

电机与控制

赵 桐
巢培德 编
穆润生

西南交通大学出版社

电机与控制

赵桐 巢培德 穆润生 编

*

西南交通大学出版社出版

(四川 峨眉)

西南交通大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 8.25

1987年1月第一版 1987年1月第一次印刷

字数: 211千字 印数: 1—7000册

统一书号: 15478·9 定价: 1.47元

前 言

《电机与控制》一书，是根据 1985 年 6 月在北京召开的铁道部高等工科院校电技术基础协会教材会议通过的“关于加强电技术基础课教材建设的决定”编写的。

本书作为大学本科非电专业的教材，也可作为机电类专业的专科学生和从事机电工作的工程技术人员的参考书。本书内容重点突出，系统性强，语句精练，文字通顺，着重于理论联系实际。在阐述磁路的基本理论和基本知识后，重点介绍变压器、交流电机、直流电机的构造、工作原理、技术性能和使用。较详细地叙述三相交流异步电动机常用的继电接触控制系统的线路和电器。还论述了闭环控制系统概念，并例举直流电动机自动调速系统，这部分是考虑控制系统内容的连续性和系统性而加入的，但学习时必须具备模拟电路知识。同步电机与控制电机及部分章节根据专业需要选学。每章都有数量充足的习题，书末还有常用电机、电器的附表，使读者牢固掌握所学知识，并增强运用这些知识解决问题的能力。

本书第一、二、三章由大连铁道学院赵桐编写，第四章由西南交通大学穆润生编写，第五、六、七章由大连铁道学院巢培德编写。主编为大连铁道学院赵桐副教授。

本书主审为长沙铁道学院霍照昇、张大可，还有石家庄铁道学院俞鹤鸣参加了审阅。在初审和复审中，他们提出许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

在上海、长沙、大连、兰州、石家庄铁道学院、华东交大、西南交大和北方交大的有关教师参加的 1986 年 4 月召开的上海教材审稿会议上，对本书提出了许多宝贵意见，在此表示谢意。

因为时间仓促，编写经验不足，书中难免存在缺点和错误，希望读者提出批评和意见，以便作进一步修改。

编 者
1986 年 6 月

目 录

第一章 磁 路

第一节	磁路计算中应用的物理量和定律	1
第二节	磁性材料的磁化和磁化曲线	3
第三节	磁路的计算	4
第四节	交流磁路	6
第一章习题		8

第二章 变 压 器

第一节	变压器的结构	10
一、	变压器的铁心	10
二、	变压器的绕组	11
三、	其 它	11
第二节	变压器的工作原理	12
一、	变压器的空载运行	12
二、	变压器的负载运行	13
三、	变压器的阻抗变换作用	15
四、	变压器的外特性和电压调整率	15
五、	变压器的效率 (η)	16
第三节	三相变压器	16
第四节	变压器的铭牌和额定值	17
一、	型 号	18
二、	额定电压	18
三、	额定电流	18
四、	额定容量	18
五、	阻抗电压	18
第六节	特殊变压器	20
一、	仪用互感器	20
二、	自耦变压器	22
第二章习题		23

