

世纪电源网·论坛 赠品

开关电源中的 磁性元件

KAIGUANDIANYUAN
ZHONGDE
CIXINGYUANJIAN

赵修科 主编

辽宁科学技术出版社

开关电源中的磁性元件

赵修科 主编

辽宁科学技术出版社

沈 阳

图书在版编目 (CIP) 数据

开关电源中的磁性元件 / 赵修科主编. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2014.2

ISBN 978-7-5381-8459-4

I. ①开… II. ①赵… III. ①开关磁芯 IV. ①TM271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 012711 号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 29 号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳天正印刷厂

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 12.5

字 数: 300 千字

印 数: 1 ~ 2000

出版时间: 2014 年 2 月第 1 版

印刷时间: 2014 年 2 月第 1 次印刷

责任编辑: 韩延本

封面设计: 杜 江

版式设计: 于 浪

责任校对: 李淑敏

书 号: ISBN 978-7-5381-8459-4

定 价: 45.00 元

联系电话: 024-23284354

邮购热线: 024-23284502

<http://www.lnkj.com.cn>

前 言

一台开关电源的体积和功率损耗的25%~30%都是磁性元件。磁性元件设计是开关电源设计最主要的工作之一。

磁性元件——电感器和变压器与其他电气元件不同，使用者很难采购到符合自己电路设计要求的电感器和变压器。对于工业产品，应当有一个在规定范围内通用的规范化的参数，这对磁性元件来说是非常困难的。而表征磁性元件的大多数参数（电感量、电压、电流、处理能量、频率、匝比、漏感、损耗）对制造商是无所适从的。相反，具体设计一个磁性元件在满足电气性能条件下，可综合考虑成本、体积、重量和制造的困难程度，在一定的条件下可获得较满意的结果。

由于很难从市场上购得标准的磁性元器件，开关电源设计的大部分工作就是磁性元件的设计。有经验的开关电源设计者深知，开关电源设计的成败在很大程度上取决于磁性元件的正确设计和制作。高频变压器和电感固有的寄生参数，引起电路中各式各样的问题，例如高损耗、必须用缓冲或箝位电路处理的高电压尖峰、多路输出之间交叉调节性能差、输出或输入噪声耦合和占空度范围限制等，对刚刚进入开关电源领域的工程师往往不知所措。

磁性元件的分析和设计比电路设计复杂得多，要直接得到唯一的答案是困难的。因为要涉及到许多因素，因此，设计结果绝不是唯一合理的。例如，不允许超过某一定体积，有几个用不同材料的设计可以满足要求，但如果进一步要求成本最低，则限制了设计的选择范围。因此，最优问题是多目标的，相对的。或许是最小的体积，最低成本，或许是最高效率等。最终的解决方案与主观因素、设计者经验和市场供应情况有关。另一方面，正确的设计不只是一般电路设计意义上的参数计算，还应当包含结构、工艺和散热等设计，而且是更重要的设计。高频开关电源的很多麻烦是由于磁性元件工艺、结构和制造不合理引起的。

尽管磁性元件设计结果是相对的，不是唯一的。但至少设计结果应当是合理的。因此，开关电源设计者应当有比较好的工程电磁学基础。遗憾的是在现今中等专业学校和高等院校中，工程电磁基础理论涉及的太少，尤其是应用于开关电源实际的磁的概念更少提及。为此，编著者只能首先向读者介绍最基本的电磁概念，然后复习磁性元件在电路中的基本关系，继而介绍磁性材料性能和选用，以及高频条件下磁性元件工作的特殊问题和磁性元件设计的一般方法和工艺结构。给初学者提供初步理论依据和经验数据，为进入“黑色艺术殿堂”打下必要的基础，并通过自己的不断实践，不断总结经验，成为开关电源磁性元件工程设计专家不是没有可能的。

本书的电子版在网上发布后，受到广大开关电源工作者和网友的欢迎。编著者和同仁以该书为主要参考教材，先后应邀为各大电源企业、研究所培训数十场。电源工程师仍希望出版该书放在案头，以便随时翻阅。为此，编著者认真通览全书，对书中的明显错误和不当之处作了修改，补充了一些设计例子，基础部分还补充了思考题，以加强对基础理论的理解。尽管如此，该书定名《开关电源中的磁性元件》仍有些名不符实。开关电源中还包含平面变压器、集成磁性元件、EMC滤波电感设计等没有涉及。但编著者相信，读者如果具备了扎实的工程电磁理论基础，掌握这些方面技术是不会有困难的。再者，编著者已经老朽，心有余而力不足，只能以“有缺憾才是美”来自嘲。

