

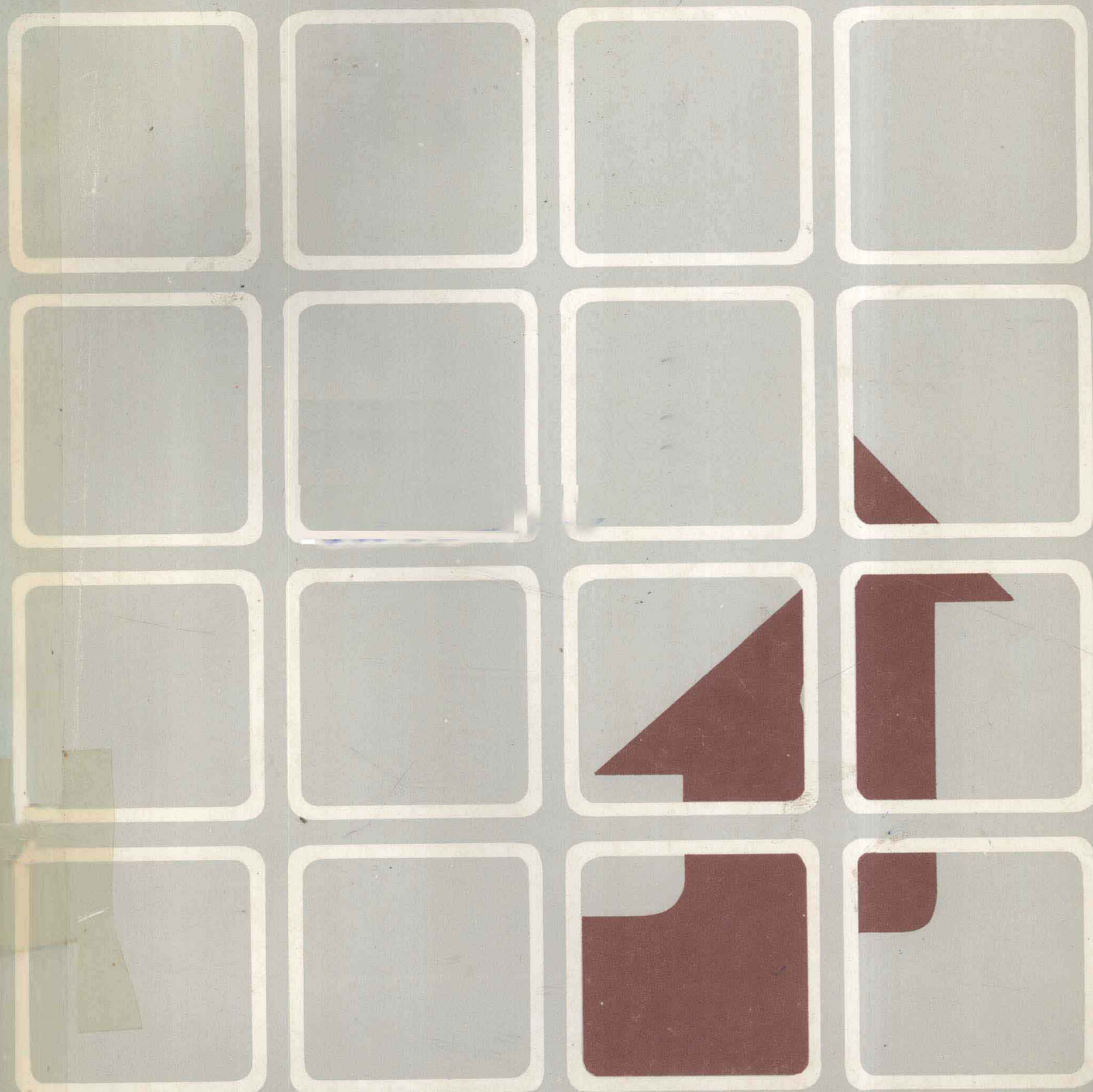
城镇工矿企业电气技术工人培训教材 ②

- 电机与变压器
- 常用电器与控制
- 电工测量与仪表

汪德澍 主编

冯 竞 主审

云南科技出版社



城镇工矿企业电气技术工人培训教材



汪德澍 主编

冯 竞 主审

电 机 与 变 压 器

常 用 电 器 与 控 制

电 工 测 量 与 仪 表

云南科技出版社

责任编辑：林德琼
封面设计：袁亚雄

城镇工矿企业电气技术工人培训教材 ①
电机与变压器
常用电器与控制
电工测量与仪表

汪德澍 主编
冯 竞 主审

云南科技出版社出版发行 (昆明市书林街100号)

清 泉 彩 印 厂 印 装

开本：787×1099

开本：787×1092 1/16 印张：16.75 字数：416000

1990年1月第1版 1990年1月第1次印刷

印数：1~5000册

ISBN 7-5416-0265-5/TM·2 定价：6.20元

前 言

为提高电气工人的技术水平，保证电网安全稳定运行，促进我国科学技术现代化的迅速实现，国家标准局将制订颁布《城镇工矿企业电气工人技术标准》（简称“标准”）。作为今后衡量、考核工矿企业电气工人技术水平的主要依据，和进行电工培训、技术定级时的参照标准。

云南省电机工程学会供用电专业委员会和理论电工专业委员会，根据上述“标准”大纲，组织云南大学、昆明工学院、云南工学院、昆明大学等高等院校长期从事有关专业教学和生产实践的教师，编写了这套《城镇工矿企业电气技术工人培训教材》。

教材主要针对“标准”中4—6级电气工人“应知”、“应会”要求的基本技术理论基础和工艺学知识编写。其中有些部分兼顾了“标准”对7、8级电气技术工人的较高要求。全套教材包括：电工数学、电路理论、电子技术、电机变压器、工厂常用电器、电机拖动控制、电工测量仪表，以及有关的电工工艺学等内容。计二卷六篇，共三十五章。第一、二、三篇编为第一卷，第四、五、六篇编为第二卷。其中，第一篇基础电工数学的第1—4章为裴文彩编写，第5—7章为李德明编写，第8章为董振勋编写，全篇由李德明统稿；第二篇电路基本原理的第9章和第11章为范彝陵编写，第10章和第12章为田育慧编写，第13—15章为全正盖编写，全篇由范彝陵统稿；第三篇电子技术基础的第16—18章为童汉涛编写，第19—21章为兰得春编写，全篇由兰得春统稿；第四篇电机与变压器为肖钺编写；第五篇常用电器与控制为管前新编写；第六篇电工测量与仪表为秦光培编写。