第三章 异步电动机

第一节	异步电动机的结构	24
一、	定 子	24

二、转 子.....	25
第二节 异步电动机的工作原理.....	26
一、旋转磁场.....	26
二、异步电动机的转动原理.....	31
三、异步电动机的转速与转差率.....	32
四、异步电动机的电磁转矩.....	33
第三节 异步电动机的机械特性.....	35
一、额定转矩 (M_N)	36
二、最大电磁转矩 (M_{max})	36
三、起动转矩 (M_Q).....	36
第四节 异步电动机的起动.....	38
一、直接起动.....	39
二、降压起动.....	39
三、绕线式异步电动机的起动.....	41
第五节 异步电动机的调速.....	41
一、改变磁极对数 p 调速.....	42
二、改变转差率调速.....	42
三、变频调速.....	43
第六节 异步电动机的制动.....	43
一、能耗制动.....	43
二、反接制动.....	44
三、再生制动 (发电反馈制动)	44
第七节 异步电动机的铭牌数据.....	44
一、型号及应用.....	44
二、电动机的铭牌.....	46
三、异步电动机的技术数据.....	47
第八节 单相异步电动机.....	50
一、电容分相式异步电动机.....	50
二、罩极式单相异步电动机.....	52
第九节 异步电动机的使用、维护和故障检查.....	53
一、接 线.....	53
二、电机绝缘检查.....	53
三、起动电动机的注意事项.....	54
四、异步电动机运行中注意事项.....	54
五、故障检查及处理方法.....	54
第十节 异步电动机的选择.....	55
一、电动机的类型选择.....	55
二、电动机的电压选择.....	55

三、 电动机的转速选择.....	55
四、 电动机的容量选择.....	55
第三章习题.....	57

第四章 直流电机

第一节 直流电机的构造和分类.....	59
一、 定子部分.....	59
二、 转子部分.....	61
三、 直流电机分类.....	61
第二节 直流电机的工作原理.....	62
一、 直流发电机.....	62
二、 直流电动机.....	63
第三节 直流电机的电动势和电磁转矩.....	63
一、 电枢绕组的感应电动势 E_a	64
二、 直流电机的电磁转矩 M	64
第四节 并励直流电动机.....	65
一、 并励直流电动机的机械特性.....	65
二、 并励直流电动机的起动与反转.....	66
三、 并励直流电动机的调速.....	67
第五节 串励直流电动机.....	69
一、 串励直流电动机的机械特性.....	69
二、 串励直流电动机的起动和反转.....	70
三、 串励直流电动机的调速.....	70
第六节 直流发电机.....	71
一、 并励直流发电机.....	71
二、 复励直流发电机.....	72
第四章习题.....	73

第五章 同步电机及控制电机

第一节 同步电机简介.....	74
一、 同步电机的基本构造.....	74
二、 同步发电机的工作原理.....	75
三、 同步发电机的励磁.....	78
四、 同步电动机的工作原理.....	79
五、 励磁电流对同步电动机运行情况的影响.....	82
第二节 控制电机.....	83
一、 伺服电动机.....	83
二、 测速发电机.....	85

三、 步进电动机.....	88
第五章习题.....	90

第六章 继电接触控制系统

第一节 常用电器与控制线路.....	92
一、 低压开关和熔断器.....	92
二、 接触器、中间继电器和控制按钮.....	95
第二节 鼠笼式异步电动机的起动和正反转控制线路.....	98
一、 鼠笼式电动机的点动控制线路.....	98
二、 鼠笼式电动机的长动（连续）控制线路.....	99
三、 电动机的保护.....	101
四、 鼠笼式电动机的起停控制线路.....	104
五、 鼠笼式电动机正反转的控制线路.....	105
第三节 行程开关与行程控制.....	107
一、 限位控制.....	108
二、 机械部件前进与后退的控制.....	108
第四节 时间继电器与时间控制.....	109
一、 鼠笼式电动机 Y— Δ 起动的控制线路.....	110
二、 鼠笼式电动机能耗制动的控制线路.....	111
第五节 速度继电器与速度控制.....	111
第六节 继电接触控制系统举例.....	113
一、 主电路.....	113
二、 控制电路.....	113
第六章习题.....	114

第七章 闭环控制系统

第一节 自动控制系统概述.....	118
一、 给定元件.....	118
二、 反馈元件.....	119
三、 比较元件.....	119
四、 放大元件.....	119
五、 执行元件.....	119
六、 控制对象.....	119
第二节 晶闸管直流调速系统.....	119
一、 反馈方式.....	119
二、 调速系统实例.....	122
第七章习题.....	123

