

电机学

DIAN JI XUE

朱东起
王岩 编
李发海

上

中央广播电视大学出版社

电 机 学

上 册

朱东起 王岩 李发海 编

中央广播电视大学出版社

电 机 学

上 册

朱东起 王岩 李发海 编

*

中央广播电视大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

国防科工委印刷厂印装

*

开本 789×1092 1/16 印张 16.25 千字 375

1987 年 5 月第 1 版 1987 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—12000

定价 2.85 元

ISBN7-304-00006-6/TM·4

前 言

本书是为中央广播电视大学电气工程类电机、电力系统及其自动化(发电)专业编写的专业基础理论课教材。本书是根据中央广播电视大学电气工程类电机、电力系统及其自动化(发电)专业八六级教学大纲编写的。

全书分上、下两册,上册内容包括:绪论(含磁路)、第一篇变压器、第二篇交流电机电枢绕组的电势与磁势。下册内容包括:第三篇同步电机、第四篇异步电机、第五篇直流电机。全书以第一篇、第二篇、第三篇为重点。

本书着重基本原理的阐述,编写中力求物理概念清楚及联系工程实际。每章后附有思考题及习题,书后附有部分习题参考答案。

与本书配套的教学用书还有《电机学学习指导》、《电机学实验指导书》,均由中央广播电视大学出版社出版。

本书由朱东起、王岩、李发海合编,王祥珩审阅。由于水平有限,书中会有缺点和错误,尚请读者批评指正。

编 者

1987年2月

目 录

前言	(1)
绪论	(1)
§ 1 电机在国民经济中的作用	(1)
§ 2 电机的主要类型、电机学的性质	(2)
§ 3 关于磁场与磁路的基本定律	(3)
习 题	(26)

第一篇 变压器

第一章 概述	(30)
§ 1-1 变压器的主要类别	(30)
§ 1-2 变压器的结构	(32)
§ 1-3 变压器的型号及额定数据	(36)
思考题	(38)
习 题	(38)
第二章 变压器的运行分析	(39)
§ 2-1 变压器的空载运行	(40)
§ 2-2 变压器的负载运行	(49)
§ 2-3 标么值	(66)
§ 2-4 变压器参数的测定	(71)
§ 2-5 变压器的运行特性	(76)
思考题	(81)
习 题	(84)
第三章 三相变压器联接组及空载运行时的电势波形	(88)
§ 3-1 变压器的联接组别	(88)
§ 3-2 变压器绕组极性及其联接组别的实验测定方法	(97)
§ 3-3 标准联接组	(100)
§ 3-4 三相变压器运行时的电势波形	(101)
思考题	(108)
习 题	(112)
第四章 变压器的并联运行	(113)
§ 4-1 变压器并联运行及并联运行条件	(113)
§ 4-2 并联运行时的负载分配	(114)
§ 4-3 变压器变比不等时的并联运行	(118)
§ 4-4 变压器联接组别对并联运行的影响	(121)

思考题	(121)
习 题	(122)
第五章 三绕组变压器和自耦变压器	(123)
§ 5-1 三绕组变压器	(123)
§ 5-2 自耦变压器	(131)
思考题	(140)
习 题	(141)
第六章 三相变压器的不对称运行	(142)
§ 6-1 对称分量法	(142)
§ 6-2 各相序的等值电路	(145)
§ 6-3 Y/Y ₀ 联接三相变压器的单相负载运行	(148)
§ 6-4 其他联接组三相变压器的不对称运行分析	(158)
§ 6-5 V/V 联接变压器	(159)
思考题	(160)
习 题	(161)
第七章 变压器的瞬变过程	(162)
§ 7-1 变压器空载合闸的过电流现象	(162)
§ 7-2 突然短路的瞬变过程	(166)
§ 7-3 过电压现象	(169)
思考题	(174)
习 题	(175)
第八章 变压器的发热与温升	(176)
§ 8-1 绝缘材料的等级	(176)
§ 8-2 变压器的发热过程	(177)
§ 8-3 变压器的额定容量和负载能力	(180)
§ 8-4 变压器的冷却方式	(182)
思考题	(183)

第二篇 交流电机的绕组、电势和磁势

第九章 交流电机的绕组和电势	(184)
§ 9-1 交流电机的基本工作原理及对交流绕组的要求	(184)
§ 9-2 三相单层集中整距绕组	(188)
§ 9-3 三相单层分布绕组	(198)
§ 9-4 三相双层分布短距绕组	(205)
§ 9-5 齿谐波电势、分数槽绕组简介	(210)
思考题	(215)
习 题	(216)
第十章 交流电机电枢绕组的磁势	(218)
§ 10-1 概述	(218)

§ 10-2 三相单层集中整距绕组的磁势	(218)
§ 10-3 三相双层分布短距绕组的磁势	(240)
思考题	(248)
习 题	(249)
部分习题答案	(251)
参考文献	(255)