全书由汪德澍主编，冯竞主审。

该书取材紧扣“标准”，从电气工人所应具备的电工数学基础开始，结合具体生产实践，循序渐进，从理论到实际讲述电工技术，文中除了列举大量实例之外，章后还附有各类习题，易学易懂，适合具有初中以上文化程度的电气工人自学，及作为电气技术工人培训的系列教材。

该书的编写、出版，得到许多单位和个人的大力支持、关心和帮助，在此一并致谢！望广大读者在使用过程中提出宝贵意见，以便再版时修订。

编辑委员会

1989年11月于昆明

编辑单位:

理论电工专业委员会
云南省电机工程学会
供用电专业委员会

云南省劳动保护宣传教育中心

编辑委员会:

主任委员: 胡景坤

副主任委员: 冯 竞 陈先根 陈绳武

委 员: 胡景坤 冯 竞 陈先根 陈绳武 汪德澍
管前新 李德明 范彝陵 裴文彩 陈济伦
戴开煌 韩 莉

主编: 汪德澍

主审: 冯 竞

编写:

第一卷

基础电工数学: 裴文彩 李德明 董振勋

电路基本原理: 范彝陵 田育慧 全正盖

电子技术基础: 童汉涛 兰得春

第二卷

电机与变压器: 肖 钺

常用电器与控制: 管前新

电工测量与仪表: 秦光培

第二卷 目 录

第四篇 电机与变压器

第二十二章 磁和磁路	1
第一节 磁与电磁.....	1
第二节 磁的基本现象.....	1
第三节 电磁力.....	3
第四节 电磁感应.....	3
第五节 磁路的基本定律.....	5
第六节 交流铁芯线圈铁芯损耗.....	6
习 题	6
第二十三章 变压器	7
第一节 变压器的结构.....	7
第二节 变压器的工作原理.....	8
第三节 变压器的负载运行.....	9
第四节 变压器的运行特性.....	10
第五节 三相变压器.....	11
第六节 三相变压器的并联运行.....	12
第七节 三相变压器的铭牌数据.....	13
第八节 其它类型的变压器.....	14
第九节 小型单相变压器计算.....	15
第十节 变压器的维护与故障分析.....	17
习 题	19
第二十四章 直流电动机	20
第一节 直流电动机的工作原理 及结构.....	20
第二节 直流电动机的铭牌数据.....	22
第三节 直流电动机的电磁转矩 和电势.....	22
第四节 直流电动机的电枢绕组.....	24
第五节 换向与火花.....	26
第六节 直流电动机损耗和效率.....	27
第七节 他励直流电动机的机械 特性.....	27
第八节 电力拖动系统的概念.....	29
第九节 直流电动机的启动和制动.....	29

第十节 他励直流电动机的调速 和反转.....	32
第十一节 直流电机故障分析.....	33
习 题	36
第二十五章 三相异步电动机及应用	37
第一节 三相异步电动机的分类 及其基本结构.....	37
第二节 定子绕组的旋转磁场.....	39
第三节 异步电动机的工作原理.....	42
第四节 异步电动机的电磁转矩.....	43
第五节 异步电动机的机械特性.....	44
第六节 三相异步电动机启动.....	46
第七节 三相异步电动机的制动.....	49
第八节 三相异步电动机调速.....	51
第九节 三相异步电动机的绕组.....	53
第十节 电动机的节能措施.....	60
第十一节 三相异步电动机发电.....	61
第十二节 三相异步电动机常见 故障及处理.....	62
习 题	63
第二十六章 微电机和同步电机	66
第一节 单相异步电动机的工作 原理.....	66
第二节 单相异步电动机的类型 及其工作原理.....	68
第三节 单相异步电动机的绕组.....	69
第四节 XD型 洗衣机用电机.....	71
第五节 电风扇用电机.....	74
第六节 单相交流串激电动机.....	75
第七节 单相异步电动机的故障 及处理.....	76
第八节 同步发电机.....	78
第九节 同步电动机.....	82
第十节 控制用电机.....	83
习 题	88

第五篇 常用电器与控制

第二十七章 低压电器 89

第一节 开关设备 89

第二节 熔断器和热继电器 99

第三节 接触器与按钮 109

第四节 继电器与行程开关 114

第二十八章 电力拖动自动控制的基本 电路 127

第一节 自动控制线路图及其元
件符号 127

第二节 电动机控制的基本环节 133

第三节 电动机控制的基本方法 137

第四节 电动机的保护 141

第二十九章 三相异步电动机的控制 144

第一节 三相鼠笼式异步电动机
的启动控制 144

第二节 绕线式异步电动机的启
动控制 150

第三节 三相鼠笼式异步电动机
的制动控制 153

第四节 绕线式异步电动机的制
动控制 156

第五节 多速电动机的控制 159

第六节 几种机械设备的控制线路 164

第三十章 直流电动机的控制 177

第一节 直流他励电动机的控制 178

第二节 直流串励电动机的控制 182

第三节 直流发电机——电动机
系统 183

第四节 晶闸管——电动机系统 188

第六篇 电工测量与仪表

第三十一章 电工仪表的一般知识 199

第一节 电工仪表的分类 199

第二节 电气测量的误差 200

第三节 电工仪表的表盘符号 202

第三十二章 电流表、电压表及万用表 203

第一节 磁电系电流表 203

第二节 磁电系电压表 205

第三节 电磁系电流表和电压表 206

第四节 万用表的直流电流测量
电路 209

第五节 万用表的直流电压测量
电路 211

第六节 万用表的交流电压测量
电路 212

第七节 万用表的电阻测量电路 216

第八节 万用表的具体使用 220

第三十三章 功率和电能的测量 223

第一节 电动系功率表 223

第二节 三相有功功率的测量 228

第三节 三相无功功率的测量 231

第四节 感应系电度表 234

第五节 电度表的调整 237

第六节 电能的测量 241

第七节 电焊机电能的测量 249

第八节 三相无功电能的测量 250

第三十四章 交直流电桥 254

第一节 磁电系检流计 254

第二节 直流单臂电桥 255

第三节 直流双臂电桥 257

第四节 交流电桥 261

第三十五章 其它常用电工仪表 264

第一节 兆欧表 264

第二节 接地电阻测定器 268

第三节 电动系功率因数表 271

第四节 三相功率因数表 273

第二十二章 磁和磁路

在电工技术中，很多电工设备，如电机、变压器、电磁铁、电工测量仪表以及其它铁磁元件中，不仅有电路问题，同时还有磁路问题。本章对磁路的基本知识作介绍，为研究电机及变压器等电工设备准备必要的基础知识。

