合右手螺旋定则，这个定则的使用要根据导体的几何形状来确定。如图1-5(a)和(b)所示，拇指表示直导体和圆环导体中电流 I 的方向，则与拇指垂直的握紧的四指方向即为磁通 ϕ （穿过某截面的磁力线的总数）的方向。而螺旋管载流导体，如图1-5(c)所示，四指表示电流方向，拇指指向表示磁通（或磁场）方向。为达到正确使用目的，下面举几个练习。请读者在图中标出方向和极性，然后再对答案。

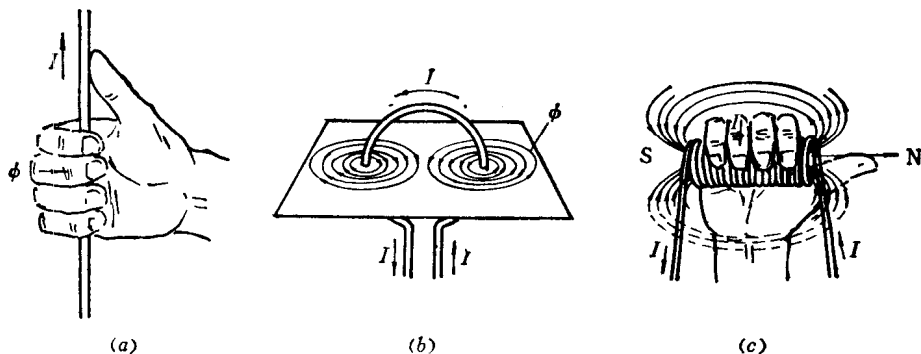


图 1-5 右手螺旋定则使用示意图

(a) 载流直导体；(b) 载流圆环导体；(c) 载流螺旋管导体

练习 I：如图1-6所示，标出载流直导体附近A和B点处的磁场方向。（答案：沿磁力线方向作A和B两点的切线）。

练习 II：如图1-7所示，标出A、B、C、D处的极性并画出磁力线的分布情况。（A—S极，B—N极，C—S极，D—N极。在磁铁外部，磁力线从N(B)极出发垂直穿入圆形铁芯，并垂直穿出铁心到S(C)极，在电磁铁内部由S极到N极，且总是闭合的。）

练习 III：如图1-8所示，在圆形铁芯(MG)上绕有三组线圈，引出六个接线头(A、B、C、D、E、F)，其中有一组线圈(AB)通以电流，其方向如图所示。试判断同名端。（同为高电位或同为低电位的端点叫同名端。在本题中从A端流入电流，该线圈的电流所产生的磁场方向是：G端为N极，M端为S极；假设在另外两个线圈中也通入电流，

所产生的磁场是互相加强的，即与前者方向一致，那么流入电流的一端为同名端，流出的一端也为同名端。 A 、 D 、 E 为同名端，标上同一个符号‘※’， B 、 C 、 F 也为同名端，标以同一个符号“ Δ ”， A 与 C 及 A 与 F 等都叫异名端。

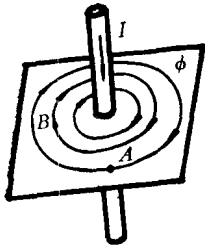


图 1-6 练习 I 图

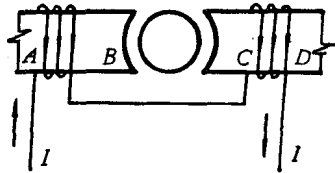


图 1-7 练习 II 图

练习 IV：如图1-9所示，标出电磁铁 A 端和 B 端的磁极极性，并画出磁力线的方向。（ A 端为 N 极， B 端为 S 极。磁力线在磁铁内部由 S 极到 N 极，在外部从 N 极到 S 极）。