绪 论

§ 1 电机在国民经济中的作用

由于电能的生产、输送和使用比较方便，因此电能被广泛地使用。而在电能的生产、输送和使用各方面，电机起着重要的作用。

电机主要有发电机、变压器和电动机。

电能的生产集中在发电厂。在火电厂、水电厂和核电厂中，水轮机、汽轮机、柴油机带动发电机，把燃料燃烧的热能、水流的机械能或原子核裂变的原子能都转变成电能。发电机发出的电压一般为 $10.5\sim 20\text{kV}$ ，为了减少远距离输电中的能量损失，应采用高压输电，输电电压为 110kV 、 220kV 、 330kV 、 500kV 或更高。把发电机发出的电压升高到输电电压是由变压器完成的。到了各个用电区，由于各种用电设备如电动机、电炉、电灯等需要不同的低电压，例如 6kV 、 1kV 、 380V 、 220V ，因此再由变压器把高电压降为所需低电压。各种用电设备统称为负载。在电能的生产、输送、分配、消费中的发电机、变压器、电力线路、负载等联在一起构成统一的整体，这就是电

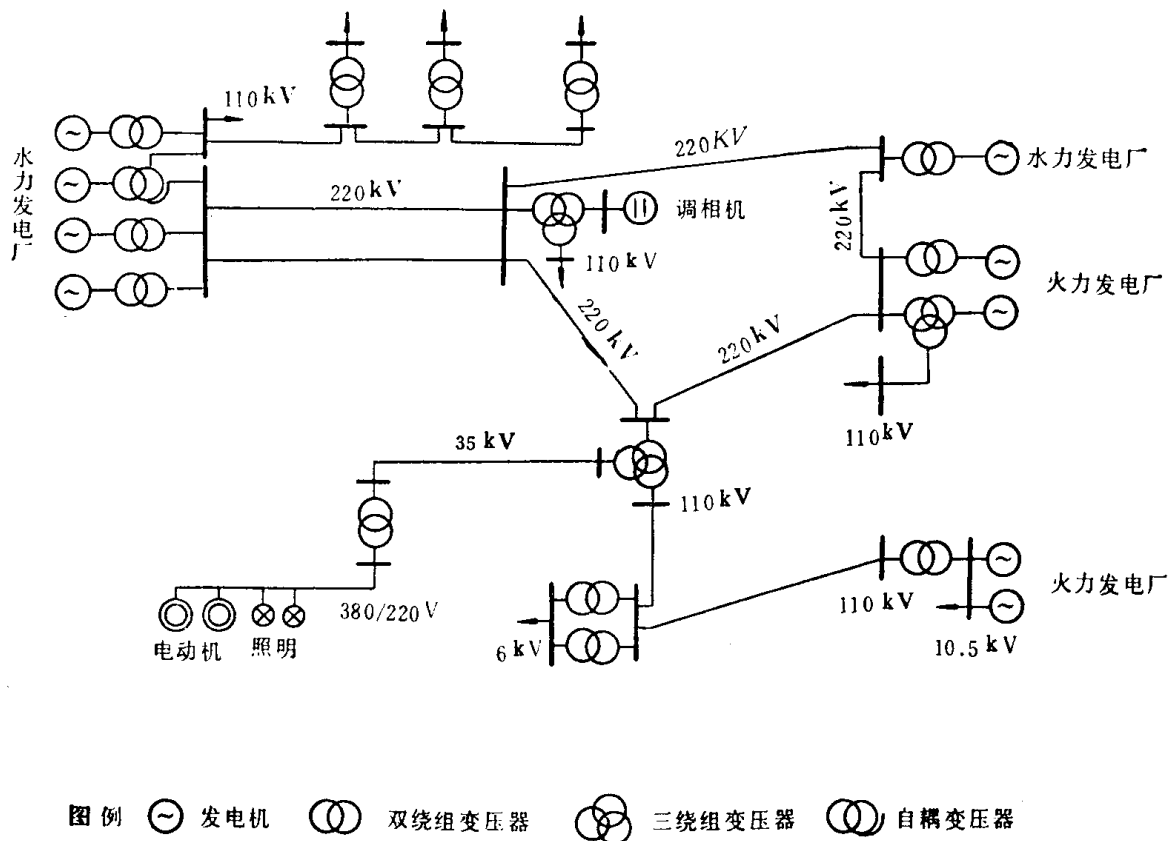


图 1 电力系统示意图

力系统。电力系统中接有很多发电厂的发电机,每个发电机都向系统提供电能;电力系统中接有大量的、各式各样的负载,每个负载都从系统中取用电能。电力系统是一个十分庞大又十分复杂的系统,发电机与变压器则是电力系统中最重要的设备。图 1 为电力系统示意图。

生产机械大多用电动机拖动。机械制造业、冶金工业、煤炭工业、石油工业、轻纺工业、化学工业及其他各工矿企业中,广泛地应用各种电动机。例如用电动机拖动各种机床、轧钢机、电铲、卷扬机、纺织机、造纸机、搅拌机、压缩机、鼓风机等生产机械。

在交通运输中,铁道机车和城市电车是牵引电机拖动的;在航运和航空中,使用船用电机和航空电机。

在农业生产方面,电力排灌设备、打稻机、碾米机、榨油机、饲料粉碎机等都是由电动机拖动。

在国防、文教、科研、医疗及日常生活中,也广泛地应用各种电机。

随着四个现代化的发展,工业生产自动化水平不断提高,各种自动控制系统中日益广泛地应用各种控制电机,就是人造卫星的自动控制系统中也离不开控制电机。

综上所述,电机在国民经济中起着重要作用。

§ 2 电机的主要类型、电机学的性质

电机在各个领域内都得到广泛的应用,种类繁多,性能各异,分类方法也很多。主要有两种常用的分类方法。

电机的任务主要是进行能量转换,还有一些有其他的功能。因此从功能考虑,电机有下列几类:

(1) 变压器

主要是改变交流电的电压,也有改变相数、频率及相位的。

(2) 发电机

把机械能变为电能。

(3) 电动机

把电能变成机械能。

(4) 控制电机

作为自动控制系统的控制元件。

这一种分类方法中,电动机与发电机的功能不同,但从原理上看,电动机运行和发电机运行不过是电机的两个运行状态,它们之间可逆,而且电机还可以有其他的运行状态。

另一种分类方法是按照电机的结构或转速分类,电机主要有以下几类:

(1) 变压器

为静止不旋转设备。

(2) 旋转电机

旋转电机包括有:

直流电机——电流种类为直流,有较大的调速范围。

同步电机——电流种类为交流,是一种交流电机,转速恒为同步转速。电力系统中的发电机都是同步电机。

异步电机——也是一种交流电机,转速不为同步转速,电动机运行时转速低于同步转速,发电机运行时转速高于同步转速。异步电机主要用于电动机。

还有其他的分类方法,但不论是哪种方法都不是绝对的。

本教材按照变压器、同步电机、异步电机和直流电机的顺序分别阐述。

电机学是电力系统及其自动化(发电)、电机、工业自动化等专业的主要技术基础理论课,电机学将系统地阐述变压器、同步电机、异步电机和直流电机的基本电磁关系,运行性能、各种运行方式等内容,为进一步学习以上各有关专业的专业课程打下坚实的理论基础。本教材更侧重于电力系统及其自动化(发电)专业使用。本课程先修课有高等数学、物理、电路分析等。

电机学与电路分析课的性质又很不同,电机学虽为基础课,但是又带有专业性。电机学具体分析各种类型电机,比较实际,具有复杂性与综合性的特点,与电路分析课程中解决理想化了的、比较单纯的一个个问题不一样。在电机中,各种电、磁、力、热等方面的物理定律同时在一台电机上起作用,互相制约,必须综合考虑,用联立方程求解。在分析复杂的实际问题中,还常常需要忽略一些次要因素,抓主要矛盾予以解决,这样所得结果已经足够正确。在一定的条件下为次要的因素,在另一条件下又可能成为有决定影响的主要因素,要依研究的问题及条件而变。对电机学不同于先修课程的特点要有足够的认识,才有利于把本门课程学好。

学习电机学,应强调物理概念,应强调联系实际;学习电机学,要重视数学计算,要重视实验工作。各种电机之间关系密切,学习时要注意它们的内在联系。

§3 关于磁场与磁路的基本定律

电机中机械能和电能的转换,变压器中电能的传递都借助于磁场或磁路进行的。在讲述各种电机之前有必要先复习物理学中关于磁场的概念,介绍磁路及其有关定律。

一、描写磁场和磁路的几个基本物理量及安培环路定律

1. 磁感应强度 B

磁场是由电流产生的,描述磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度 B ,为了形象地描绘磁场,采用磁感应线或称磁力线。磁力线是无头无尾的闭合曲线,磁力线的方向与产生磁场的电流方向为右手螺旋关系,如图 2(a)与(b)所示。磁场中任意一点磁感应强度 B 的方向,即过该点磁力线的切线方向。磁感应强度 B 的大小为通过该点与 B 垂直的单位面积上的磁力线的根数。磁感应强度 B 与产生它的电流之间的关系用毕奥-萨伐尔定律描述。

国际单位制中 B 的单位为 T (特斯拉),即 Wb/m^2 (韦伯/米²)。工程实际应用中常用 G_s (高斯)表示, $1\text{T}=10^4 G_s$ 。