第一章 磁 路

第一节 磁路计算中应用的物理量和定律

在变压器、电机和各种电器中，用铁磁性材料做成一定形状的铁心，构成主磁路，其上绕好导电线圈，便构成了铁心线圈。当线圈中通以励磁电流时，在磁路中便具有磁势作用并产生磁通。常用电气设备的磁通分布，如图 1—1 所示。主磁通在磁路内闭合。大部分电气设备的铁心都是较规则的，磁通分布是对称的，铁心各截面上各点的磁感应强度方向都与该截面垂直，磁力线形状与铁心形状基本相似。

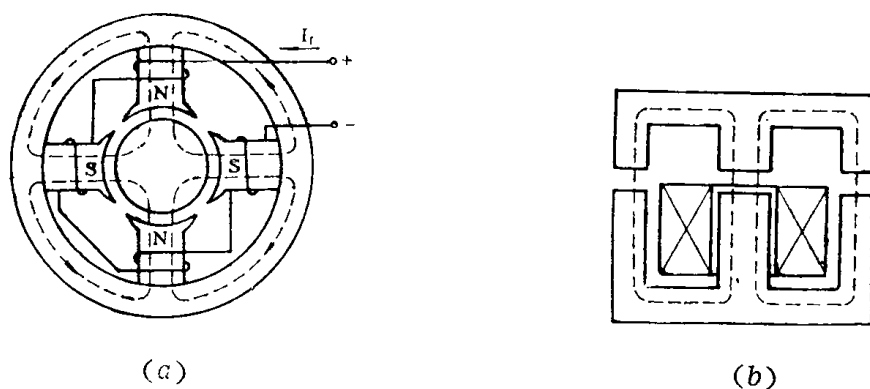


图 1—1 磁 路

设磁路的截面为 S ，该截面上的磁感应强度为 B ，则通过该截面 S 的磁通为

$$\Phi = BS \quad (1-1)$$

磁感应强度 B 为

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-2)$$

磁通的单位为伏秒，即韦伯 (Wb)，或麦克斯韦，简称麦 (Mx)，两者的关系为

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

磁感应强度 B 的单位为特斯拉 (T)，简称特，

$$[B] = \frac{[\Phi]}{[S]} = \frac{\text{韦}}{\text{米}^2} = \text{特}$$

或高斯 (Gs)，两者的关系为

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

磁势等于励磁电流 I 与励磁线圈匝数 N 的乘积，即

$$F = IN \quad (1-3)$$

磁势的单位为安匝或安。

总磁通 Φ_0 包括以下两部分：一、主磁通 Φ ——通过铁心回路闭合的磁通，它占总磁通的绝大部分；二、漏磁通 Φ_s ——通过周围空气闭合的磁通，它仅占总磁通的很小部分，则

$$\Phi_0 = \Phi + \Phi_s$$

常用导磁系数 μ 衡量各种材料导磁性能好坏。如图 1—2 所示磁路，线圈匝数为 N ，磁路截面为 S ，磁路长度取磁路中心线长度 L ，磁路材料的导磁系数 μ ，通入直流电流 I 后，有下列关系

$$\Phi = \mu \frac{NI}{L} S = \frac{NI}{\frac{L}{\mu S}} = \frac{F}{R_m} \quad (1-4)$$

式中 R_m 称为磁路的磁阻。式 (1—4) 与电路中欧姆定律相似，故称为磁路欧姆定律。但磁性材料的导磁系数 μ 与磁感应强度 B 之间关系不是线性的，所以磁阻 R_m 与磁感应强度 B 关系也不是线性。在磁路计算中，式 (1—4) 不便于直接应用，因而我们必须引用磁场强度 H 。

磁感应强度 B 和磁场强度 H 两量可写成下式

$$\begin{aligned} B &= \frac{\Phi}{S} = \mu \frac{NI}{L} \\ H &= \frac{B}{\mu} = \frac{NI}{L} \end{aligned} \quad (1-5)$$

