

高等学校教材

电 机 学

西安交通大学 汪国梁 主编

机械工业出版社



高等学校教材

电机学

西安交通大学 汪国梁 主编

机械工业出版社

本书共六篇二十五章。主要介绍四种基本电机,即变压器、直流电机、感应电机及同步电机的工作原理、基本结构、分析研究方法以及运行特性等。着重分析了正常运行时的稳态性能,用于某些重要的非正常运行,如不对称运行及瞬态短路等,亦作了简单介绍。扼要介绍了几种主要控制电机的工作原理及特性。对磁路的基本知识也进行了必要的补充。

本书是四年制电力类专业的电机学教材,适用于电气技术专业、电器专业、高压专业、水电专业、农电专业、绝缘专业以及某些军工专业等。其目的是使学生掌握合理使用电机的方法及满足后续专业课程对该方面知识的需要。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/汪国梁主编. —北京:机械工业出版社,
1996.5 (2001.9 重印)

高等学校教材

ISBN 7-111-00209-1

I. 电... II. 汪... III. 电机学-高等学校-教材

IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 061102 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:贡克勤 版式设计:张世琴

责任印制:付方敏 责任校对:刘志文

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 9 月第 1 版第 9 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·17.75 印张·427 千字

40 001—43 000 册

定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

本书是四年制电力类专业电机学。是根据 1983 年 5 月电工技术类专业教材编审委员会扩大会议通过的教学大纲编写而成。适用于电气技术专业、电器专业、高电压专业、水电专业、农电专业以及某些军工专业等。通过本课程的学习,使学生掌握几种主要电机的工作原理、基本结构、运行特性、一般的试验方法及操作技能,从而能合理地使用电机以及满足后续专业课程对该方面知识的需要。

上述这类专业对电机学课程的要求有其共性的一面,如:学完电机学以后能合理地使用几种主要电机。但各专业对电机学的要求也必然会有其特殊的一面。因此,上述这类专业在使用本教材时可作适当的增删,其中打*者为选读内容。

通过本课程的学习应该达到的基本要求是:

1. 对于四种基本电机在正常运行时的稳态性能应了解透彻,并建立清晰的物理概念。
2. 学会分析电机性能的基本方法,例如:等效电路、相量图、复数运算以及对称分量法等。
3. 学会电机的转速、转矩、功率等的测量方法,能独立地进行普通电机试验,并对试验数据具有一定的分析能力。
4. 能独立地操作常用电机,如电动机的起动、调速、发电机的电压建立与调压等。
5. 对电机常用的一些数据,如额定值、温升等应有数值概念。

本书由西安交通大学及沈阳工业大学合作进行编写。在编写过程中比较系统地总结了两院校历年来在电机学方面的教改经验,并广泛听取了兄弟院校的意见。具体执笔人是汪国梁、李德成、顾积栋、刘宪。并由沈阳工业大学唐任远教授主审。太原工学院熊大慰教授、哈尔滨电工学院汤蕴璆教授、华中工学院熊衍庆副教授在审阅过程中提出了许多宝贵意见,对此敬致谢意。