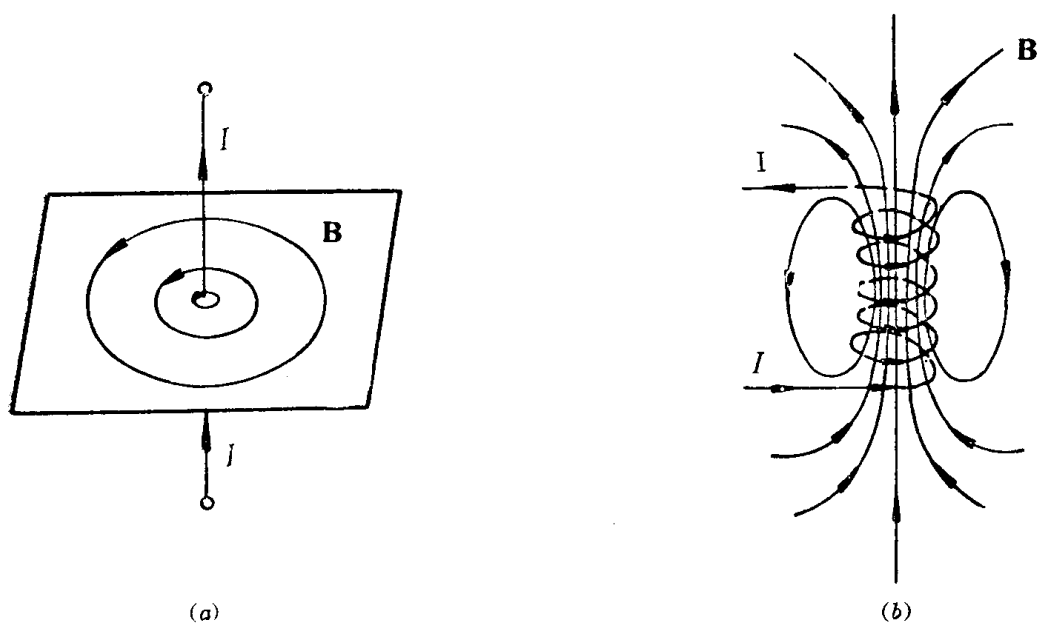


图2 电流及磁力线

2. 磁感应通量 Φ

穿过某一截面 S 的磁感应强度 B 的通量, 即穿过截面 S 的磁力线的根数称为磁感应通量, 简称磁通, 用 Φ 表示, 即

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

其中 $d\mathbf{S}$ 的方向为截面 S 的法线方向。

由于磁力线是无头无尾的, 因此通过一闭合面的磁通恒等于零, 这就是高斯定理, 即磁通连续性原理, 其数学表达式为

$$\Phi = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

在均匀磁场中, 如果截面 S 不与 B 垂直, $d\mathbf{S}$ 与 B 夹角为 α , 如图3(a)所示, 则磁通

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

如果截面 S 与 B 垂直, $d\mathbf{S}$ 与 B 方向相同, 如图3(b)所示, 则

$$\Phi = BS$$

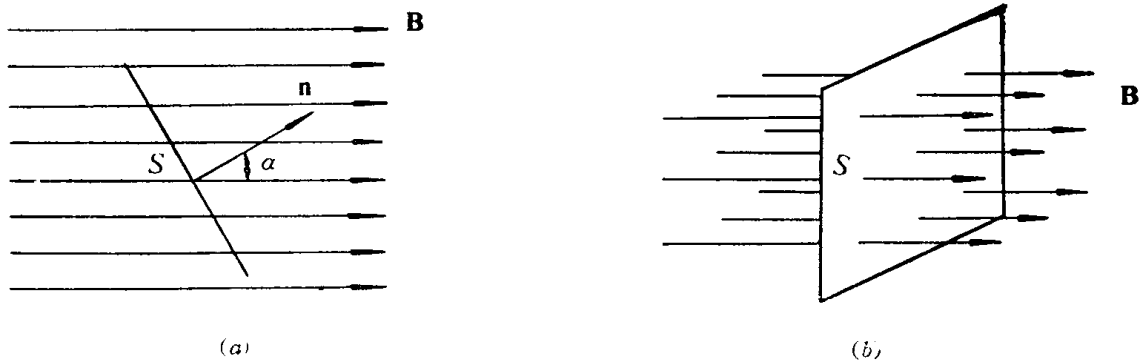


图3 均匀磁场中的磁通

显然,在均匀磁场中,如果截面 S 与 B 垂直时,则

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

即 B 为单位面积上的磁通,可以理解为磁通密度。在电机或变压器磁路中,我们称 B 为磁通密度。

在国际单位制中,磁通 Φ 的单位为 Wb(韦伯)。1Wb=10⁸Mx(马克斯威)。

3. 磁场强度 H

计算导磁物质(磁介质)中的磁场时,引入一个辅助性物理量为磁场强度(或称磁化力) H ,它与磁感应强度 B 的关系为

$$B = \mu H$$

其中 μ 为导磁物质的磁导率。真空的磁导率为 μ_0 ,国际单位制中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ (亨/米)。铁磁材料的磁导率 $\mu \gg \mu_0$,例如铸钢的 μ 约为 μ_0 的 1000 倍,各种硅钢片的 μ 约为 μ_0 的 6000~7000 倍,特殊处理的坡莫合金的 μ 可比 μ_0 大几万倍。由于,顺磁材料例如变压器油、空气的 μ 略大于 μ_0 ,反磁材料例如铋、铜的 μ 略小于 μ_0 ,所以在工程上就把顺磁材料与反磁材料的磁导率都看成是 μ_0 。