磁场强度的单位为安/米 (A/m)。

将式 (1—5) 写成磁势 F 与磁压 HL 的关系式

$$F = NI = HL \quad (1-6)$$

磁路可根据材料及截面的不同，分成很多段，按全电流定律，可写成

$$NI = H_1 L_1 + H_2 L_2 + \dots + H_n L_n = \sum (HL) \quad (1-7)$$

即磁路中，磁势等于各段上磁压之和。

导磁系数 μ 的单位为

$$[\mu] = \frac{[B]}{[H]} = \frac{\text{韦/米}^2}{\text{安/米}} = \frac{\text{伏秒}}{\text{安米}} = \frac{\text{欧秒}}{\text{米}} = \frac{\text{亨}}{\text{米}}$$

真空中的导磁系数 μ_0 为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ 亨/米}$$

是个常数。任何一种物质的导磁系数 μ 与真空中导磁系数 μ_0 之比，叫做该物质的相对导磁系数 μ_r ，即 $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ 。它是个纯数。对非磁性材料来说， $\mu \approx \mu_0$ ， $\mu_r \approx 1$ 。而磁性材料，则 $\mu_r > 1$ 。

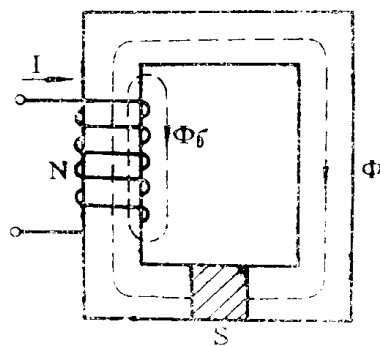


图 1—2 磁路

第二节 磁性材料的磁化和磁化曲线

在磁场影响下，能显著增强磁场的材料，叫磁场材料，如铁、钴、镍合金等。另一类是在磁场作用下，磁场变化不明显的叫非磁性材料。在电气设备中，铁心都是用磁性材料如硅钢片、铸铁、铸钢等制成。

磁化曲线，又称 $B-H$ 曲线，如图 1—3 所示。图中 B_0 表示非磁性材料或在空气中建立磁场时的磁化特性。 B_1 表示磁性材料的磁化特性。 B 表示合成的总磁场的磁感应强度的关系曲线。

从 $B-H$ 磁化曲线上看出，它是非线性的。各种材料都有自己的磁化曲线，常用磁性材料可从电工材料手册中查出其 $B-H$ 曲线。图 1—4 画出几种常用磁性材料的磁化曲线。

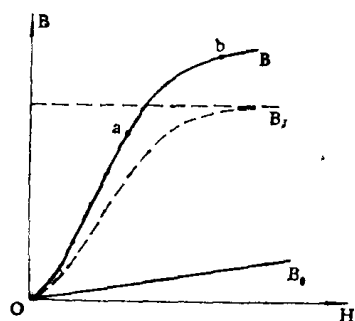


图 1—3 磁化曲线

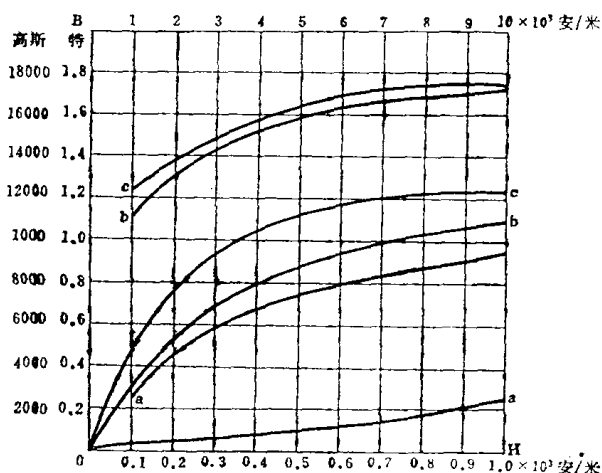


图 1—4 磁化曲线

由于 $B-H$ 磁化曲线是非线性的，所以 $\mu = \frac{B}{H}$ 导磁系数也是非线性的，可作出 μ 与 H 的关系曲线，如图 1—5 所示。当磁场强度 H 改变时，导磁系数 μ 变化很大。