本书由丁道宏教授主审，并提出了不少宝贵的意见。詹晓东老师提供了不少有益的资料，给予很大帮助，邢岩教授、周洁敏研究员、陈乾宏教授、陶思钰、谢勇、方宇、张先玲、林勇、赵小娟、侯玉琨等参与了部分写作工作，网友和培训学员也提出了不少信息和建
议，在此一并表示衷心的感谢。

尽管编著者认真仔细地通览全书，尽量避免偏见和谬误，但由于学术水平有限，错误和不当在所难免，望读者不吝指正。

编著者

2013年12月 南京

目 录

前言	001
1 磁的基本概念	001
1.1 磁的基本现象	001
1.2 电流与磁场	002
1.3 磁的单位和电磁基本定律	003
1.3.1 磁感应强度 (B —磁通密度)	003
1.3.2 磁通 (ϕ)	003
1.3.3 磁导率 (μ) 和磁场强度 $\dot{H}$	004
1.3.4 安培环路定律	005
1.3.5 电磁感应定律	006
1.3.6 电磁能量关系	007
本章要点	008
习题	008
2 电路中的磁性元件	010
2.1 自感	010
2.2 互感	011
2.2.1 线圈之间的互感	011
2.2.2 互感系数	011
2.2.3 互感电动势	011
2.2.4 互感电路	012
2.3 变压器	015
2.3.1 变压器空载	016
2.3.2 变压器负载状态	016
2.3.3 变压器等效电路	017
本章要点	018
习题	019
3 磁路和电感计算	020
3.1 磁路的欧姆定律	020
3.2 磁芯磁场和磁路	022
3.2.1 无气隙磁芯磁场	022
3.2.2 E型磁芯磁场和等效磁路	025
3.2.3 气隙磁导的计算	026
3.3 电感计算	031
3.3.1 导线和无磁芯线圈的电感计算—经验公式	031
3.3.2 磁芯电感	037

本章要点	040
习题	040
4 软磁材料	041
4.1 磁性材料的磁化	041
4.2 磁材料的磁化曲线	041
4.2.1 磁性物质磁化过程	041
4.2.2 饱和磁滞回线和基本参数	042
4.3 磁芯损耗	044
4.3.1 磁化能量和磁滞损耗 P_h	044
4.3.2 涡流损耗 P_e	045
4.3.3 剩余损耗 P_r	046
4.4 磁化曲线的测量和显示	047
4.4.1 测试原理和电路	047
4.4.2 磁化曲线的显示	048
4.5 相对磁导率 μ_r	049
4.5.1 最大磁导率 μ_m	050
4.5.2 初始磁导率 μ_i	050
4.5.3 增量磁导率 μ_Δ	050
4.5.4 有效磁导率 μ_e	050
4.5.5 幅值磁导率 (μ_a)	051
4.6 常用软磁材料	051
4.6.1 对软磁材料的要求	051
4.6.2 合金磁材料	052
4.6.3 磁粉芯	057
4.6.4 软磁铁氧体材料	059
4.7 软磁材料的选用原则	063
本章要点	063
习题	064
5 变换器中磁芯的工作要求	065
5.1 I 类工作状态—Buck 变换器滤波电感磁芯	065
5.2 II 类工作状态—正激变换器变压器	068
5.3 III 类工作状态—推挽型变换器中变压器	070
5.3.1 输出交流时逆变器中的变压器	070
5.3.2 SPWM 交流输出滤波电感	073
5.3.3 直流输出时变压器的工作状态	074
5.4 II—III 类工作状态—磁放大器磁芯工作状态	075
5.4.1 磁放大器原理	075
5.4.2 实际应用举例	077
本章要点	078