由于水平所限,错误在所难免,望读者多提宝贵意见。

本书采用的力学、电学及磁学单位符号

T——特斯拉
Wb——韦伯
Mx——麦克斯韦
Gs——高斯
Oe——奥斯特
H——亨利
 Ω ——欧姆
Hz——赫兹
A——安
V——伏

kV——千伏
W——瓦
kVA——千伏安
kW——千瓦
rad/s——弧度/秒
r/s——转/秒
r/min——转/分
m——米
N——牛顿
N·m——牛顿·米

目 录

绪 论	1	第七章 自耦变压器与三绕组变压器等	63
第一篇 磁路与变压器	3	§ 7-1 自耦变压器	63
第一章 磁路*	3	§ 7-2 三绕组变压器	66
§ 1-1 磁感应强度、磁通、磁导率及 磁场强度	3	§ 7-3 移圈调压器*	69
§ 1-2 磁路的基本定律	4	§ 7-4 互感器*	70
§ 1-3 铁磁物质的磁化曲线	6	第二篇 直流电机	74
§ 1-4 磁滞损耗与涡流损耗	8	第八章 直流电机的工作原理及 构造	74
第二章 变压器的类别和构造	9	§ 8-1 直流电机的工作原理与额定值	74
§ 2-1 变压器的工作原理和分类	9	§ 8-2 直流电机的构造	75
§ 2-2 变压器的结构	10	§ 8-3 直流电机的电枢绕组*	77
§ 2-3 变压器的额定值	12	第九章 直流电机的基本理论与直流 发电机运行	81
第三章 变压器的基本理论	14	§ 9-1 直流电机的励磁方式	81
§ 3-1 变压器的空载运行	14	§ 9-2 空载时直流电机中的磁场	81
§ 3-2 变压器的负载运行	18	§ 9-3 负载时直流电机中的磁场—— 电枢反应	82
§ 3-3 变压器二次绕组的归算	20	§ 9-4 电势计算公式与电势平衡方程式	85
§ 3-4 变压器的等效电路	22	§ 9-5 直流电机的损耗和效率	87
§ 3-5 变压器的参数测定	24	§ 9-6 电磁转矩	89
§ 3-6 标么值	26	§ 9-7 他励发电机的运行特性	90
第四章 三相变压器	32	§ 9-8 并励发电机的运行特性	92
§ 4-1 三相变压器组和三相芯式 变压器	32	§ 9-9 复励发电机的运行特性	94
§ 4-2 三相变压器的联结组	33	第十章 直流电动机	98
§ 4-3 联结组和铁芯结构对谐波电流、 谐波磁通和谐波电势的影响*	36	§ 10-1 直流电动机的起动	98
第五章 变压器的运行性能	41	§ 10-2 直流电动机的工作特性与机械 特性	99
§ 5-1 电压调整率	41	§ 10-3 直流电动机的调速方法	104
§ 5-2 变压器的损耗和效率	42	§ 10-4 电动机的稳定运行条件	106
§ 5-3 变压器的并联运行	44	§ 10-5 直流电动机的制动*	107
§ 5-4 变压器空载合闸电流	47	§ 10-6 各种直流电动机的应用范围	108
§ 5-5 变压器的突然短路	49	第十一章 直流电机的换向过程	111
第六章 三相变压器的不对称运行	54	§ 11-1 换向与火花	111
§ 6-1 对称分量法	54	§ 11-2 直线换向、延迟换向与加速换 向	111
§ 6-2 各相序的等效电路与参数	55		
§ 6-3 Y/Y ₀ -12 联结组的不对称 运行	57		

§ 11-3 改善换向的方法	114	§ 17-3 深槽式与双笼型感应电动机	182
§ 11-4 火花的成因	115	§ 17-4 感应电动机的调速	184
§ 11-5 直流电动机在整流电源供电时的换向*	116	第十八章 单相感应电动机、感应调压器和感应发电机	191
第三篇 交流电机理论的共同问题	120	§ 18-1 单相感应电动机	191
第十二章 交流绕组中的感应电势	120	§ 18-2 感应调压器*	196
§ 12-1 同步发电机的工作原理	120	§ 18-3 感应发电机*	197
§ 12-2 导体中的感应电势	121	第十九章 电机的发热和冷却	202
§ 12-3 线圈电势与节距因数	122	§ 19-1 电机的发热与冷却过程简述	202
§ 12-4 绕组的相电势与分布因数	123	§ 19-2 电机的绝缘材料和允许温升	204
§ 12-5 高次谐波电势及其削弱方法*	125	§ 19-3 电机的定额与运行方式	204
第十三章 交流绕组	129	§ 19-4 电机的通风冷却方式	205
§ 13-1 三相单层绕组	129	第五篇 同步电机	208
§ 13-2 三相双层叠绕组	131	第二十章 同步电机的基本形式及构造	208
§ 13-3 三相双层波绕组*	132	§ 20-1 概述	208
第十四章 交流绕组的磁势	138	§ 20-2 同步电机的构造	208
§ 14-1 单相绕组的磁势——脉动磁势	138	§ 20-3 励磁方式简述*	211
§ 14-2 单相脉动磁势分解为两个大小相等、转向相反的旋转磁势	141	§ 20-4 同步电机的额定值	212
§ 14-3 三相绕组的合成磁势——旋转磁势	143	第二十一章 同步发电机的基本理论	214
§ 14-4 电机中的主磁通和漏磁通	145	§ 21-1 电枢反应	214
第四篇 感应电机	150	§ 21-2 同步电机概念	217
第十五章 感应电机的工作原理和基本结构	150	§ 21-3 隐极同步发电机的电势方程式和相量图	218
§ 15-1 感应电机的工作原理	150	§ 21-4 凸极同步发电机的电势方程式和相量图	219
§ 15-2 感应电机的基本结构	152	§ 21-5 同步发电机开路、短路、零功率因数特性及电抗测定	220
§ 15-3 感应电动机的额定值	154	§ 21-6 同步发电机的外特性和电压调整率	223
第十六章 感应电动机的基本理论	156	第二十二章 三相同步发电机的并联运行	228
§ 16-1 感应电机的电势平衡方程式	156	§ 22-1 同步发电机的并联	228
§ 16-2 感应电机的磁势平衡方程式	157	§ 22-2 隐极同步发电机功率平衡方程式和功角特性	232
§ 16-3 感应电机的频率归算和绕组归算	159	§ 22-3 凸极同步发电机的功角特性	233
§ 16-4 感应电机的等效电路和相量图	161	§ 22-4 功角及静态稳定概念	235
§ 16-5 感应电动机的功率平衡方程式	164	§ 22-5 同步发电机有功功率及无功功率的调节、V形曲线	236
§ 16-6 转矩平衡方程式与电磁转矩	166	§ 22-6 同步发电机的振荡*	238
§ 16-7 感应电动机的最大转矩及过载能力	168	第二十三章 同步发电机的不对称运行	
§ 16-8 感应电动机的最初起动转矩	168		
第十七章 感应电动机的基本性能	175		
§ 17-1 感应电动机的工作特性	175		
§ 17-2 感应电动机的最初起动性能	176		