磁化电流为交变电流时，设磁性材料没有被磁化过，如图 1—6 所示，当磁场强度 H 由 $0 \rightarrow +H_m$ 时，磁感应强度 B 由 $0 \rightarrow +B_m$ 。由于铁磁性材料在交流磁化过程中存在磁滞现象

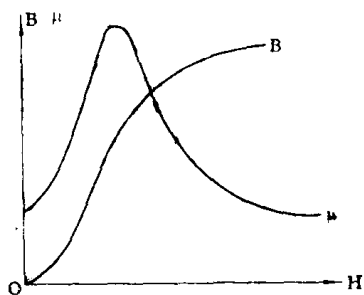


图 1—5 $\mu-H$ 曲线

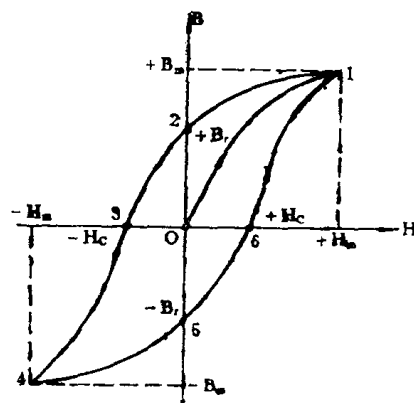


图 1—6 磁滞回线

象（即 B 的变化滞后于 H 的变化，所以当 H 再由 $+H_m \rightarrow 0$ 时， B 由 $B_m \rightarrow B_r$ ； H 由 $0 \rightarrow -H_r$ 时， B 由 $B_r \rightarrow -B_m$ ； H 由 $-H_m \rightarrow 0$ 时， B 由 $-B_m \rightarrow -B_r$ ； H 由 $0 \rightarrow +H_m$ 时， B 由 $-B_r \rightarrow +B_m$ 。这样反复磁后，得到一个闭合曲线 1234561，称为磁滞回线。

其中， B_r 为剩磁感应强度； H_c 为矫顽磁力； B_m 为饱和磁感应强度。

磁性材料交变磁化，要消耗能量，变成热量，是交流电气设备运行中发热的原因之一。

不同磁性材料，其磁滞回线形状不同，软磁性材料的磁滞回线是细长条形，这种材料的导磁系数大，矫顽力小，磁滞损失小，易磁化剩磁少，适用于制造电机、变压器及交流电磁铁。硬磁性材料的磁滞回线成阔叶形状，它的剩磁多，矫顽力大，适于做永久磁铁，常在扬声器及小型直流电机和仪表中应用。

常用的软磁性材料有铸铁、硅钢、坡莫合金及铁氧体等。硬磁性材料有碳钢、钴钢及铁镍铝钴合金等。常用磁性材料的 μ_m 、 B_r 及 H_c 值如下表：

常 用 磁 性 材 料 表 1—1

材 料 名 称 / 类 别	μ_{max}	B_r (特)	H_c (安/米)
铸 铁	200	0.475~0.500	880~1040
硅 钢 片	8000~10000	0.800~1.200	32~64
坡莫合金(78.5%Ni)	20000~2000000	1.100~1.400	4~24
碳钢(0.45%C)		0.800~1.100	2400~3200
钴 钢		0.75~0.950	7200~20000
铁镍铝钛合金		1.100~1.350	40000~52000

第三节 磁 路 的 计 算

磁路主要是由铁磁性材料和气隙构成。由于材料的 $B-H$ 磁化曲线是非线性的，给磁路计算及设计带来很大困难和繁琐。所以磁路计算通常是解决当已知磁通 Φ 或磁感应强度 B 、磁路几何尺寸及磁性材料的 $B-H$ 曲线时，去求磁场强度 H 磁势 F 或励磁电流 I 及励磁线圈的匝数 N 。