习题	078
6 线圈	079
6.1 变压器线圈的漏感	079
6.1.1 典型变压器磁芯的漏感分析	079
6.1.2 其他结构的漏磁	081
6.1.3 减少漏磁的主要方法—线圈交错绕	081
6.2 集肤效应	082
6.3 线圈磁场和邻近效应	084
6.4 邻近效应对多层线圈的影响	086
6.4.1 多层线圈	086
6.4.2 线圈的并联	090
6.4.3 被动损耗	091
6.5 线圈结构	092
6.5.1 绝缘、热阻和电流密度	093
6.5.2 计算有效值电流	095
6.5.3 窗口充填系数 k_w	097
6.5.4 电路拓扑	098
6.6 线圈间电容和端部电容	098
本章要点	100
习题	101
7 功率变压器设计	103
7.1 变压器设计一般问题	103
7.1.1 变压器功能	103
7.1.2 变压器的寄生参数及其影响	103
7.1.3 温升和损耗	103
7.1.4 充填系数 k_w	105
7.1.5 电路拓扑	106
7.1.6 频率	106
7.1.7 占空度	106
7.1.8 匝数和匝比选取	107
7.1.9 磁通偏移	110
7.1.10 磁芯选择	111
7.2 变压器设计基本步骤	116
8 电感和反激变压器设计	120
8.1 应用场合	120
8.1.1 输出滤波电感 (Buck)	121
8.1.2 Boost 和 Boost/Buck 电感	122
8.1.3 反激变压器	123
8.1.4 耦合滤波电感	124

8.2	损耗和温升	126
8.3	磁芯	126
8.3.1	磁芯气隙	126
8.3.2	散磁引起的损耗	128
8.3.3	扩大电感磁通摆幅	128
8.3.4	磁芯材料和形状	129
8.3.5	决定磁芯尺寸	129
8.4	电感计算	131
8.4.1	气隙磁芯电感	131
8.4.2	利用电感系数 A_L 计算电感	132
8.5	电感设计	133
8.5.1	设计步骤	133
8.5.2	举例—Buck输出滤波电感	134
8.5.3	反激变压器电感设计	137
8.5.4	非线性电感	145
9	特殊磁性元件	147
9.1	电流互感器	147
9.1.1	交流互感器	147
9.1.2	脉冲直流互感器	150
9.2	磁调节器和尖峰抑制器设计	154
9.2.1	矩形磁芯基本特性	154
9.2.2	磁放大器设计	155
9.2.3	噪声抑制磁芯	157
10	基础资料	160
10.1	单位制和转换关系	160
10.2	导线数据	161
10.2.1	漆包线规格、绝缘和耐压	161
10.2.2	英制导线规格及公制转换	163
10.2.3	铜带 GB 2059—1989	164
10.3	铁氧体	165
10.3.1	国产铁氧体材料特性	165
10.3.2	铁氧体尺寸规格	166
10.3.3	国内外铁氧体材料对照	169
10.4	磁粉芯	176
10.4.1	磁粉芯的主要性能和规格	176
10.4.2	磁粉芯电感估算	176
10.4.3	国内外磁粉芯规格	176
10.5	矩形磁滞回线磁芯	178
10.5.1	非晶合金	178

10.5.2	噪声抑制器件	179
10.5.3	矩形磁滞回线铁氧体磁芯	179
10.6	绝缘（详见《电子变压器设计手册》）	180
10.6.1	线圈端部处理—留边距离 Z 、端空距离 d	180
10.6.2	内层绝缘（线圈骨架到磁芯）、绕组间绝缘	180
10.6.3	线圈的裹覆、端封和灌注方式的选择	181
10.6.4	出头绝缘距离	182
10.6.5	工艺	182
10.7	磁性元件相关标准	182
10.7.1	国家标准	182
10.7.2	部分国际标准	184
附录	本书常用符号	187
参考文献		188

1 磁的基本概念

磁性是某些物质的特殊的物理性能，中国人最早利用这一性质发明了指南针。从19世纪到20世纪初，麦克司韦、楞次、法拉第和安培等科学家建立了电磁场理论和电磁基本定律，奠定了现代电磁科学发展基础。在工程上，主要是应用电磁的两个基本定律—全电流定律和电磁感应定律。

由于推演方法的不同，电磁计量存在两种不同的计量单位制—国际单位制（SI制，或有理化单位制或MKS制，即米—千克—秒制）和实用单位制（或非有理化单位制，CGS制，即厘米—克—秒制）。英美通常应用CGS制，而我国使用MKS制。

1.1 磁的基本现象

自然界中有一类物质，如铁、镍和钴，在一定的情况下能相互吸引，这种性质我们称它们具有磁性。使它们具有磁性的过程称之为磁化。能够被磁化或能被磁性物质吸引的物质叫作磁性物质或磁介质。

能保持磁性的磁性物质称为永久磁铁。磁铁两端磁性最强的区域称为磁极。将棒状磁铁悬挂起来，磁铁的一端会指向南方，另一头则指向北方。指向南方的一端叫作南极S（South），指向北方的一端叫作北极N（North）。如果将一个磁铁一分为二，则生成两个各自具有南极和北极的新的磁铁。南极或北极不能单独存在。