和瞬态短路概念*	244
§ 23-1 同步发电机不对称运行的分析方法	244
§ 23-2 同步发电机的稳态单相短路	246
§ 23-3 同步发电机三相瞬态短路的物理过程	247
§ 23-4 瞬态短路时的电抗	249
§ 23-5 瞬态短路电流	250

第二十四章 三相同步电动机

§ 24-1 同步电动机的工作原理	255
§ 24-2 同步电动机电势平衡方程式及相量图	256
§ 24-3 同步电动机的最大优点是能够	

改善功率因数	257
--------	-----

§ 24-4 同步电动机的功角特性与磁阻电动机	259
-------------------------	-----

§ 24-5 同步电动机的起动	260
-----------------	-----

第六篇 控制电机*

第二十五章 控制电机的工作原理

与基本性能	263
-------	-----

§ 25-1 直流伺服电动机	263
----------------	-----

§ 25-2 直流测速发电机	265
----------------	-----

§ 25-3 交流伺服电动机	266
----------------	-----

§ 25-4 交流异步测速发电机	268
------------------	-----

§ 25-5 旋转变压器	270
--------------	-----

§ 25-6 自整角电机	272
--------------	-----

绪 论

由于电能的生产、传输、分配、使用和控制等方面都很方便，因而在人类生活中获得了日益广泛的应用。作为与电能有关的能量转换装置的电机，不论在工农业生产、交通运输、科学文化以及日常生活等方面，都是十分重要的设备。

在电力工业中，就目前来说，能够大量生产电能的仍然是以电磁感应为基本原理的电机。在各工厂企业中，各种工作母机、吊车、轧钢机、鼓风机等生产设备，都需要电机作为原动机。随着农业技术改造的进展，排灌、脱粒、碾米、饲料粉碎等各项设备中，也日益广泛地应用着电机。此外，在国防、文教、医疗以及交通运输等各项事业中，电机也起着日益重要的作用。近年来，随着人民生活水平的提高，各种民用电机也在日益蓬勃地发展着。

随着工农业生产及科学事业的发展，电机的种类越来越多，但如果按照运行方式来分类，可以把它们归并为

一、将机械能转换成电能——发电机；

二、将电能转换成机械能——电动机；

三、将电能转换成电能

(1) 具有不同的电压——变压器；

(2) 具有不同的频率——变频机；

(3) 具有不同的相数——变相机；

四、在自动调节系统中起控制作用——控制电机。

如果按照电流性质的不同，电机又可以分为下面两大类：

(1) 应用于直流电系统的电机——直流电机；

(2) 应用于交流电系统的电机——交流电机。在交流电机中两个主要的类型为同步电机及感应电机。

按照标准定义，变压器并不是电机，但由于变压器基本理论的分析方法与感应电机极为类似，因此把它们归并在一起而收入电机学中，这样可以使理论研究工作方便而有条理。

第一篇 磁路与变压器

第一章 磁 路*

不论是发电机、电动机还是变压器，电磁感应是它们工作原理的基础，因此要详细了解电机及变压器的工作原理及性能，必须具备电、磁方面的基础理论知识。有关电路方面的知识，在电路课程中已进行了详细的研究。下面对磁路方面的知识进行必要的补充，为进一步研究电机及变压器的工作原理及性能准备必要的基础知识。