第一节 磁与电磁

一、磁的基本现象

我们知道，一块永久磁铁总是有二个磁极，一个称为南极，用字母S表示。另一个称为北极，用字母N表示。磁铁周围空间有力的存在，称为磁力。磁力所及空间称为磁场。磁场强度用H表示，H的单位为安/米。

磁场的存在，可以用磁力线形象地表征。磁场强度变化的情况，可以用磁力线的疏密来表示，磁力线愈密，表示磁场强度愈强。在匀强磁场里，磁力线疏密均匀，并且平行，如图22—1所示。

在磁场里垂直穿过横截面S的磁力线根数叫做磁通量。



图22—1

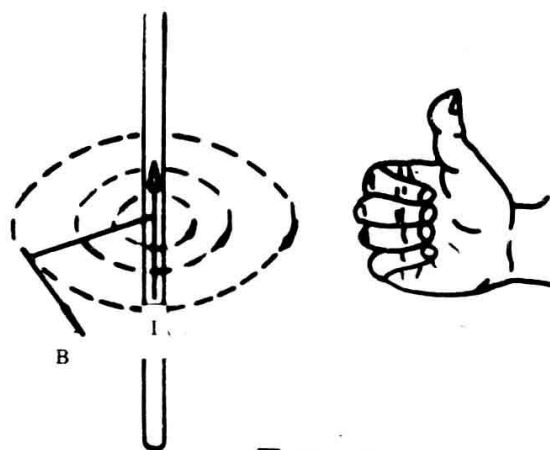


图22—2

二、电流的磁场

实验证明，通电导体周围有磁场存在。并且通电导体周围的磁力线方向是随着电流方向的改变而改变的。为了便于记忆磁场与电流方向的关系，可应用以下简便的法则来判断：用右手握住导线，拇指表示电流方向，其余四指表示磁力线（磁场）方向。这个法则称为右手定则。如图22—2。

这种现象说明：电与磁是有内在联系的，是相互依赖而存在的。

第二节 磁的基本现象

实际工作中常常把导线绕成圆形线圈，称为螺线管，如图22—3所示。通电螺线管磁场

电流方向



图22—3

中的磁力线方向可用下列方法判断：用右手握住螺线管，四指表示电流的方向，则拇指所指就是螺线管内部磁场的磁力线方向，也就是螺旋管磁场的N极。

一、磁动势

螺线管内的磁场强度是与螺线管线圈的匝数N和通入的电流强度成正比。因此可以定义表征螺线管磁场强度的磁动势为：

$$F = IN \quad (22-1)$$

式中 I 为通入螺线管的电流，单位为安培A；N为螺线管线圈的匝数，单位是匝；F为螺线管的磁动势或简称磁势，单位安匝。

二、磁感应强度

螺线管内的磁场强度，不仅与螺线管的磁动势有关，而且与螺线管内的物质有关。如果在螺线管内插入一根软铁棒，那么，虽然不增加螺线管的磁动势，螺线管内的磁场也会有很

大的增强。实验证明，铁棒插入螺线管内，在螺线管内的磁场作用下铁棒就成为磁铁。如果用磁力线的多少来表示磁场强度的大小，这时螺线管内部除了螺线管中电流产生的磁力线外，又增加了铁棒磁化后所产生的磁力线。管内的磁力线总数就是上述二种磁力线的总和，这种磁力线的总和称为磁感应线。

假设在软铁棒未插入前，螺线管里的磁场强度为 H ，在铁棒插入后，增加的磁场强度为 H' ，总的磁场强度为 $H + H'$ ，叫磁感应强度，通常用 B 来表示。 H 和 B 都是矢量（即不仅有大小而且有一定的方向），在磁场中垂直通过某一横截面积 S 的磁感应强度 B 的大小，可表示为

$$B = \frac{\phi}{S} \quad (22-2)$$

因而

$$\phi = BS \quad (22-3)$$

在国际单位制中， B 的单位是特斯拉（T）； S 的单位是米²（m²）； ϕ 的单位便是韦伯（wb）。在目前电机计算中，有时 B 的单位采用高斯（GS）， S 的单位采用厘米²（cm²），此时 ϕ 的单位是麦克斯韦（MX）。1韦伯 = 10⁸麦克斯韦。

磁感应强度 B 与磁场强度的比值叫做导磁系数，通常用 μ 表示。即

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (22-4)$$

μ 的单位为亨/米（H/m）。真空中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米。

μ 与磁场内的介质的特性有关。如果螺线管的磁势不变，但介质不同时管内同一点的磁感应强度也就不相同。例如电机、变压器及各种铁磁元件中都放入高导磁系数的铁心。在这种具有铁心的线圈中通入不大的励磁电流，便可产生足够大的磁通和磁感应强度。

三、铁磁物质的磁化

导磁能力很强的物质称为铁磁物质。铁磁物质主要是铁、镍、钴及其合金，它们的导磁系数是真空导磁系数的几百位甚至几千倍，并且与磁场强度有关，不是一个常数。

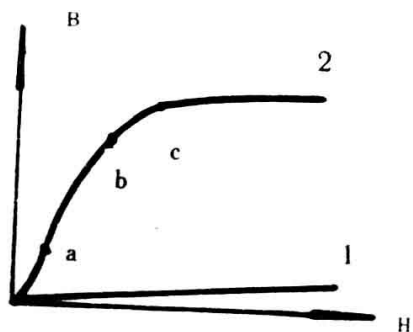


图 22—4

图22—4实线所示是钢的起始磁化曲线。这条曲线共分三部分。第一部分 ab 线段近似为直线，当 H 增加（即螺线管电流增加），磁感应强度 B 成正比的增加。在这种情况下，铁磁体内大部分单元磁体迅速转向线圈电流的磁场方向。使 B 迅速增大。第二部分， bc 线段是磁感应强度 B 增加较慢，叫做磁化曲线的膝部。在这一段里，只有一小部分单元磁体随电流磁场 H 增大而转向磁场方向。第三部分是 c 点以后部分，叫铁磁体的饱和区，在此区域内 H 增加，