国际单位制中磁场强度 H 的单位为 A/m。

4. 安培环路定律

导磁材料中安培环路定律是: 磁场中沿任意一闭合环路的磁场强度的线积分等于穿过这个环路的所有电流的代数和,即

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I$$

式中电流 I 的正方向是这样规定的: 电流的方向与闭合环路的绕行方向为右手螺旋关系时电流为正,反之为负。

二、磁路

为了引出磁路,首先举一个例子。图 4(a)所示的无限长直导线通过电流 I 时,在其周围有

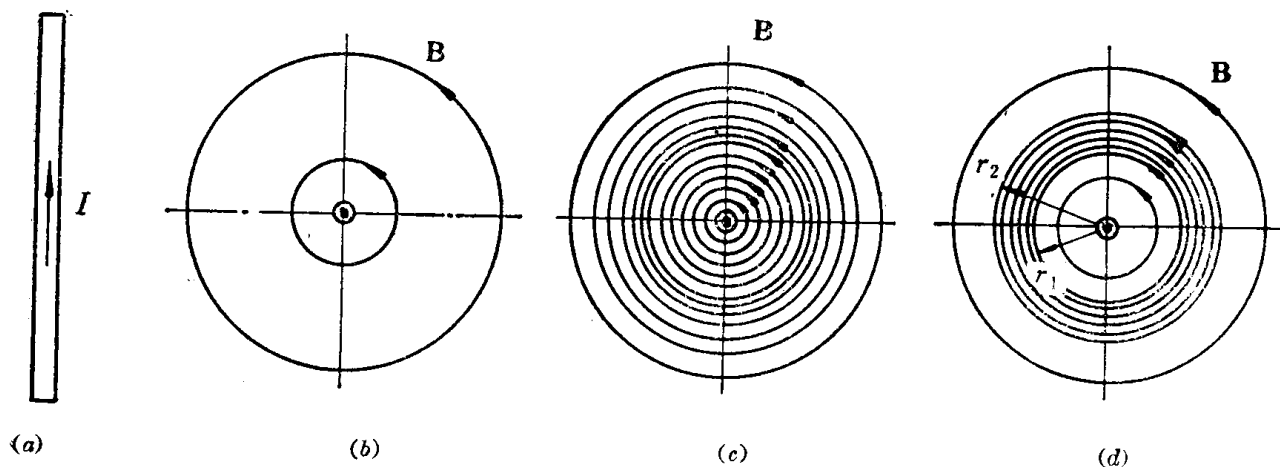


图 4 铁磁材料中的磁场强度

磁场产生。与该直线垂直的平面上,磁力线是无数个同心圆,与导线中心 O 距离 r 处的磁场强度及磁感应强度的大小分别为 H 与 B 。

H 与 B 大小计算如下,以 o 为圆心,取圆周 $l=2\pi r$ 为积分回路,根据安培环路定律:

$$\oint_l H dl = I$$

$$2\pi r \cdot H = I$$

磁场强度

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

(1) 若导线周围介质为空气,则磁感应强度为

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

(2) 若导线周围介质为铁磁材料,则

$$B = \mu_{Fe} H = \mu_{Fe} \frac{I}{2\pi r}$$

由于 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ 因此磁感应强度 B 比空气介质时大的很多。若以磁力线表示磁场时,空气介质磁力线稀疏如图4(b)所示。铁磁材料的磁力线十分密集,如图4(c)所示,该两图示意的平面是垂直于长直导线的平面,磁力线以导线轴心为圆心。

(3) 若导线周围在 $r_1 < r < r_2$ 范围内为铁磁材料,其余 $r < r_1$ 及 $r > r_2$ 处均为空气时,则当 $r < r_1$

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r};$$

当 $r_1 < r < r_2$

$$B = \mu_{Fe} \frac{I}{2\pi r};$$

当 $r > r_2$

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}.$$

显然导线周围的磁场,只有铁磁材料中的磁感应强度 B 最大,比空气中大很多。若以磁力线表示磁场时 $r < r_1$ 及 $r > r_2$ 范围内磁力线稀疏, $r_1 < r < r_2$ 范围内,磁力线十分密集,如图4(d)所示。由此可以得出两点结论:

(1) 铁磁材料可以大大增强磁场;

(2) 同样大小电流产生的磁场,在铁磁材料及非铁磁材料构成的并联磁回路中,由于导磁率 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$,磁力线基本集中于铁磁材料的磁路中,而非铁磁材料磁回路中却极少。或者说铁磁材料可以把磁通尽量地约束在其中。

工程上为了获得强磁场,把线圈绕在铁心上。这样当线圈通有电流时,铁心中有强磁场产

生，且几乎全部磁力线都集中在铁心中。图 5 为单相变压器的铁心及其磁力线示意图，变压器铁心由硅钢片叠成。这种由铁磁材料构成的、能使磁力线集中通过的磁回路整体称为磁路，变压器的铁心就是它的磁路。磁路中磁通是电流产生的，产生磁通的电流 I 称为励磁电流，励磁电流流经的线圈称为励磁线圈，或叫励磁绕组。有了铁心磁路，变压器的励磁线圈不必均匀地绕在整个磁路上，只集中绕在一段磁路上便可以了。同一种铁磁材料的磁路，磁路横截面 S 比磁路长度 l 小得多的情况下，可以认为磁通在该磁路的横截面 S 中分布均匀。

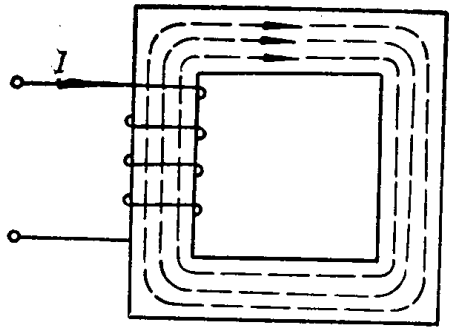


图 5 单相变压器磁路

磁路把磁通约束在其中的情况与电流只在导电材料中流动而不在周围绝缘介质中流动的情况是极其相似的。但导电材料电导率比周围的绝缘材料电导率大几千万万倍，工程上完全可以认为电流全部在电路中流过，而铁磁材料磁导率比周围非铁磁材料磁导率一般仅大几千倍，不能完全认为磁通全部在铁磁磁路中通过，会有极少量磁通不经铁心而经空气闭合。分析、计算磁路时，为突出主要矛盾，认为磁通全部经过铁心，这样做误差不大，可在工程允许范围内。