§ 1-1 磁感应强度、磁通、磁导率及磁场强度

一、磁感应强度及磁通

我们知道，在永磁体及通电导线周围存在着磁场，但怎样表示磁场的强弱呢？磁场最基本的特性是对场域中的载流导体有力的作用，研究磁场的强弱就是从分析载流导体在磁场中受力情况着手。当载流导线段 Δl 与磁力线相垂直时，作用在该导线段上的电磁力为

$$\Delta F = B I \Delta l \quad (1-1)$$

所以

$$B = \frac{\Delta F}{I \Delta l} \quad (1-2)$$

式中 F ——电磁力，单位是 N；

Δl ——导线段，单位是 m；

I ——电流，单位是 A；

B ——磁感应强度，单位是 T。

$$1\text{T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

也就是说，1m 长的导线，通过 1A 的电流，在磁场中受到的作用力是 1N 时，磁感应强度就是 1T。

磁感应强度是表示磁场强弱的一个物理量。在电机中，气隙处的磁感应强度约为 0.4~0.8T；铁芯中的磁感应强度约为 1~1.8T。

T 是磁感应强度的国际单位，但在目前的电机计算中，有时还采用 Gs 来作为磁感应强度的单位，它们之间的关系是

$$1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$$

磁感应强度 B 描述的只是空间每一点的磁场，如果要描述一个给定面上的磁场，就要引入另一个物理量，叫磁通量，简称磁通。如果在匀强磁场中有一个与磁场方向垂直的平面，面积为 A ，则磁通 ϕ 为

$$\phi = BA \quad (1-3)$$

在国际单位制中， B 的单位是 T， A 的单位是 m^2 ， ϕ 的单位便是 Wb。在目前的电机计算

中,有时是: B 的单位采用 Gs, A 的单位采用 cm^2 , 此时 ϕ 的单位是 Mx

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

式 (1-3) 还可以写成下面的形式, 即

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (1-4)$$

由式(1-4)可知:磁感应强度可以看成是单位面积内的磁通,所以磁感应强度又称为磁通密度。

二、磁导率

通电线圈所产生磁场的强弱与线圈中放入的介质有关。当线圈中放入某类介质时,磁场大为增强;而当放入另一类介质时,磁场可能略有削弱。表示物质这种磁性质的一个物理量叫做磁导率,用符号 μ 来表示。

物质根据磁性的不同,可以分为三类:一类叫顺磁性物质,如空气、铝等,它的磁导率比真空的磁导率略大。另一类叫逆磁性物质,如氢、铜等,它的磁导率略小于真空的磁导率。还有一类是铁磁性物质,如铁、钢、钴、镍等,它们的磁导率是真空磁导率的几百倍甚至几千倍,并且与磁场强弱有关,不是一个常数。

磁导率的单位是 H/m 。真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

三、磁场强度

磁场强度 H 的定义是

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-5)$$

如果 B 的单位是 T, μ 的单位是 H/m , 则 H 的单位是 A/m 。由于磁势的单位是 A, 因此从 H 的单位可以知道, 磁场强度 H 就是单位长度磁路上所消耗的磁势, 或单位长度磁路上的磁压降。

磁场强度有时也用 Oe 表示, $1\text{Oe} = \frac{1000}{4\pi} \text{A/m}$ 。

§ 1-2 磁路的基本定律

如同把电流流过的区域称为电路一样, 也可以把磁通通过的区域称为磁路。但是, 电路和磁路只是形式上的相似, 本质上是有所区别的。在电路中有真正的带电粒子在作定向运动, 而在磁路中却没有什么东西沿着闭合回路流动。对电来讲, 存在电的导体和绝缘体, 电流可以集中在导体中流过, 可是不存在磁的导体和磁的绝缘体。因此, 磁路概念并不象电路概念那样简明。不过由于铁磁材料的磁导率很大, 能使绝大部分磁通集中在一定的回路中通过, 因此从工程计算的角度来看, 为了简单方便, 将磁场的问题简化成磁路来处理, 在大多数情况下, 准确度已经足够了。在进行磁路计算时, 往往要应用到下面几个定律。

一、安培环路定律

实验证明: 沿着任何一条闭合回路 L , 磁场强度 H 的线积分等于该闭合回路所包围的电流的代数和, 这就称为安培环路定律或全电流定律。如用公式表示, 即为

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad (1-6)$$

在式 (1-6) 中, 电流的方向与闭合线上磁场强度的方向满足右螺旋规律时, 电流 i 取正值, 否则 i 取负值。例如在图 1-1 中, i_1 、 i_2 取正值, i_3 取负值。