如果将两个磁极靠近，在两个磁极之间产生作用力—同性相斥和异性相吸。磁极之间的作用力是在磁极周围空间转递的，这说明在磁极周围空间存在着磁力作用的特殊物质，我们称之为磁场。磁场与物体的万有引力场、电荷的电场一样，都具有一定的能量。但磁场还具有本身的特性：

- （1）载导体或运动电荷在磁场中受到作用力；
- （2）载导体在磁场中运动时要做功。

为形象化描述磁场，把小磁针放在磁铁附近，在磁力的作用下，小磁针排列成如图1-1（a）所示的形状。从磁铁的N极到S极小磁针排成一条光滑的曲线，此曲线称为磁力线（图1-1（b）），或称为磁感应线，或磁通线。我们把N极指向S极方向定义为磁力线正方向。磁力线在磁铁的外部都是连续的，是一个闭合曲线。曲线每一点的切线方向就是磁场方向。在磁铁内部是S极指向N极。以下用磁力线方向代表磁场正方向。磁力线的多少代表磁场的强弱，例如在磁极的附近，磁力线密集，就表示这里磁场很强；在两个磁极的中心面附近磁力线很稀疏，表示这里磁场很弱（图1-1（c））。但是，应当注意，磁场中并不真正存在这些实在的线条，也没有什么物理量在这些线条中流动，只是在概念上形象地说明磁现象。

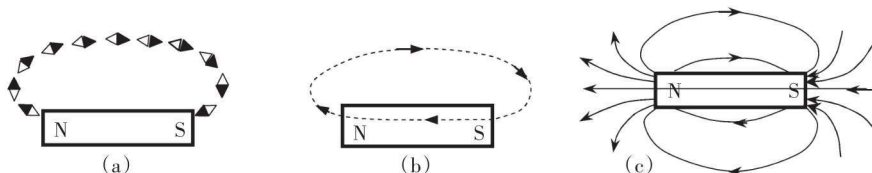


图 1-1 永久磁铁的磁场

1.2 电流与磁场

将载导体或运动电荷放在磁场中，载导体受到磁场的作用力，这说明电流产生了磁场。由此产生的磁场和磁体一样受到磁场的作用力。现代物理研究表明，物质的磁性也是电流产生的。永久磁铁的磁性就是分子电流产生的。所谓分子电流，是磁性材料原子内的电子围绕原子核旋转和自转所形成的。电子运动形成一个个小的磁体，这些小磁体在晶格中排列在一个方向，形成一个个小的磁区域—磁畴。可见电流和磁场是不可分割的，即磁场是电流产生的，而电流总是被磁场所包围。

运动电荷或载导体产生磁场。根据实验归纳为安培定则，即右手定则，如图 1-2 所示。右手握住导线，拇指指向电流流通方向，其余四指所指方向即为电流产生的磁场方向，如图 1-2 (a) 所示；如果是螺管线圈，则右手握住螺管，四指指向电流方向，则拇指指向就是磁场方向，如图 1-2 (b) 所示。

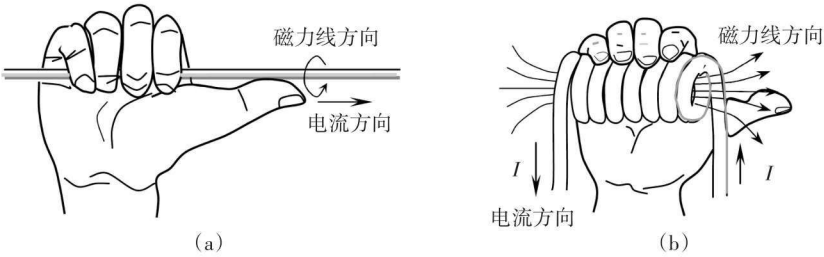


图 1-2 右手定则

图 1-3 给出了围绕两根平行载导体的磁场，每根导体流过相等的电流，但方向相反，即一对连接电源到负载的导线。实线代表磁通，而虚线代表磁场等位面（以后说明）的截面图。每根导线有独立的磁场，磁场是对称的，并从导线中心向外径向辐射开来，磁场的强度随着离导体的距离增加反比减少。因为产生场的电流方向相反，两个场数值是相等的，但极性相反。两个场叠加在一起，在导线之间区域相互加强，能量最大。而在导线周围的其他地方，特别是远离两导线的外侧磁场强度相反，且近乎相等而趋向抵消。