三、铁磁物质的磁化曲线

铁磁物质不仅具有很高的磁导率，而且其磁导率 μ 不为常数，与磁场强度及物质磁状态的历史有关。

图 6 所示为铁磁物质的磁化曲线，它是由实验测出来的。当磁场强度从零开始增加到 H_m 时，磁通密度 B 从零增加到 B_m ， $B-H$ 关系为图中 oa 曲线， oa 为原始磁化曲线(或起始磁化曲

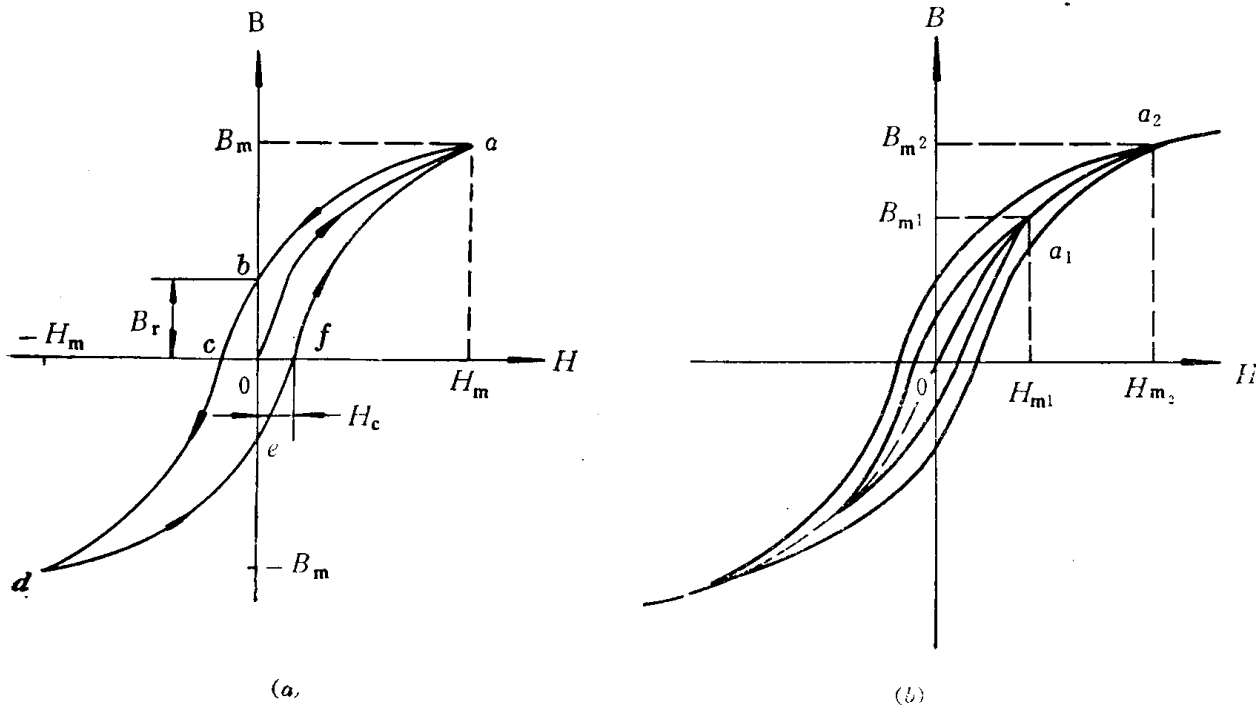


图 6 铁磁物质的磁化特性

线)。接着减小磁场强度, H 从 H_m 减为零, 减为 $-H_m$, 由于磁滞现象, B 则从 B_m 减为 B_r , 减为 $-B_m$, $B-H$ 关系为 $abcd$ 曲线。再把磁场强度从 $-H_m$ 增大到零, 增大到 H_m 时, B 则从 $-B_m$ 增大到 $-B_r$, 增大到 B_m , $B-H$ 关系为 $defa$ 曲线。 H 从 $H_m \rightarrow -H_m \rightarrow H_m \rightarrow -H_m$ 重复多次, $B-H$ 曲线仍为 $abcdefa$ 回线, 称之为磁滞回线。回线具有对称性, a 为回线的正顶点, d 为回线的负顶点。磁场强度 H 降为零时, $B=B_r$, 称为剩磁。 B 由负值增大为零时, $H=H_c$ 称为矫顽力。铁磁材料磁化曲线是回线而不是一条曲线, 其原因是铁磁材料中磁分子在磁化过程中彼此具有摩擦力, 跟不上磁场强度的变化, 表现为磁感应强度 B 比磁场强度 H 滞后, 这就是磁滞现象。

H_m 不同时, 铁磁物质的磁滞回线不一样, 各条回线的正顶点连成一条曲线, 如图 6(b) 所示的 oa_1a_2 , 称为铁磁物质的基本磁化曲线。基本磁化曲线与原始磁化曲线差别很小, 对每一种铁磁材料来讲它是一条确定的曲线, 可通过实验测定, 在磁路计算中为已知量。反方向磁化时, 基本磁化曲线见图 6(b) 中的虚线, 与正方向曲线 oa_1a_2 是对称的。