磁感应强度增加极少，这表示几乎所有的单元磁体都已经转向磁场方向了，所以 H 增加， B 增加很少。

实验表明：当线圈电流被切断以后， $H = 0$ ，但铁磁体内的 $B = B_r$ （图22—5）。而且是会在相当长的时间内保留着磁性，这种现象叫剩磁现象。只有在加上相反向的磁场强度 $-H_c$ 时才能消除剩磁；这种方法叫去磁。这种磁感应强度滞后于磁场强度变化的性质称磁性物质的磁滞性。

按照磁性物质的磁性能，磁性材料可以分为两种类型。

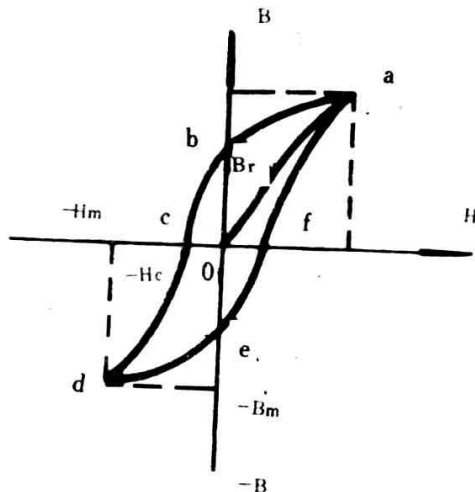


图 22—5

(1) 软磁材料：这种磁性材料仅需要较小的矫顽磁力，（即 H_c 较小），磁滞回线较窄。一般用来制造电机、电器及变压器铁心。如常用的软铁、硅钢、铁镍合金等。(2) 硬磁材料：具有较大的矫顽磁力（ H_c 大、 B_r 大）磁滞线较宽。一般用来制造永久磁铁。常用的有高碳钢、钴钢及特种合金等。

第三节 电磁力

将一导体放入磁场中，导体上没有电流通过时，导体在磁场中不受电磁力的作用。但导体通电后，导体就会运动，如图22—6所示，这说明通电导体在磁场中受到力的作用，这种力叫电磁力。电磁力的方向可以应用左手定则确定：伸开左手，让姆指跟其余四指垂直。把左手放入磁场中，手心迎向磁力线，并使四指表示电流方向，则姆指所指方向就是电磁力的方向。

实验证明，当通电导体和磁力线之间的夹角为 α （图22—7）时，磁场对通电导体的作用力 F 的大小与导体中的电流 I 、磁感应强度 B 以及导体的有效长度成正比，可写成

$$F = BIl \sin \alpha \quad (22-5)$$

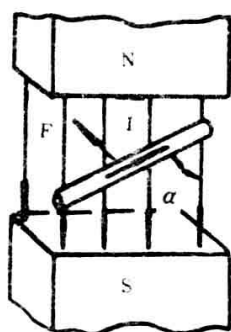


图22—7

式中 B 的单位是 T ； I 的单位为 A ； l 的

单位为 m ，则 F 的单位为牛顿 (N)。1 牛顿 = 0.102 公斤。

例 1—1 长 0.5 米的导线通过 20 A 的电流，导线所处磁场的磁感应强度是 0.2 T，并与导线夹角成 30° ，求导体所受的力。

解：已知 $l = 0.5m$ ， $I = 20A$ ， $B = 0.2T$ ， $\alpha = 30^\circ$ 。

$$F = BIl \sin 30^\circ = 0.2 \times 0.5 \times 20 \sin 30^\circ = 1 N = 0.102 kg$$

答：导体所受的力是 1 N。

在公式 (1—5) 中，当 $\alpha = 0^\circ$ 时 $\sin \alpha = 0$ ，此时导线与磁力线平行，则 $F = 0$ 。当 $\alpha = 90^\circ$ 时 $\sin \alpha = 1$ ，这时导线垂直于磁力线，导体所受到电磁力为最大。

第四节 电磁感应

英国物理学家法拉第经过多年的实验研究于 1831 年发现导体在磁场中作切割磁力线运动时会感生电流，后来在这个基础上制成了发电机，从此电能就在科学技术上、生产上和生活中，逐渐得到广泛应用。

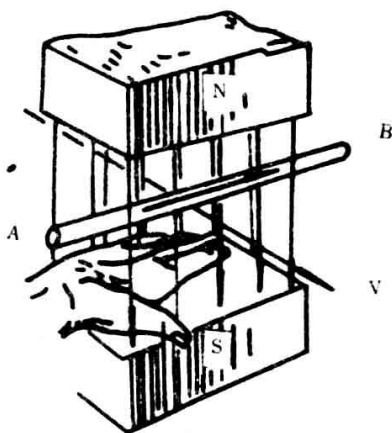


图22—8

产生电磁感应现象的两种情况：

1、导体在磁场里作切割磁力线的运动，导体中将产生感应电势。如果电路闭合则将产生电流。（图22—8）现在来研究导体在磁场里切割磁力线时，感应电势的方向。设导体 AB 在磁场里沿箭头所指方向运动，切割磁力线则在导体中将产生感应电势，感应电势的方向可用右手定则确定：伸开右手，让姆指跟其余四指垂直。把右手放入磁场中，让磁力线从手心进入，使姆指指向导线运动方向，这时其余四指所指的就是感应电势的方向。如果电路闭合，就在电路中产生感应电流，其方向与感应电势方向一致。

从前节分析可知，当导体中有感应电流流过时，感应电流就与磁场相互作用产生电磁力，电磁力的方向可用左手定则确定。如图22—8上虚线箭头F所示。这个力是阻碍导体运动的。这说明外力要克服阻力F做功，其结果就是使机械功转换成了电能EI。

下面分析感应电势的大小：（图22—9）设长度为 l 的直导体，在磁感应强度为 B 的均匀磁场中以速度 V 运动， V 的方向与磁力线相交成 α 角，感应电势为：

$$E = BlV \sin \alpha \quad (22-6)$$

式中 E 为磁感应电势 (V)；

l 为导线有效长度(m)；

B 为磁感应强度 (T)；

V 为运动速度(米/秒)；

α 为导线运动方向与磁力线方向的夹角(度)。

讨论：（1）当 $\alpha = 90^\circ$ ，即导体运动方向垂直于磁力线的方向，则感应电势为最大 $E = BlV$ 。

（2）当 $\alpha = 0^\circ$ ，导体平行于磁力线方向运动(不切割磁力线)则 $E = 0$ 不产生感应电势。

（3）当 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时 $0 < E < BlV$ 。

例1—2 如磁感应强度 $B = 2\text{ T}$ ，导体有效长度 $l = 0.24\text{ m}$ ，以相对速度 $V = 25\text{ m/秒}$ 垂直于磁力线运动，求导体中的感应电势有多大？