图 1-4 给出了空心线圈磁场。每根导线单个的场在线圈内叠加产生高度集中和线条流畅的场。在线圈外边，场是发散的，并且很弱。虽然存储的能量密度在线圈内很高，在线圈以外的弱磁场中，还存储相当大的能量，因为体积扩展到无限大。

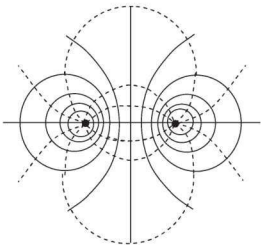


图 1-3 围绕双导体的场

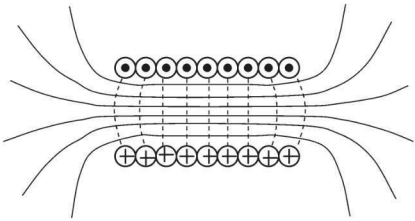


图 1-4 空心线圈

磁场不能被“绝缘”物体与它的周围隔离开来—磁“绝缘”是不存在的。但是，磁场可以被短路—将图 1-4 的载流线圈放到一个铁盒子中去，盒子提供磁力线返回的路径，盒子将线圈磁场与外边隔离开来，即铁盒子屏蔽了线圈磁场。

1.3 磁的单位和电磁基本定律

为了工程计算，磁场有如下几个物理量。

1.3.1 磁感应强度 (B —磁通密度)

为了测量磁场的强弱，可通过电磁之间作用力来定义。用单位长度 l (1m) 的导线，放在均匀的磁场中，通过单位电流 I (1A) 所受到的力 F (N) 的大小 ($\dot{B} = \dot{F}/Il$) 表示磁场的强弱—磁感应强度 ($\dot{B}$)。它表示磁场内某点磁场的强度和方向的物理量。 $\dot{B}$ 是一个矢量。力 $\dot{F}$ 、电流 I (在导线 l 内流通) 和磁感应强度 $\dot{B}$ 三者之间是正交关系，通常用左手定则确定：伸开左手，四手指指向电流方向，拇指指向力的方向，则磁场指向手心。如果磁场中各点的磁感应强度是相同的且方向相同，则此磁场是均匀磁场。如图 1-5 所示。

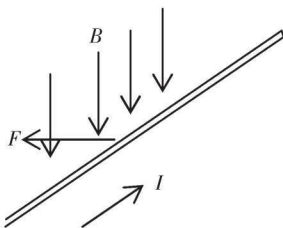


图 1-5 磁场中载流导体受力与电流、磁场强度关系

$\dot{B}$ 的单位在国际单位制 (SI) 中是特斯拉 (Tesla)，简称特，代号为 T。如果长 1m 的导体，垂直于磁场方向通过 1A 电流，如果导体受到 1N 的力，则磁感应强度为 1T。在电磁单位制 (CGS) 中为高斯，简称高，代号为 Gs。两者的关系为 $1\text{T} = 10^4\text{Gs}$ 。

1.3.2 磁通 (ϕ)

垂直通过一个截面的磁力线总量称为该截面的磁通量，简称磁通。用 ϕ 表示。通常磁场方向和大小在一个截面上并不一定相同 (图 1-6 (a))，则通过该截面积 A 的磁通用面积分求得

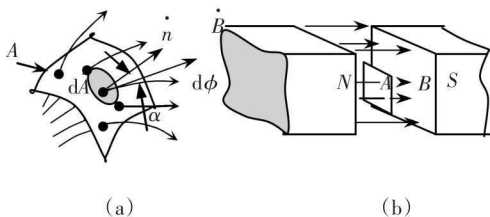


图 1-6 穿过某一截面的磁通

$$\phi = \int_A d\phi = \int_A B \cos \alpha dA$$

或

$$\phi = \int_A \dot{B} dA$$

式中： $d\phi$ —通过单元 dA 截面积的磁通；

α —截面的法线与 $\dot{B}$ 的夹角。

在一般磁芯变压器和电感器中，给定结构磁芯截面上，或端面积相等的气隙端面间的磁

场 $\vec{B}$ 基本上是均匀的（图 1-6（b）），则磁通可表示为

$$\phi = BA \quad (1-1)$$

磁通是一个标量。它的单位在 SI 制中为韦伯，简称韦，代号为 Wb，可由 B 和 A 的单位导出

$$1 \text{ (Wb)} = 1 \text{ (T)} \times 1 \text{ (m}^2\text{)}$$

在 CGS 单位制中，磁通单位为麦克斯韦，简称麦，代号为 Mx。而

$$1 \text{ Mx} = 1 \text{ Gs} \times 1 \text{ cm}^2$$

因为 $1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs}$ ， $1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2$ ，则