铁磁物质根据磁滞回线的形状不同分类: 回线瘦窄, 剩磁 B_r 小, 矫顽力 H_c 小, 回线面积小的一类称为软磁材料, 磁导率很高, 如电工硅钢片、铁镍合金、纯铁与铸钢等, 电机及变压器的铁心磁路都用软磁材料。磁滞回线胖宽, 剩磁 B_r 大, 矫顽力 H_c 大, 回线面积大的一类称为硬磁材料, 如钨钢、钴钢等, 用做永久磁铁。矩形磁滞回线的材料在电子计算机存储器中作磁心。

电机中作为磁路的软磁材料磁滞回线很窄, 因此进行磁路计算时, 不考虑磁滞现象, 用基本磁化曲线表示 B 与 H 的关系是可行的, 这样可使计算变得简单, 通常讲的铁磁材料的 $B-H$ 曲线, 即指基本磁化曲线, 如图 7 所示。

铁磁材料的基本磁化曲线有哪些特点呢? 最初开始 oa 段, 磁场强度增大时 B 随之增大, 但 B 增大的速度较慢; 过了 a 点到 ab 段后, B 随 H 迅速增大; 过了 b 点到 bc 段后, B 随 H 增大的速度又较慢了; 过了 c 点, B 几乎不随 H 增大而增大, 出现了磁饱和现象, cd 为饱和区。磁化曲线上 a 点称为肘点, b 点称为膝点, c 点称为饱和点。

由于 $B-H$ 曲线是非线性的, 磁导率 $\mu = \frac{B}{H}$ 不为常数, 见图 7, oa 段 μ 较低, ab 段 μ 较高, 过了 b 以后 μ 又较低; 进入饱和区后, μ 急剧下降, 若 H 再增大, μ 将继续减小, 直至逐渐趋近于 μ_0 。

各种电机、变压器的磁路中, 为了在一定的励磁电流下获得强磁场, 希望铁磁材料的 μ 较高, 因此材料的磁通密度就不能取得太高了。但是 B 也不能取得太低, 因为在电压一定的条件下, 磁路中磁通 Φ 为常数, 如果 B 取得太低铁心截面积 S 会很大, 铁心材料消耗过多。一般地说 B 取在磁化曲线拐弯处的膝点附近为好。对于硅钢片来讲, 膝点附近的磁通密度 B 为 $1.5 \sim 1.8T$ 。

进行磁路计算时, 铁磁材料的磁化特性, 用 $B-H$ 曲线或者表格形式预先给定, 已知 H 要找 B , 或已知 B 时要找 H , 可以用它查找。图 8 为常用铁磁材料的 $B-H$ 曲线。例如硅钢片 D41,