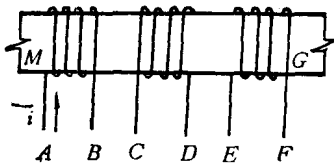


图 1-8 练习 III 图

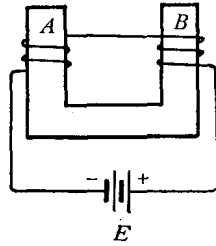


图 1-9 练习 IV 图

2. 磁场对载流导体的作用力——左手定则

两个磁场之间有作用力（同性磁极相斥，异性磁极相吸），而载流导体周围存在着磁场，所以把一根载流导体放进另一个磁场中去时，载流导体也要受到力的作用，这个力叫做电磁力。它的大小通过实验知道，在均匀磁场中，当导体与磁场方向垂直时，电磁力 F_m 的大小和导体所处的磁通密度 B （韦伯/米²），导体在磁场内的长度 l （米）和通过导体的电流 I （安）的乘积成正比，即

$$F_m = BIl \quad (\text{牛顿}) \quad (1-7)$$

在实际中遇到较多的是对电磁力 F_m 方向的判断，电磁力的方向与电流的方向有关，用左手定则判断。如图1-10所示。平伸左手，拇指与其余四指垂直，使手掌垂直向着磁力线方向，用四指指向电流的方向，则拇指所指的方向就是载流导体所受作用力的方向。

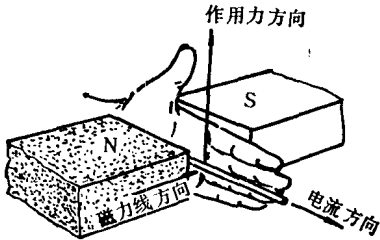


图 1-10 左手定则示意图

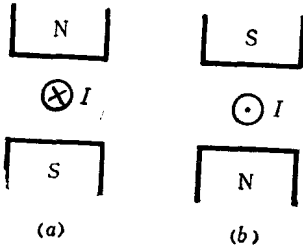


图 1-11 练习 I 题

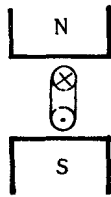


图 1-12 练习题 II

练习 I：如图1-11所示。⊗——表示处在磁场中的直导体的电流方向离开读者；⊙——表示电流流向读者。试标出载流导体受力的方向。（⊗和⊙两个载流导体受力的方向都向左）

练习 II：如图1-12所示，标出磁场中载流线圈受力或旋转方向。（按逆时针方向旋转）

1.3.2 动磁生电现象

只要磁场和导体之间发生相对（非平行）运动（如导体切割磁力线或变化的磁通穿过线圈时），在导体中就会产生电动势（或称导体生电），这种现象叫电磁感应，因电磁感应是动电生磁的逆变过程，所以又称动磁生电。

1. 动磁生电原理

如图1-13所示。取一段金属导体 AB 在均匀磁场 B 中，以速度 v 从左向右作切割磁力线运动，金属里的自由电子随着导体一起运动，这种自由电子的运动可以看成是与运动方向相反的电流（正电荷运动方向）。根据左手定则判断，导体里的正电荷受到的电磁力向下，因为是运动电荷受力，所以在这里把电磁力称为洛伦兹力，用 F_m 表示（又称电源力或局外力）。自由电子向 A 端移动，于是在导体两端聚集起等量异性电荷，导体内便出现电场，产生了电位差，叫感应电动势，其正方向由负电荷指向正电荷。随着两端电荷的出现，对正在分离的电荷又受到一个与洛伦兹力 F_m 相反的电场力 F 的作用，电场力 F 随着两端电荷的增多而增大，当增大到与洛伦兹力相等时，电荷便停止分离，两端电荷不再增加，这时在磁场中运动的导体就变成了电源。如果将导体的 A 端和 B 端接上负载， B 端的正电荷（实际是自由电子在流动）就要通过负载将电能转换成其它形式的能，然后到达 A 端与负电荷中和，这时因两端电荷减少，电场力 F 又小于洛伦兹力 F_m ，正负电荷又开始分离（前提是导体在磁场中必须运动），补充减少的电荷，使电位差（电动势）保持不变，电路中才能维持恒定的电流。动磁生电的原理实际上就是发电机发电的原理，也就是电源内部工作的物理过程。

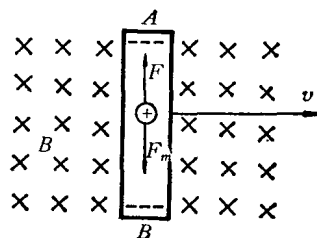


图 1-13 导体切割磁力线

2. 直导体中的感应电动势——右手定则

当导体在均匀磁场中，沿着与磁力线垂直的方向运动时，所产生的感应电动势的大小，与导体的有效长度 l 、导体的运动速度 v 、磁通密度 B （又称磁感应强度）成正比，即