二、磁路的基尔霍夫第一定律

在图 1-2 中, 如果在中间铁芯柱的线圈中通以电流, 则产生磁通, 其路径如虚线所示, 从图中显然可以看出:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_2 + \phi_3 \\ -\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 &= 0 \\ \sum \phi &= 0 \end{aligned} \quad (1-7)$$

这就是磁路的基尔霍夫第一定律。式 (1-7) 也可以这样来理解: 在图 1-2 中取一闭合面 A, 如果令穿出闭合面 A 的磁通取正值, 进入闭合面 A 的磁通为负值, 则通过闭合面磁通的代数和为零。亦即进入闭合面的磁通, 必等于离开闭合面的磁通。

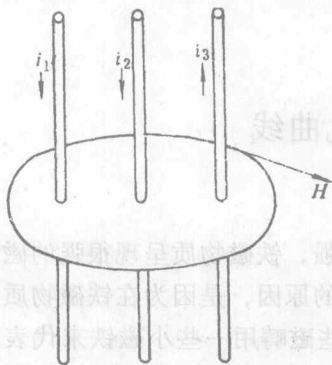


图 1-1 安培环路定律

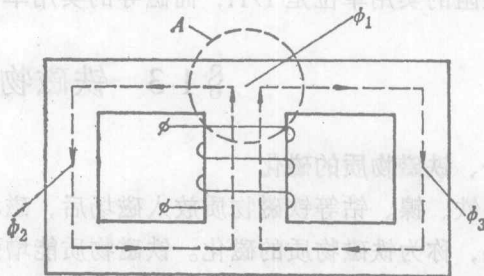


图 1-2 磁路基尔霍夫第一定律

三、磁路的基尔霍夫第二定律

在磁路计算中, 总是将磁路分为若干段, 凡材料及截面积相同的取为一段。在每一段磁路中, 由于截面积相同, 所以磁通密度 B 必定处处相等, 且由同一材料作成, 磁导率一样, 所以磁场强度相等。例如在图 1-3 所示的磁路中, 磁路由铁磁材料及空气隙两部分所构成, 而铁磁材料这一部分的截面积又分别为 A_1 及 A_2 , 故整个磁路应分为三段, 每段长度为 l_1 、 l_2 及 l_3 。每段中磁场强度是相同的, 分别为 H_1 、 H_2 及 H_3 。根据安培环路定律可得

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 = \sum NI$$

$$\text{或} \quad \sum Hl = \sum NI \quad (1-8)$$

H 的方向与电流的方向符合右螺旋规律时, 取正号; 否则取负号。 H 是单位长度的磁压降, Hl 便是一段磁路上的磁压降, $\sum Hl$ 是闭合回路上总的磁压降。 $\sum NI$ 是磁通所包围的总电流, 由它产生磁通, 所以称为磁动势, 或简称磁势。式 (1-8) 就是磁路基尔霍夫第二定律的表达式, 它是由安培环路定律演变出来的。

四、磁路的欧姆定律

如果某一段匀强磁路长为 l , 则该段磁路上的磁位差 U_m 便为

$$U_m = Hl \quad (1-9)$$

由于 $H = \frac{B}{\mu}$, 而 $B = \frac{\phi}{A}$, 将此两关系式代入式 (1-9) 中, 得

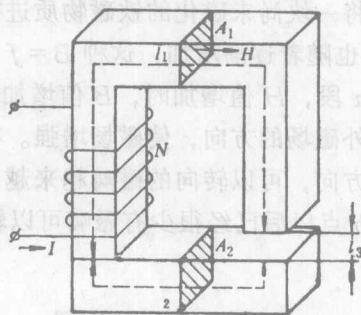


图 1-3 磁路基尔霍夫第二定律

$$U_m = Hl = \frac{B}{\mu} l = \frac{l}{\mu A} \phi = R_m \phi \quad (1-10)$$

式中 $R_m = \frac{l}{\mu A}$ ，它与电阻的计算公式形式类似，故称它为磁阻。式 (1-10) 与电路中的欧姆定律 $U = RI$ 在形式上完全一样，故称为磁路的欧姆定律。