解：已知 $B = 2\text{ T}$ ， $l = 0.24\text{ m}$ ， $V = 25\text{ 米/秒}$ ， $\alpha = 90^\circ$ ，求 $E = ?$

$$E = BlV \sin \alpha = 0.2 \times 0.24 \times 25 \times \sin 90^\circ = 12\text{ V}$$

答：产生12V的感应电势。

2、穿过闭合电路的磁力线发生变化时，闭合电路中也将会产生感应电势和感应电流。

假定铁心上绕有二个线圈，（图22—10）其中一个线圈通入交流电流，则将产生交变的磁通。那么，穿过线圈1和2的磁通是随时间交变的。在线圈1和线圈2中产生感应电势，和感应电流。感应电流产生的磁场总是阻碍原来的磁场变化。这种感应电流的变化总是要使自己所产生的磁场来阻碍原来磁场的变化的。这个规律称为楞次定律。图22—10中假定 ϕ 正在沿所标定的正方向增加，则该时刻的 e_2 、 I_2 和 ϕ_2 方向如图22—10所标的方向所示。

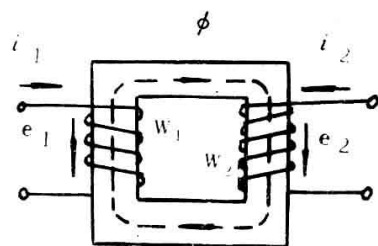


图22—10

在线圈2中产生的感应电势 e_2 的大小与磁通变化率成正比。

$$\text{即} \quad e_2 = -w \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (22-7)$$

式中 w 为线圈2的匝数； $\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1$ 是 $\Delta t = t_2 - t_1$ 一段很短暂时间内磁通的变化量， t_1 时刻穿过线圈的磁通为 ϕ_1 ， t_2 时刻为 ϕ_2 。

式中“—”号表示感应电势所产生磁场的方向总是阻碍原来磁通变化。

例1—3 在一个具有300匝的线圈内，磁通在经过0.2秒时间由 $4 \times 10^{-3}\text{ T}$ 减少到0，求线圈中的感应电势。

解：已知 $W = 300$ 匝， $\Delta t = 0.2$ 秒， $\Delta \phi = 0 - 4 \times 10^{-3} = -4 \times 10^{-3}\text{ T}$ ，求 $e = ?$

$$e = -W \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -300 \times \frac{(-4 \times 10^{-3})}{0.2} = 6\text{ V}$$

答：线圈中感应电势为6 V。

第五节 磁路的基本定律

如果把电流流过的区域称为电路，那么，也可以把磁通通过的区域称为磁路。磁路概念并不象电路概念那样简明。但是由于铁磁材料的导磁系数很大，能使绝大部分磁通集中在一定的区域内通过，因此从工程的角度来看，为了方便起见，将磁场问题简化成磁路来处理，在大多数情况下，准确度已能满足要求。在进行磁路计算时，经常要应用以下几个定律。

一、磁路的欧姆定律

与电路中的欧姆定律对应，其表达式为

$$\phi = \frac{F}{R_m} \quad (22-8)$$

式中 R_m 为某一匀强磁路的磁阻， $R_m = \frac{l}{\mu S}$ l 是磁路长度； S 为磁路的截面积； μ 磁路铁磁材料的导磁系数，它不是一个常数，故铁磁材料的磁阻是非线性的。 F 为磁动势。

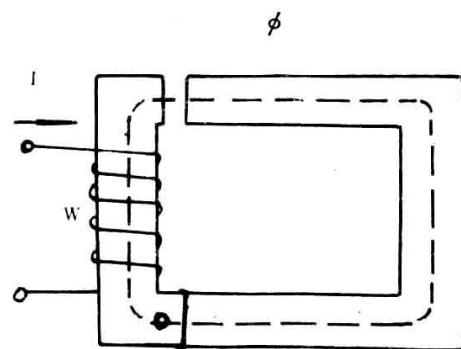


图 22-11

二、磁路的基尔霍夫定律

在磁路计算时，总是把磁路分为若干段，凡材料及截面面积相同的取为一段。在每段磁路中，由于截面积相等，所以磁密处处相等，而且由于 μ 相同，所以磁场强度 H 也一样。例如图 22-11 所示是一继电器磁路，由三段磁路串联而成。（其中一段为空气隙）如已知磁通 ϕ 和各段的材料及截面则可按下方法计算：

$$B_1 = \frac{\phi}{S_1} \text{ 由磁化曲线}$$

$$B_1 = f(H) \rightarrow H_1 \rightarrow H_1 l_1$$

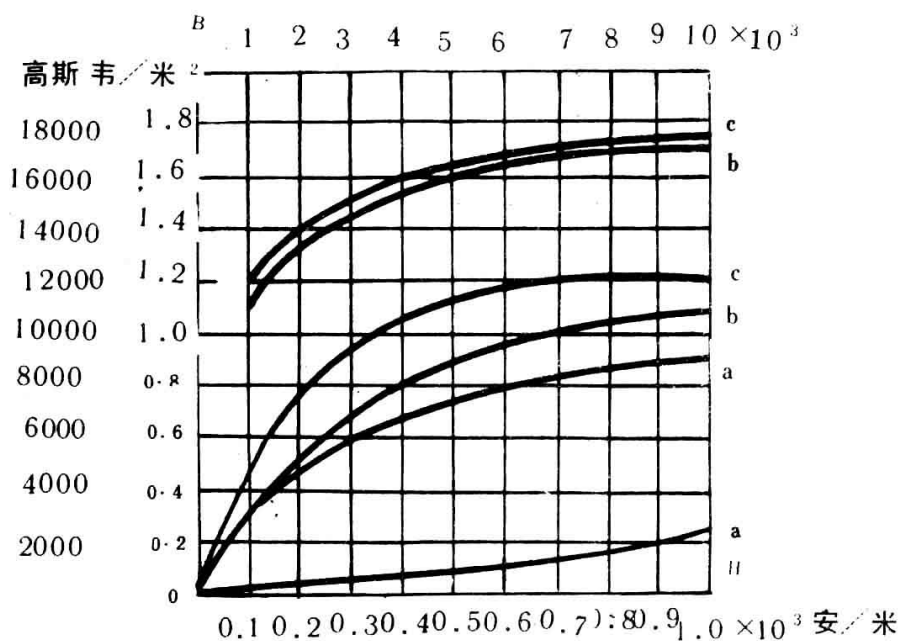


图 22-12

$$B_2 = \frac{\phi}{S_2} \text{ 由 } B_2 = f(H) \rightarrow H_2 \rightarrow H_2 l_2 \quad B_0 = \frac{\phi}{S_1} \rightarrow H_0 = B_0 / \mu_0 \rightarrow H_0 \delta$$

$$\text{则 } H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 \delta = NI \quad \text{或} \quad \sum Hl = \sum I \quad (22-9)$$