$$e = Blv \text{ (伏)} \quad (1-8)$$

感应电动势 e 的方向用右手定则判断，如图1-14所示，平摊右手，让磁力线垂直穿过手掌，使拇指表示导体运动的方向，则与拇指垂直的四指就是感应电动势 e 的方向。

练习 I：图1-15表示一方框形线圈在均匀磁场中运动，试分别画出各线圈中的感应电动势的方向（答案：在图(a)中， $\overline{ab}$ 、 $\overline{bc}$ 和 $\overline{dc}$ 边不切割磁力线，所以不产生感应电动势。 $\overline{ad}$ 边按右手定则判断，感应电动势的方向是上正下负。图(b)中，方框线圈在均匀磁场中由实线位置运动到虚线位置，方框线圈中总的感应电动势为零。因为 $\overline{ab}$ 和 $\overline{dc}$ 边不切割磁力线，故不产生感应电动势。而 $\overline{ad}$ 和 $\overline{bc}$ 两个边根据右手定则判断，产生的两个感应电

动势其大小相等，方向相反，互相抵消。)

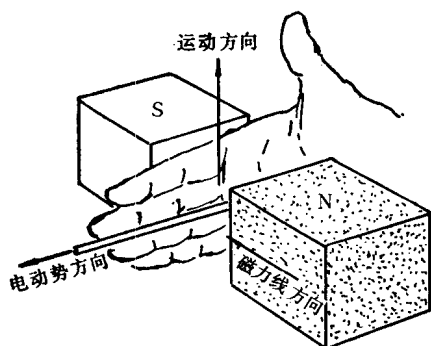
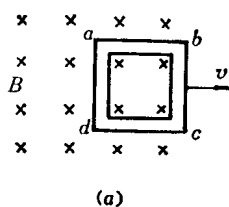
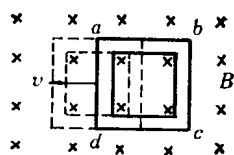


图 1-14 右手定则示意图



(a)



(b)

图 1-15 练习 I 题

练习 II：如图1-16所示，一对磁极正在按逆时针方向旋转，试画出开口线圈中的感应电动势的方向，并标出线圈两头的极性。(答案：感应电动势在线圈中按顺时针方向，线圈两头的极性是上负下正。)

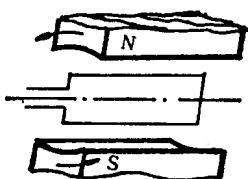


图 1-16 练习 II

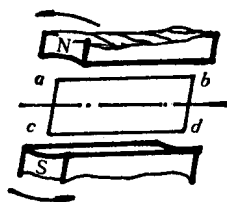


图 1-17 练习 III

练习 III：如图1-17所示，如果线圈是闭合的，问当磁极以逆时针方向旋转时，线圈能否旋转？朝那一方向旋转？为什么？(答案：根据相对运动，闭合线圈的两个边 $\overline{ab}$ 和 $\overline{cd}$ 应和磁极运动方向相反，根据右手定则判断， $\overline{ab}$ 边的感应电流为 $\otimes$ （离开读者）， $\overline{cd}$ 边的感应电流应为 $\odot$ （指向读者），即闭合线圈中形成的感应电流按顺时针方向流动；再根据左手定则判断，闭合线圈应和磁极旋转方向一样，即按逆时针方向旋转。

3. 线圈中的感应电动势——楞次定律

只要穿过线圈的磁通 ϕ （称原磁通）发生变化，在线圈中就会产生感应电动势 e 。感应电动势的方向用楞次定律判断。其内容是：线圈中感应电动势 e 的方向总是企图使它所产生的感应电流 i 反抗原有磁通 ϕ 的变化。也就是说，当原磁通 ϕ 要增加时，感应电流 i 产生的新磁通 ϕ' 要反抗它的增加；当原磁通 ϕ 要减少时，感应电流产生的新磁通 ϕ' 又要反抗它的减少。这个规律就叫做楞次定律。

例如在图1-18(a)中，当把磁铁插入线圈时，穿过线圈中的原磁通 ϕ 就会增加，根据楞次定律，感应电流 i 产生的新磁通 ϕ' 总要阻碍原磁通 ϕ 的增加，故知新磁通 ϕ' 的极性和原磁通 ϕ 的极性相反，这时再用右手螺旋定则，以拇指表示新磁通 ϕ' 的方向，则四指所指方向即为感应电流 i 的方向，在线圈中感应电动势 e 和感应电流的方向是一致的，它的极性是上正下负。