磁阻与磁路的长度 l 成正比，与磁路的截面积 A 及磁导率 μ 成反比。由于铁磁材料的磁导率 μ 不是一个常数，故铁磁材料的磁阻是非线性的。

磁阻的倒数是磁导，用 Δ 来表示，于是

$$\Delta = \frac{1}{R_m}$$

磁阻的实用单位是 $1/H$ ，而磁导的实用单位是 H 。

§ 1-3 铁磁物质的磁化曲线

一、铁磁物质的磁化

将铁、镍、钴等铁磁物质放入磁场后，磁场将显著增强，铁磁物质呈现很强的磁性，这种现象，称为铁磁物质的磁化。铁磁物质能增强外界磁场的原因，是因为在铁磁物质内部存在着许多很小的天然磁化区，叫做磁畴。在图 1-4 中，这些磁畴用一些小磁铁来代表。在铁磁物质未放入磁场以前，这些磁畴杂乱无章地排列着，各磁畴的轴线方向不一致，磁效应互相抵消，故对外不呈现磁性（图 1-4a）。当铁磁物质放入磁场后，在外磁场的作用下，磁畴的方向渐趋一致，形成一个附加磁场，与外磁场相迭加，从而使磁场大为增强（图 1-4b）。

二、原始磁化曲线

将一块尚未磁化的铁磁物质进行磁化，在磁场强度 H 由零开始逐渐增加时，磁感应强度 B 也随着逐渐增加，这种 $B = f(H)$ 曲线就称为原始磁化曲线，其形状如图 1-5 所示。在 Oa 段， H 值增加时， B 值增加较快，这是因为随着 H 值的增加，有越来越多的磁畴趋向于外磁场的方向，使磁场增强。在 ab 段，随着 H 值的继续增加，大部分磁畴已趋向于外磁场的方向，可以转向的磁畴越来越少，故 B 值增加越来越慢，这段曲线称为磁化曲线的膝部。 b 点以后已经很少有磁畴可以转向，因此 B 值增加非常缓慢，称为磁化曲线的饱和段。

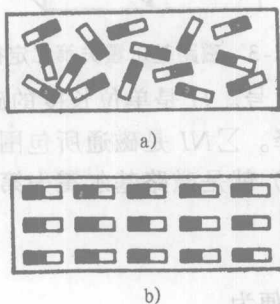


图 1-4 磁畴

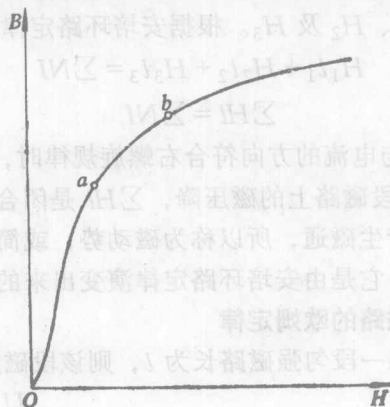


图 1-5 原始磁化曲线

三、磁滞回线

如图 1-6 所示, 当铁磁物质在 $-H_m$ 到 $+H_m$ 之间反复进行磁化若干次, 最后得到对原点对称的封闭曲线。当磁场强度从 $-H_m$ 向 $+H_m$ 增加时, 磁化过程沿曲线 $defa$ 进行。当磁场强度从 $+H_m$ 向 $-H_m$ 减少时, 磁化过程沿曲线 $abcd$ 进行。从上述的磁化过程可以看出, B 的变化总是落后于 H 的变化, 这种现象就称为磁滞。图 1-6 所示的闭合曲线称为磁滞回线。 B_m 越大, 磁滞回线面积也越大。从图 1-6 曲线可以看出, 当 H 下降到零时, B 并不下降到零而是保持一定数值, 这是因为外磁场虽然消失了, 但磁畴还不能恢复原来状态, 还保留一定磁性, 称为剩磁。去掉剩磁所必须加的反方向磁势 (Oc 段或 Of 段), 就称为矫顽力。

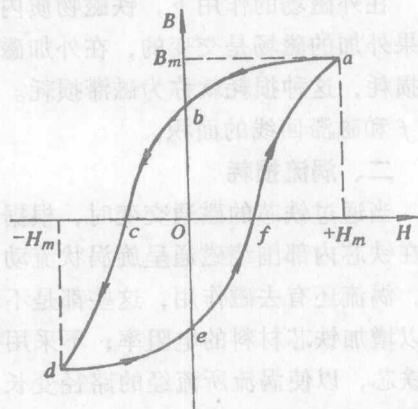


图 1-6 磁滞回线

按照磁滞回线形状的不同, 铁磁材料可分为软磁材料与硬磁材料两大类, 磁滞回线窄、剩磁和矫顽力小的材料称为软磁材料, 如铸铁、铸钢, 硅钢片等。软磁材料的磁导率较高, 可用以制造变压器及电机的铁芯。磁滞回线宽、剩磁及矫顽力大的材料称为硬磁材料, 如铝镍钴铁的合金和稀土合金等。由于硬磁材料的剩磁大, 所以常用来制造永久磁铁。