$\sum Hl$ 是闭合磁路的总磁压降 = 磁通包围的总电流 $\sum I$ = 作用在磁路上的磁势 NI 。

例 1-4 一个闭合的均匀铁心的线圈，其匝数为 300 匝，铁心中的磁感应强度 $B = 0.9$ 特，磁路平均长度 $l = 45\text{cm}$ ，试求（1）铁心材料为硅钢片时线圈中的电流；（2）由于检修时不注意使磁路出现一空气隙，其长度等于 0.2 厘米，在这种情况下的线圈电流将产生什么后果？

解：（1）由磁化曲线（图 22-12） $B = f(H)$ 查出铁心材料为硅钢片时的 $H = 260$ 安/米。

$$I = \frac{Hl}{N} = \frac{260 \times 0.45}{300} = 0.39\text{A}.$$

（2）磁路中出现 $\delta = 0.2\text{cm}$ 的气隙，这时保持 $B = 0.9\text{T}$ 不变，则 $H = 260$ 安/米。

$$\text{空气隙中 } H_0 = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0.9}{4\pi \times 10^{-7}} = 7.2 \times 10^5 \text{ A/m}$$

由磁路的基尔霍夫定律得

$$I \cdot N = \Sigma (Hl) = Hl + H_0 \delta$$

$$I = \frac{Hl + H_0 \delta}{N} = \frac{260 \times 0.45 + 7.2 \times 10^5 \times 0.2}{300} = 480.4 \text{ A}。$$

可见，出现了空气隙，线圈中的电流增大到 480.4 A，使线圈烧毁。

磁性物质不同，磁化曲线也不同，图22—12示出了a铸铁、b铸钢、C硅钢片等几种材料的磁化曲线。

第六节 交流铁心线圈铁心损耗

交流铁芯线圈中，除了由于线圈本身存在电阻而产生的铜耗外，还存在有铁芯损耗，主要是磁滞和涡流损耗。现分述如下：

一、磁滞损耗

在外磁场作用下，铁磁物质内部的小单元磁体的方向会转动，使小单元磁体的方向与外磁场一致。如果外加磁场是交变的，则在外加磁场作用下，小磁单元体就会来回翻转，彼此之间产生摩擦而引起损耗，这种损耗叫磁滞损耗。实验证明，单位体积内所产生的磁滞损耗能量与磁滞回线所包围的面积成正比。为了减小磁滞损耗，应选用磁滞回线窄小（即 H_{c1} ）的材料制造铁芯。硅钢片磁滞损耗较小，是交流铁芯中常用的材料。

二、涡流损耗

当线圈中通有交流时，它所产生的磁通也是交变的。因此，不仅要在线圈中产生感应电势，而且在铁芯中也要产生感应电势和感应电流。这种感应电流叫涡流，它在垂直于磁通方向的平面内环流着。如图22—13（a）所示。

涡流在铁芯中产生涡流损耗引起铁芯发热。为减小涡流损耗各种铁芯在顺磁场方向都是由彼此绝缘的硅钢片叠成，以便切断涡流通路，减小涡流损耗。此外，硅钢片中含少量的硅，因而电阻率较高，以限制涡流。如图22—13b所示。

在交流铁芯中，上述这两种损耗合称为铁芯损耗。铁芯损耗近似的与铁芯内磁感应强度的最大值 B_m 的平方成正比，故铁芯中的 B_m 不能选得太大。

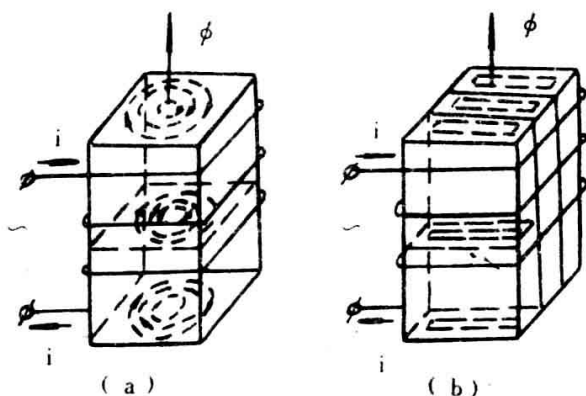


图22—13

习 题

22—1、通电导体周围存在磁场，磁力线方向如何确定？螺线管通电后管内磁场的极性如何确定？

22—2、什么叫磁动势？磁场强度和磁感应强度有什么关系？

22—3、铁磁物质的饱和特性怎样解释？导磁系数 μ 是常数吗？

22—4、什么是电磁力？其方向如何确定？

22—5、产生感应电势的二种方式是哪二种？感应电势的方向如何确定？

22—6、尺寸一定的磁路中的磁通大小与哪些因素有关？

22—7、交流铁芯线圈中有哪些损耗？如何减小损耗？

22—8、一个线圈其匝数 $N=1000$ 匝，绕在由铸钢制成的闭合铁芯上，铁芯截面积 $S=20\text{cm}^2$ ，铁芯平均长度为 $l=50\text{cm}$ ，要在铁芯中产生磁通 $\phi=0.002$ 韦，试问铁圈中应通入多大的电流？