$$1 \text{ Mx} = 10^{-8} \text{ Wb}$$

在均匀磁场中，磁感应强度可以表示为单位面积上的磁通，由式（1-1）可得

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (1-2)$$

所以，磁感应强度也可以称为磁通密度。因此，磁通密度的单位特斯拉也可用韦/米²表示，可见

$$1 \text{ Gs} = 1 \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2 = 1 \times 10^{-8} \text{ Wb/cm}^2$$

因为磁力线是无头无尾的闭合线，因此，对于磁场内任意闭合曲面，进入该曲面的磁力线应当和穿出该曲面的力线数相等，所以穿过闭合曲面磁通总和为 0，称为高斯定理。

1.3.3 磁导率 (μ) 和磁场强度 $\vec{H}$

1.3.3.1 磁介质的磁导率 (μ) 和磁场强度 ($\vec{H}$)

电流产生磁场，但电流在不同的介质中产生的磁感应强度是不同的。例如，在相同条件下，铁磁介质中所产生的磁感应强度比空气介质中大得多。为了表征这种特性，将不同的磁介质用一个系数 μ 来考虑， μ 称为介质磁导率，表征物质的导磁能力。介质的 μ 越大，相同电流在介质中产生的磁感应强度 B 就越大。

真空中的磁导率一般用 μ_0 表示。空气、铜、铝和绝缘材料等非磁材料的磁导率和真空磁导率大致相同。而铁、镍、钴等铁磁材料及其合金的磁导率都比 μ_0 大 $10 \sim 10^5$ 倍。

最初，将真空磁导率 μ_0 定为 1，其他材料的磁导率实际上是真空磁导率的倍数。沿用了很长时间，并影响到一些基本关系式的表达，就是在公式中经常出现的 4π ，现在英、美还在应用，这就是非合理化单位制（CGS 制）的来由。但是，近代物理经过测试，实际真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。因此，其他材料的实际磁导率应当是原先磁导率乘以 μ_0 。因为在 μ_0 中包含了 4π ，这样在所有表达电磁关系的公式中没有了讨厌的 4π ，形成了所谓合理化单位制（MKS 制）。这里将其他材料磁导率高于真空磁导率的倍数称为相对磁导率 μ_r 。

1.3.3.2 磁场强度 ($\vec{H}$)

用磁导率表征介质对磁场的影响后，磁感应 $\vec{B}$ 与 μ 的比值只与产生磁场的电流有关。即在任何介质中，磁场中的某点的 $\vec{B}$ 与该点的 μ 的比值定义为该点的磁场强度 $\vec{H}$ ，即

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (1-3)$$

$\vec{H}$ 也是矢量，其方向与 $\vec{B}$ 相同。

类似于磁力线描述磁场，磁场强度也可用磁场强度线表示。但与磁力线不同，因为它不一定是无头无尾的连续曲线，同时在不同的介质中，由于磁导率 μ 不一样， $\vec{H}$ 在边界处发生突变。

应当指出的是所谓某点磁场强度大小，并不代表该点磁场的强弱，代表磁场强弱是磁感应强度 $\dot{B}$ 。比较确切地说，矢量 $\dot{H}$ 应当是外加的磁化强度，它与磁化的电流有关。引入 $\dot{H}$ 主要是为了便于磁场的分析计算。

1.3.4 安培环路定律

安培发现在电流产生的磁场中，矢量 $\dot{H}$ 沿任意闭合曲线的积分等于此闭合曲线所包围的所有电流的代数和（图1-7），即

$$\oint_l \dot{H} d\vec{l} = \oint_l H \cos \alpha dl = \sum I \quad (1-4)$$

式中： $\dot{H}$ —磁场中某点A处的磁场强度；

$d\vec{l}$ —磁场中A点附近沿曲线微距离矢量；

α — $\dot{H}$ 与 $d\vec{l}$ 之间的夹角；

$\sum I$ —闭合曲线所包围的电流代数和。

电流方向和磁场方向的关系符合右螺旋定则。如果闭合回线方向与电流产生的磁场方向相同，则为正。反之为负。式（1-4）称为安培环路定律，或称为全电流定律。

图1-7（a）环路包围只有 I ，所以 $\sum I = I$ ，而图1-7（b）环路包围的是正的 I_1 和负的 I_2 ，尽管图中有 I_3 存在，但它不包含在环路之内，所以 $\sum I = I_1 - I_2$ 。