四、基本磁化曲线

选择不同的磁场强度 H_m 进行反复磁化, 可以得到一系列大小不同的磁滞回线, 如图 1-7 所示。将各磁滞回线的顶点连接起来, 所得到的一条曲线, 称为基本磁化曲线。基本磁化曲线并不是原始磁化曲线, 但差别不大。工程上采用的都是基本磁化曲线。从式 (1-4) 及式 (1-8) 可以看出: 磁感应强度 B 是正比于磁通 ϕ 的, 磁场强度 H 是正比于励磁电流 I 的。因此只要适当地改变 $B=f(H)$ 曲线的尺标, 磁化曲线也可以用 $\phi=f(I)$ 曲线来表示, 或用 $\phi=f(F)$ 来表示, 其中 $F=IN$ 是励磁磁势, N 是线圈匝数。

五、退磁过程

铁磁物质磁化以后, 要使 $H=0$ 时 $B=0$, 即要消除剩磁, 必须进行退磁处理。进行退磁时, 将铁磁物质放在螺线管线圈中, 按图 1-8 所示的过程进行退磁。由于 H_m 逐渐减少到零, 因而磁滞回线的面积也逐渐减小到零, 故最后剩磁为零。

用交流电去磁时, 因交流电本身的方向是变化的, 所以只要逐渐减小电流值, 即可达到去磁的目的。

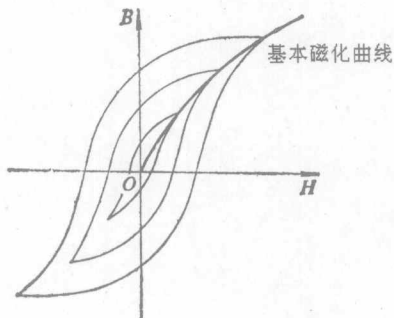


图 1-7 基本磁化曲线

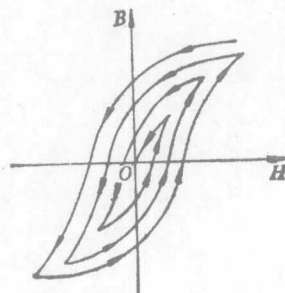


图 1-8 退磁过程

§ 1-4 磁滞损耗与涡流损耗

一、磁滞损耗

在外磁场的作用下，铁磁物质内部磁畴的方向会转动，以使磁畴的方向与外磁场一致。如果外加的磁场是交变的，在外加磁场的作用下，磁畴便来回翻转，彼此之间产生摩擦而引起损耗，这种损耗就称为磁滞损耗。分析表明：单位体积内的磁滞损耗正比于磁场交变的频率 f 和磁滞回线的面积。

二、涡流损耗

当通过铁芯的磁通交变时，根据电磁感应定律，铁芯内将产生感应电势和电流。这些电流在铁芯内部围绕磁通呈旋涡状流动，故称为涡流。涡流在铁芯中流动时造成能量损耗，此外，涡流还有去磁作用，这些都是不利的。为了减少涡流的影响，可以在钢材中加入少量的硅以增加铁芯材料的电阻率；不采用整块的铁芯，而采用互相绝缘的由许多薄硅钢片叠起来的铁芯，以使涡流所流经的路径变长，从而大大减少涡流（图 1-9）。所以变压器及电机的铁芯都是采用厚度为 0.35 或 0.5mm 的硅钢片来制造。