磁路计算步骤举例：

根据组成磁路的材料、几何尺寸，将磁路分段。如图 1—7 中有三种材料组成磁路。将导磁系数 μ_0 、 μ_1 、 μ_2 标明在磁路上，同一材料同一截面的画成一段。再将磁路中心线长度标明在磁路上。

根据已知的磁通 Φ ，求出各段的磁感应强度 B_0 、 B_1 、 B_2 ；查各材料的 $B-H$ 磁化曲线，由 B_1 查出 H_1 ，由 B_2 查出 H_2 。空气隙的磁场强度 H_0 ，根据式

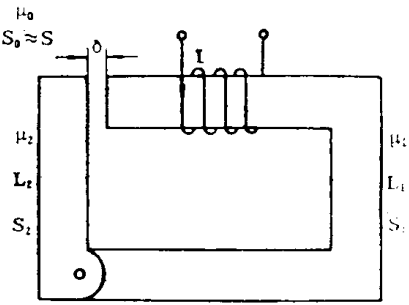


图 1—7 磁路的计算图

$$H_0 = \frac{B_0}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ 安/米} = 80B_0 \text{ 安/米} \quad (1-8)$$

计算出。然后再计算出各段的磁压，根据全电流定律求出磁势

$$NI = H_1 L_1 + H_2 L_2 + H_0 \delta \quad (1-9)$$

例 1-1 一闭合均匀铁心磁路，线圈匝数 $N = 300$ 匝，磁路平均长度为 0.45 米要求在铁心中产生 0.9 特的磁感应强度 B 。试求：① 当磁路用铸铁材料时，线圈中励磁电流 I ；② 当用硅钢片时，线圈中励磁电流。

解：从 $B-H$ 磁化曲线上查出磁场强度：

$H_{\text{铸}} = 900$ 安/米， $H_{\text{硅}} = 260$ 安/米。励磁电流为

$$I_{\text{铸}} = \frac{H_{\text{铸}} L}{N} = \frac{900 \times 0.45}{300} = 13.5 \text{ 安}$$

$$I_{\text{硅}} = \frac{H_{\text{硅}} L}{N} = \frac{260 \times 0.45}{300} = 0.39 \text{ 安}$$

从计算结果中看出，在不同材料的磁路中要得到同样大小的磁感应强度，所需的励磁电流大小不同，而且相差很大。用高导磁材料做铁心时，绕制励磁线圈的用铜量可大为减少。如果本题中两种情况通以同样大小的励磁电流即 $I = 0.39$ 安，而要求铁心中磁场强度相同，都为 $H = 260$ 安/米，则从磁化曲线 $B-H$ 上查出： $B_{\text{铸}} = 0.05$ 特， $B_{\text{硅}} = 0.9$ 特。结果，两者相差 18 倍。如果要得相同的磁通 Φ ，那么用铸铁制成的铁心截面必须增加 18 倍。可见采用高导磁材料做铁心，材料用量可大为下降，设备体积也相应减小。

例 1-2 如图 1-8 所示磁路。磁路由铸钢和空气隙组成。已知 $N = 700$ 匝， $L = 60$ 厘米，气隙 $\delta = 0.1$ 厘米，截面 $S = 1.5 \times 1.5$ 厘米²，试计算要产生磁通 $\Phi = 2.5 \times 10^{-4}$ 韦伯时，所需的磁势 F 为多少？

解：气隙截面积 S 为

$$S = (1.5 \times 1.5) \times 10^{-4} = 2.25 \times 10^{-4} \text{ 米}^2$$

$$B_0 = \frac{\Phi}{S} = \frac{2.5 \times 10^{-4}}{2.25 \times 10^{-4}} = 1.11 \text{ 特}$$

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1.11}{4\pi \times 10^{-7}} = 8.83 \times 10^5 \text{ 安/米}$$

$$H_0 \delta = (8.83 \times 10^5) \times (1 \times 10^{-3}) = 8.83 \times 10^2 \text{ 安}$$