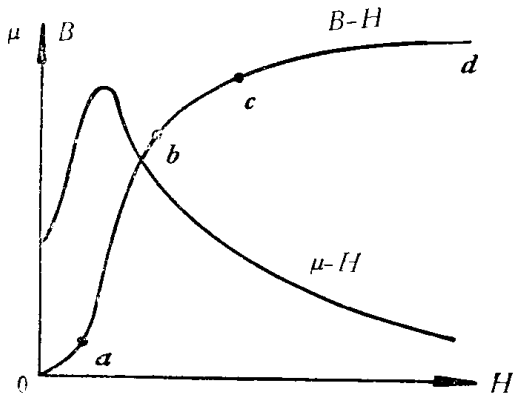


图 7 基本磁化曲线

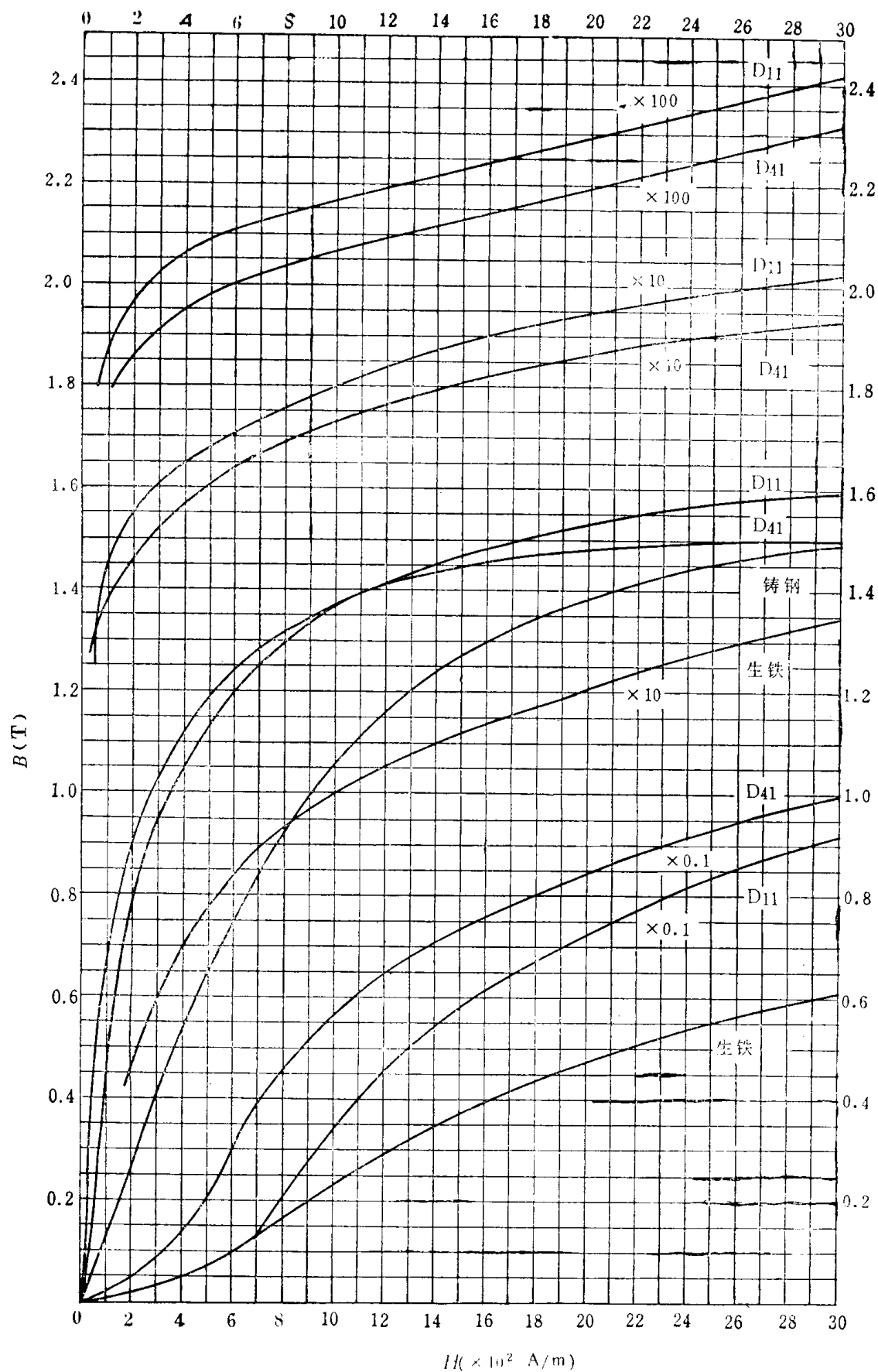


图8 几种常用铁磁材料的基本磁化曲线

当 $B=0.65\text{T}$ 时, $H=120\text{A/m}$; $B=1.3\text{T}$ 时, $H=730\text{A/m}$; $B=1.85\text{T}$ 时, $H=18000\text{A/m}$ 。

四、磁路的欧姆定律

图 9(a) 所示的为单一铁磁材料构成的等截面磁路, 励磁线圈匝数为 W , 通以电流 I , 磁通 Φ 全部在磁路中通过, 并在截面 S 内均匀分布, 磁路平均长度为 l , 下面分析一下 Φ 与 IW 的关系。

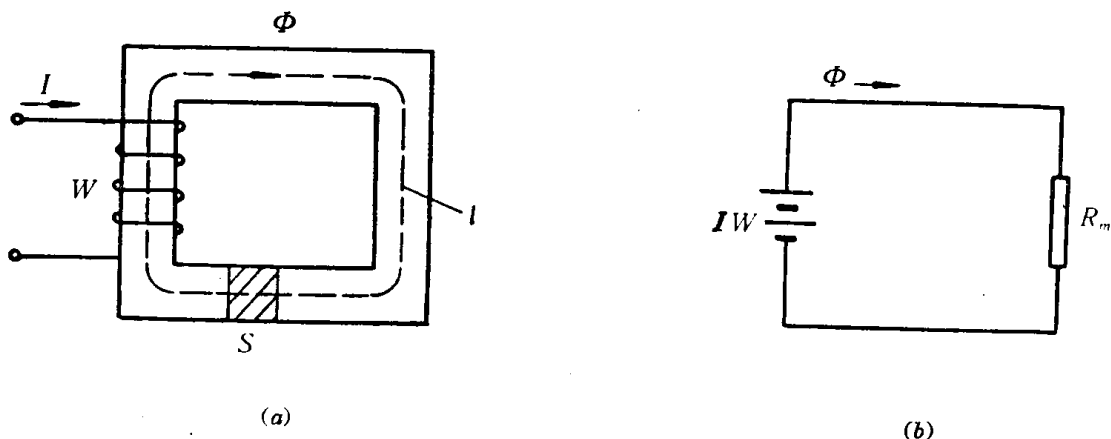


图 9 最简单磁路

Φ 全部通过等截面磁路, 因此磁路中 $B = \frac{\Phi}{S} = \text{常数}$, H 也为常数。应用安培环路定律于闭合回路 l 上, 则

$$\oint_l Hl = \sum I$$

$$Hl = IW$$

把 $H = \frac{B}{\mu}$ 代入上式, 得到

$$\frac{Bl}{\mu} = IW$$

$$\frac{\Phi}{S} \cdot \frac{l}{\mu} = IW$$

则磁通 Φ 为

$$\Phi = \frac{IW}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{F}{R_m} \quad (1)$$

上式中, $R_m = \frac{l}{\mu S}$ 称为磁阻, 磁阻的大小与磁路长度成正比, 与导磁截面积成反比, 与磁导率成反比。 $F = IW$ 称为磁动势, 简称磁势, 等于磁路所环链的全部电流。磁阻 R_m 的单位为 H^{-1} (1/亨), $1\text{H}^{-1} = 1\text{A/Wb}$, 磁势 F 单位为 A。

式(1)称为磁路的欧姆定律, 与电路的欧姆定律相似。磁动势 F 对应于电路中的电动势, 磁阻对应于电路中的电阻, 磁通对应于电路中的电流。磁路与电路对比, 可以用如图 9(b) 电路来模拟。