22—9、如上题中的铁芯含有一长度 $\delta=0.2\text{cm}$ 的空气隙（与铁心柱垂直）。试问电流增大到多少才能保持上题中的 ϕ 值不变？

22—10、在题22—8中，将铁芯材料改成硅钢片问线圈中的电流多少？

第二十三章 变压器

变压器是一种静止电器，其工作原理基于电磁感应定律。

变压器的种类很多，如用于输配电的电力变压器、调压用的调压变压器和测量用的仪用互感器等等。它们的结构和特性虽有差别，工作原理基本相同。

油浸电力变压器的外形见图23—1。

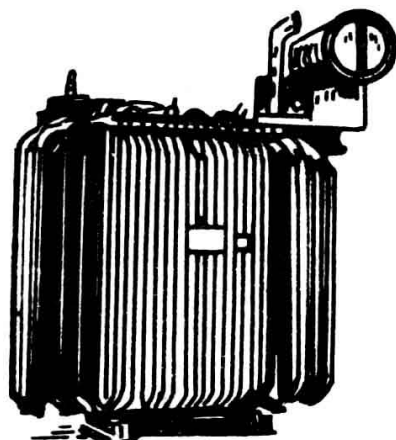


图23—1

第一节 变压器的结构

变压器一般均由构成磁路的铁芯和构成电路的原副绕组、绝缘结构和其它一些零部件等组成，现分述如下：

一、铁芯

变压器的铁芯是构成变压器磁路的部件，为了减少交变磁通在铁芯中引起的损耗，变压器的铁芯一般都是用 $0.35\sim 0.5$ 毫米硅钢片叠装而成，硅钢片表面涂有绝缘漆，作片间绝缘用。

铁芯由二部分组成。其中垂直部分为铁芯柱，绕组就套装在铁芯柱上水平部分为铁轭，其作用是使铁芯柱之间的磁路闭合。并在结构上使各芯柱联成一体。在铁芯叠装时，采用交叠式装配。如图23—2所示，相邻二层的钢片采用不同的排列方法，采用这种方式叠装能使各层的接缝错开，这样能减少激磁电流。图23—2（a）是单相铁芯的交叠装配图；（b）是三相变压器铁芯装配图。

目前，大容量变压器多采用高磁导率、低损耗的冷轧硅钢片，铁芯采用斜接缝方式。

当变压器容量很小时，铁芯柱截面，采用正方形。在一般变压器中，为了充分利用绕组内圆空间，铁芯柱截面都是内接于圆的阶梯形。

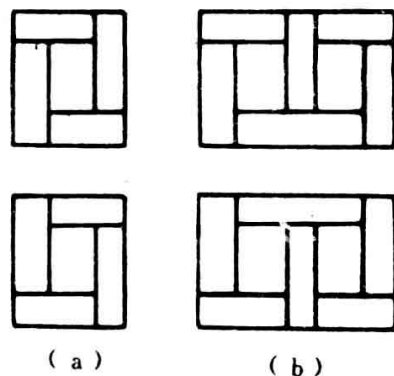


图23—2

近年来，国内还生产一种渐开线型铁芯变压器。

二、绕组

绕组套装在铁芯柱上的情况如图23—3所示。为了绝缘方便，低压绕组紧靠着铁芯，高压绕组则套装在低压绕组的外面。两个绕组间留有油道，一方面作为绝缘间隙，另一方面使油从油道中流过冷却绕组。这种绕组叫同心式绕组。国产电力

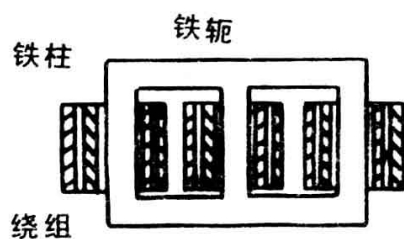


图23—3

变压器均采用这种绕组方式

绕组是变压器的电路部分，常用绝缘铜线或铝线绕制。

三、变压器身与变压器油

高、低压绕组装在铁芯上之后，铁芯与绕组总称为器身。器身放在油箱中，油箱充以变压器油。充油的目的是：（1）油的绝缘性能比空气好，因此可提高绕组的绝缘性能；（2）通过油受热后的对流作用，可以将绕组及铁芯的热量带到油箱壁，再由箱壁上的油管散发到空气中。对变压器油的要求是介质强度和着火点要高，粘度要小，水分和杂质含量尽可能少。

四、其他附件

电力变压器的其它附件有油箱、油枕、分接开关、安全通道、气体继电器和绝缘套管等。其作用在于保证变压器可靠安全的运行。

第二节 变压器的工作原理

一、单相变压器空载运行

变压器的原理是建立在电磁感应的基础上。最简单的变压器如图23—4所示。变压器中和电源相连接的绕组叫原绕组或初级绕组，而与用电设备相连接的绕组叫副级绕组或次级绕组。所有与原绕组有关的量右下角注有1的字母，如 E_1 、 U_1 、 N_1 等。所有与副绕组有关的量在右下角注有2的字母，如 E_2 、 U_2 、 N_2 等。

变压器副绕组不接负载， $i_2 = 0$ ，原绕组接电源的运行状态叫变压器的空载运行。

二、原绕组和副绕组中的电势

当原绕组接入交流电压后，原绕组中就有交流电流过，因而在铁芯中就产生一个交变的磁通 ϕ 。根据楞次定律，在原、副绕组中必然产生感应电势。如果副绕组接上负载，副绕组就向负载供给电能。由此可见，在变压器中，原绕组将电源的电能变换为磁场能量，通过磁路送到副绕组再变换为电能。

假定铁芯磁路不饱和，则磁通的波形与电源电压的波形基本上相同（相位不同），如设磁通为 $\phi = \phi_m \cos \omega t$

则感应电势为
$$e = -W \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -W \frac{d\phi}{dt}$$

可得： $e_1 = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t$ (23—1)

$e_2 = \sqrt{2} E_2 \sin \omega t$ (23—2)

讨论：（1）感应电势的有效值 $E_1 = 4.44fN_1 \phi_m$ (23—3)

$E_2 = 4.44fN_2 \phi_m$ (23—4)