以环形线圈为例（图1-8）来说明安培定律的应用。环内的介质是均匀的，线圈匝数为 N ，取磁力线方向作为闭合回线方向，沿着以 r 为半径的圆周闭合路径 l ，根据式（1-4）的左边可得到

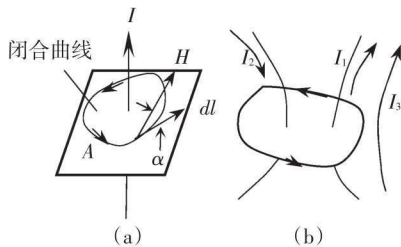


图1-7 安培环路定律

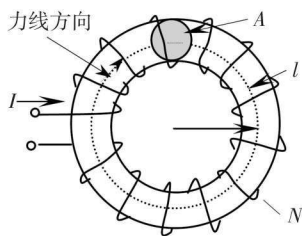


图1-8 环形线圈

$$\oint \dot{H} d\vec{l} = Hl = 2\pi r \times H \quad (1-5)$$

方程的右边

$$\sum I = IN$$

因此

$$H \times 2\pi r = Hl = IN \quad (1-6)$$

则半径 r 处的磁场强度

$$H = \frac{IN}{2\pi r} = \frac{IN}{l} \quad (\text{A/m}) \quad (1-7a)$$

式中： r —环的平均半径（m），如果环的内径与外径之比接近1，认为环内磁场是均匀的， $l = 2\pi r$ 为磁路的平均长度；

N —线圈匝数；

I —线圈流过的电流。

在SI制中，磁场强度的单位为安/米，代号为A/m。标准磁场强度是这样来定义的：导线构成直径为1m的圆环，流过导线的电流为1A，则垂直圆平面圆心的磁场强度为1A/m。

在CGS制中，路径长度为厘米（cm），电流为安培（A），磁场强度单位为奥斯特，代号为Oe。环形磁介质中磁场强度，式（1-7a）改写为

$$H = \frac{IN}{2\pi r} = \frac{0.4\pi IN}{l} \quad (\text{Oe}) \quad (1-7b)$$

它和A/m之间的关系为

$$1\text{A/m} = 1 \times 10^{-2} \text{A/cm} = 0.4\pi \times 10^{-2} \text{Oe}$$

即

$$1\text{A/cm} = 0.4\pi \text{Oe}$$

可以看到，磁场强度 H 与包含的电流 NI 成正比，与路径 l 成反比。环的内圆周周长比外周长短，因此，内圆周磁场强度比外圆周磁场强度大，环内磁场强度是不均匀的。事实上，几乎所有磁元件内磁场强度都是不均匀的。对于磁环，如果内径与外径相差较大，可以用下式计算平均长度

$$l = \frac{2\pi(r_2 - r_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1-8)$$

工程上，磁路中磁感应 $\dot{B}$ 经常与截面垂直，磁场强度 $\dot{H}$ 方向与平均路径一致，故在以后的各章中， $\dot{B}$ 和 $\dot{H}$ 不再用矢量表示。

由式（1-7）、（1-3）可见， H 与电流大小、匝数和闭合路径有关，而与材料无关。

式（1-6）中线圈电流和匝数的乘积 IN 称为磁动势 F ，即

$$F = IN$$

由此产生磁通，它的单位是安培（A）。

在引出磁场强度以后，根据式（1-3）得到

$$\mu = \frac{\dot{B}}{\dot{H}}$$

由此得到磁导率 μ 的单位：

$$\mu \text{的单位} = \frac{\text{Wb/m}^2}{\text{A/m}} = \frac{\text{V} \cdot \text{S}}{\text{A} \cdot \text{m}} = \frac{\Omega \cdot \text{S}}{\text{m}} = \text{H/m} \quad (\text{亨/米})$$

在SI制中是亨/米，代号为H/m。在CGS制中是高/奥，与SI制关系为

$$1\text{H/m} = \frac{10^7}{4\pi} \text{Gs/Oe}$$

由实验测得，真空磁导率为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m} = 0.4\pi \times 10^{-8} \text{H/cm}$$