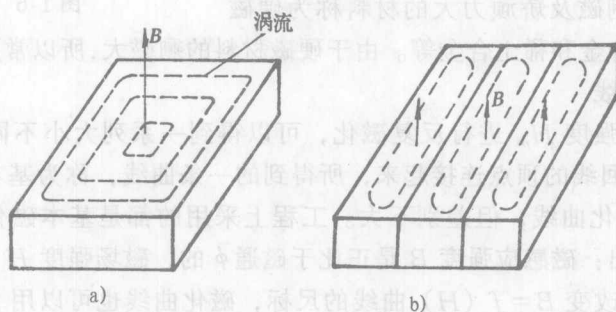


图 1-9 涡流路径

磁滞损耗和涡流损耗合在一起，总称为铁耗，它正比于磁通密度 B_m 的平方及磁通交变频率 f 的 1.2~1.3 次方。

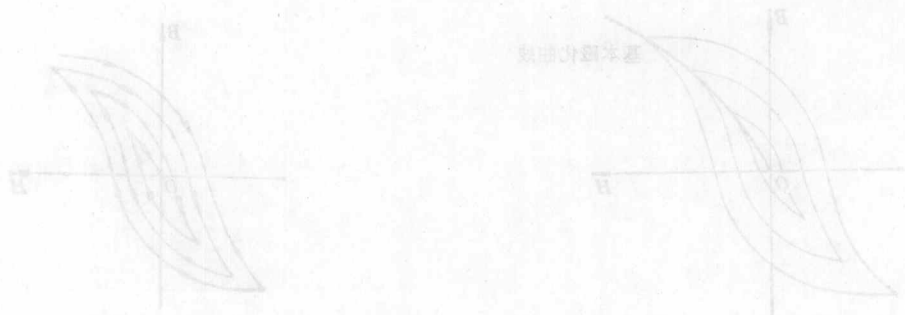


图 1-10 磁滞回线

图 1-11 磁滞回线

第二章 变压器的类别和构造

§ 2-1 变压器的工作原理和分类

一、工作原理

变压器的工作原理如图 2-1 所示。在绕组 1 上外施一交流电压 u_1 ，便有电流 i_1 流入，因而在铁芯中激励一交变磁通 ϕ 。磁通 ϕ 同时也与绕组 2 相匝链，由于磁通 ϕ 的交变作用，在绕组 2 中便感应出电势 e_2 。根据电磁感应定律可知：绕组的感应电势正比于它的匝数。因此只要改变绕组 2 的匝数，便能改变感应电势 e_2 的数值。如果绕组 2 接上用电设备，绕组 2 便有电能输出，这就是变压器的工作原理。因此变压器就是利用电磁感应原理来升高或降低电压的一种静止的电能转换器。

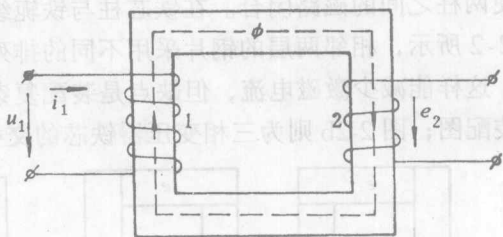


图 2-1 变压器的工作原理图

绕组 1 吸收电能，被称为一次绕组，有关一次绕组的各量均以下标“1”来表示，例如一次侧的功率、电流、电阻分别为 P_1 、 i_1 、 R_1 。绕组 2 输出电能，被称为二次绕组，有关二次绕组的各量均以下标“2”来表示，例如二次侧的功率、电流、电阻分别为 P_2 、 i_2 、 R_2 。

两个绕组中电压较高的一个绕组被称为高压绕组；电压较低的一个绕组被称为低压绕组。用来升高电压（ $u_2 > u_1$ ）的变压器，称为升压变压器，用来降低电压（ $u_2 < u_1$ ）的变压器，则称为降压变压器。

二、变压器的分类

随着工农业及科学技术的不断发展，变压器获得了极为广泛的应用。在电力系统中电能的传送和分配，在工厂企业中各种电能的应用，以及无线电通信、自动控制等方面，都需要应用变压器这样一种十分重要的设备。由于变压器的应用范围十分广泛，因此它的种类很多，容量小的只有几伏安，大的可到数十万千伏安；电压低的只有几伏，高的可达几十万伏。如果按照变压器的用途来分类，几种应用得最广泛的变压器为

(1) 电力变压器 在电力系统中用来传送和分配电能，是所有变压器中用途最广、生产量最大的一种变压器。

(2) 互感器 用在仪表测量和控制线路中。

(3) 专用变压器 例如电炉变压器、电焊变压器、整流变压器、高压试验变压器，以及供医疗和无线电通信用的特殊变压器，等等。

如果按照相数来区分，则有单相变压器、三相变压器。按照绕组数目来区分，则有双绕组变压器、三绕组变压器，等等。变压器种类虽多，但各种变压器运行时的基本物理过程，以及分析变压器性能的基本方法，大体上都是一样的，因此在本篇中将以单相和三相电力变压器为主要对象，来研究变压器中的一些基本问题。