E_1 、 E_2 与绕组匝数及磁通的最大值成正比。

（2）变压器的变比： $K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ 即变压器的变比等于

绕组的匝数比。我们可根据需要设计不同 N_1 、 N_2 的变压器以满足生产要求。

（3） e_1 、 e_2 滞后于 ϕ 90° 。见图23—5所示。

三、空载运行时的电流

变压器空载运行时， $i_2 = 0$ ，不向负载输送电能。这时原边绕组流过的电流 i_0 ，这个电

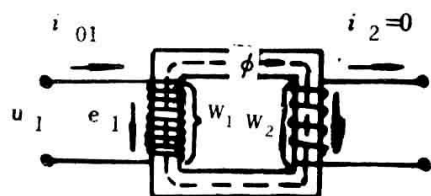


图23—4

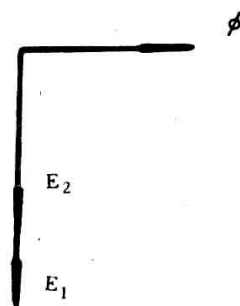


图23—5

流叫空载电流。也就是说变压器空载运行时电网向变压器输送有功功率以补偿铁芯中的损耗。

可近似地认为空载电流等于励磁电流，其作用主要是产生磁动势 F ，以产生磁通 ϕ 。一般变压器 $I_0 = (2 \sim 1) \% \times \text{额定电流}$ 。

例23—1 有一台单相变压器接到220V的电源上，测得副绕组开路电压为30V。已知副绕组匝数为120匝，硅钢片铁芯有效截面积为 12cm^2 ，磁路平均长度为42cm，求：（1）变压器的变比和原绕组的匝数；（2）铁芯中的磁感应强度和励磁电流的大小？

解（1）变比为 $K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{30} = 7.33$ ；原绕组匝数 $N_1 = KN_2 = 7.33 \times 120 = 880$ 匝。

（2）磁路中的磁通最大值 $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\phi_m$

$$\phi_m = \frac{U_1}{4.44fN_1} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 880} = 11.3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$B_m = \frac{\phi_m}{S} = \frac{11.3 \times 10^{-4}}{12 \times 10^{-4}} = 0.942 \text{ T}$$

由硅钢片 $B = f(H)$ 曲线查得 $H_m = 250 \text{ A/m}$

$$I_{10} = \frac{H_m l_1}{N_1} = \frac{250 \times 42 \times 10^{-2}}{880} = 0.12 \text{ A}$$

四、空载运行时的电势平衡方程式

空载运行时原绕组流过电流 I_0 ，在原绕组的电阻 r_1 上产生压降 $\dot{I}_0 r_1$ ；由于原绕组是个线圈，有漏电抗 $X_{1\sigma}$ 存在，并产生漏电抗压降 $j\dot{I}_0 X_{1\sigma}$ 。故平衡方程式为：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_{01} + j\dot{I}_0 X_{\sigma 1}; \quad \dot{U}_{20} = \dot{E}_2. \quad (23-5)$$

第三节 变压器的负载运行

一、变压器负载运行

变压器负载运行时原绕组接电源电压，副绕组接负载 Z_L ，如图23—6所示。

当副绕组接上负载 Z_L 后，副绕组中就有电流 $\dot{I}_2$ 流过。这时变压器向负载输出功率。

二、负载运行时的主磁通

当副绕组流过电流 $\dot{I}_2$ ，产生磁势 $\dot{I}_2 N_2$ ，它在铁芯中产生磁通 ϕ_2 ， ϕ_2 的方向与原绕组中 $\dot{I}_0 N_1$ 产生的磁通 ϕ_m 的方向相反，企图使 ϕ_m 下降。但在电源电压一定的条件下： $U_1 \approx E_1$

$= 4.44fN_1\phi_m$ 。 ϕ_m 不变，即是说引起原绕组的电流增加到 $\dot{I}_1$ ，以保持总磁势不变，即 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$ 。保持磁通从空载到负载 ϕ_m 基本上不变。

磁势平衡方程式为：

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (23-6)$$

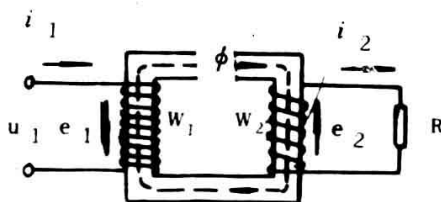


图23—6

由于 I_0 很小可以忽略, 则 $\dot{I}_1 N_1 = -\dot{I}_2 N_2$, 可写成

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \text{ 故 } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1}.$$

例23—2 在3300伏的交流电路中接入降压变压器, 把电压降到220伏, 如已知原绕组的匝数为2100匝, 副绕组接入10 Ω 的电阻, 求副绕组的匝数和原、副绕组的电流?

解 根据公式 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$

所以
$$N_2 = \frac{N_1 U_2}{U_1} = \frac{2100 \times 220}{3300} = 140 \text{匝}$$

根据欧姆定律, 副绕组中的电流为:

$$I_2 = \frac{U_2}{R} = \frac{220}{10} = 22 \text{A}$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{140}{2100} \times 22 = 1.47 \text{A}$$

二、电流变换

由式 $I_1/I_2 = N_2/N_1$ 可以看出变压器不仅可以变换电压, 同时还可变换电流。

当副绕组负载发生变化时, 由于 $I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2$, 所以原绕组中的电流也跟着变化。

三、阻抗变换

由于有: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = K$ 的关系, 所以变压器的负载阻抗为:

$$Z_L = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_1/K}{KI_1} = \frac{1}{K^2} \times \frac{U_1}{I_1} \quad (23-7)$$

对于电源来说其等效阻抗: $Z_0 = \frac{V_1}{I_1} = K^2 Z_L$ 。上式说明, 当变压器的实际阻抗为 Z_L 时, 通过变比为 K 的变压器变换后, 对于电源来说其等效阻抗为 $K^2 Z_L$ 。

第四节 变压器的运行特性

一、变压器的效率

由变压器的工作原理可知, 其原绕组从电网吸收电功率, 通过磁通耦合送到副绕组输出。在能量传送过程中, 将产生损耗。变压器的损耗主要是二部分: 一部分是铜耗, 是由于原副绕组有电阻存在, 这部分损耗与电流的平方成正比, 所以与负载有关; 另一部分是铁芯损耗, 即交变磁通在铁芯中所引起的磁滞和涡流损耗。变压器输出的有功功率 P_2 与输入的有功功率 P_1 之比为变压器的效率, 其计算公式为:

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{cos}} + P_{\text{Fe}}} \times 100/100$$

由于变压器的损耗很小, 故一般电力变压器的额定效率 $\eta_N = 0.95 \sim 0.99$ 。

二、短路电压的百分值

现在做一个变压器短路实验: 把变压器副绕组短路, 在原绕组上加一个较小的电压, 并使副绕组的电流达到额定电流的数值, 这时原绕组所加的电压 V_K 叫做短路电压。短路电压一般为: 额定电压 U_{N1} 的5~10%, 而