在CGS制中， μ_0 的单位为高/奥，数值为1。

因为真空磁导是不变的，常常使用磁介质磁导率相对于真空磁导率倍数来表示，称为相对磁导率 μ_r ，

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

在CGS制中 $\mu_0=1$ ，磁介质磁导率 μ 在数值上与SI制中 μ_r 相同。

1.3.5 电磁感应定律

由实验可知，如果一个条形磁铁插向线圈中（图1-9）时，接在线圈两端的电流表指针将发生偏转；如果磁铁不动，则电流表指针不转动。如果将磁铁从线圈中取出，电流表指针与插入时相反方向偏转。由此可见，当通过线圈的磁通发生变化时，不论是什么原因引起的变化，在线圈两端就要产生感应电动势。而且磁通变化越快，感应电动势越大，即感应电动

势的大小正比于磁通的变化率,对于1匝线圈,即

$$e = \left| \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \right|$$

如果是一个 N 匝线圈,每匝的磁通变化如果相同,相同的感应电势串联起来,则

$$e = N \left| \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \right| = \left| \frac{\Delta(N\phi)}{\Delta t} \right| = \left| \frac{\Delta \psi}{\Delta t} \right|$$

式中: $\psi = N\phi$ 是各线圈匝链的总磁通,称为磁链,单位与磁通一样,为韦伯。感应电势单位为伏特,时间为秒,由上式可见,即单匝线圈匝链的磁通在1s内变化1Wb时,线圈端电压为1V。可以利用这个关系定义磁通单位(伏秒—Vs),再由磁通单位定义磁通密度 B 的单位。

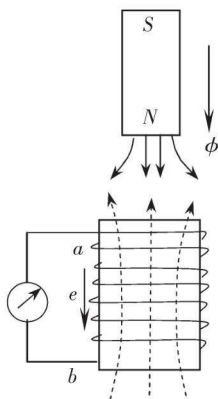


图1-9 电磁感应

上式就是法拉第定律。但此定律只说明感应电动势与磁通变化率之间的关系,并没有说明感应电动势的方向。楞次阐明了变化磁通与感应电势产生的感生电流之间在方向上的关系。即在电磁感应过程中,感生电流所产生的磁通总是阻止磁通的变化。即当磁通增加时,感生电流所产生的磁通与原来磁通方向相反削弱原磁通的增长;当磁通减少时,感生电流产生的磁通与原来的磁通方向相同,阻止原磁通减小。感生电流总是试图维持原磁通不变。这就是楞次定律。习惯上,规定感应电动势的正方向与感生电流产生的磁通的正方向符合右螺旋定则,因此上式可写为

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1-9)$$

这种感生电流企图保持磁场现状的特性,正表现了磁场的能量性质。因此楞次定律也称为磁场的惯性定律。法拉第定律和楞次定律总称为电磁感应定律。

1.3.6 电磁能量关系

为使研究问题简化,我们考察如图1-10所示的 N 匝环形线圈。环的外径 D 与内径 d 之比接近1,磁路的平均长度为 $l = \pi(D+d)/2$,线圈电流在环的截面 A 内产生的磁场是均匀的。环的磁介质磁导率 μ 为常数。当电压 u 加到线圈输入端时,在线圈中产生电流,引起磁芯中磁场变化。根据电磁感应定律有

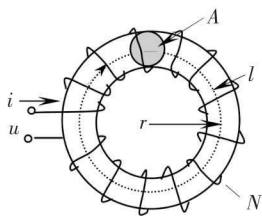


图1-10 电磁能量关系

$$u = -e = N \frac{d\phi}{dt} = NA \frac{dB}{dt} \quad (1-10)$$

线圈中磁通增长,相应的磁化电流

$$i = \frac{Hl}{N}$$

因此,电路输入到磁场的能量 W_e 为

$$W_e = \int_0^t i u dt = \int_0^t \frac{Hl}{N} NA \frac{dB}{dt} dt \quad (1-11)$$

经过时间 t ,线圈中磁场达到了 B ,因此上式可改写为

$$W_e = \int_0^B AlH dB = V \int_0^B H dB \quad (1-12)$$

式中: $V = Al$ —磁场的体积。

上式左边是电源提供给磁场的能量 W_e ,右边是磁场存储的能量 W_m 。因 μ 为常数,即 $B = \mu H$,则存储在磁场中能量为