铸钢部分截面 S 为

$$S = 2.25 \times 10^{-4} \text{ 米}^2$$

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{2.5 \times 10^{-4}}{2.25 \times 10^{-4}} = 1.11 \text{ 特}$$

查铸钢的磁化曲线，得 $H = 1200$ 安/米，则

$$HL = 1200 \times 6 \times 10^{-1} = 720 \text{ 安}$$

$$\text{磁势为 } F = H_0 \delta + HL = 883 + 720 = 1603 \text{ 安}$$

励磁电流 I 为

$$I = \frac{F}{N} = \frac{1500}{700} = 2.15 \text{ 安}$$

从例 1—2 中看出, 空气隙对磁路影响很大, 气隙长为铁心长的 $1/600$ 倍, 两者的磁压大小差不多, 这说明空气隙的磁阻很大, 要产生同样的磁通, 所需的磁化力很大。

目前我国已规定以国际单位制为法定计量单位, 但在磁路计算中仍常用电磁单位制, 现列下表, 以便换算。

表 1—2

物 理 量	国际单位制(SI)	CGS 单位制
磁 通 Φ	韦 伯 Wb	麦克斯韦 Mx
磁 通 密 度 B 磁感应强度	特 斯 拉 T	高 斯 Gs
磁 势 F	安 培 A	吉 尔 伯 Gi
磁 场 强 度 H	安/米 A/m	奥 斯 特 Oe

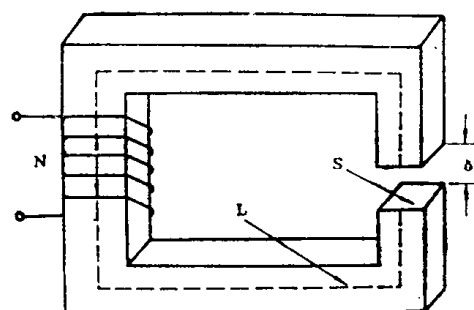


图 1—8 例 1—2 的图

表 1—3

物理量	换 算 关 系
Φ	$1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ Mx}$
B	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs}$
F	$1 \text{ A} = 0.796 \text{ Gi}$
H	$1 \text{ A/m} = 1.26 \times 10^{-2} \text{ Oe}$

第四节 交 流 磁 路

当线圈中通过的励磁电流为交流电流 $i(t)$ 时, 产生的磁通 $\phi(t)$ 也是交变的。交变的磁通在励磁电路中产生感应电动势。励磁电路中的电压平衡方程式为

$$u(t) = ri(t) + N \frac{d\phi}{dt}$$

式中 r 为线圈的电阻。电阻上的电压降大多数情况下, 比 $N \frac{d\phi}{dt}$ 小得多, 故上式可写成

$$u(t) = N \frac{d\phi}{dt}$$

电源电压基本上与感应电动势相平衡。当 $u(t)$ 为正弦电压时, 设 $u(t) = U_m \cos \omega t$ 时, 则

$$\phi(t) = \int \frac{u(t)}{N} dt = \frac{U_m}{N} \int \cos \omega t dt \quad (1-10)$$

$$= \frac{U_m}{N\omega} \sin \omega t = \frac{U_m}{2\pi f N} \sin \omega t \quad (1-11)$$

上式表明,当电源电压按正弦规律变化时,磁通也按正弦规律变化,只是在相位上比电源电压滞后 90° 。磁通的最大值为

$$\Phi_m = \frac{U_m}{2\pi fN}$$

电压的最大值为

$$U_m = 2\pi fN\Phi_m$$

电压的有效值为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} fN\Phi_m = 4.44 fN\Phi_m$$

$$= 4.44 fNB_m S \quad (1-12)$$

式中, B_m 的单位为特斯拉 (T), S 的单位为米² (m²), U 的单位为伏特 (V), f 的单位为赫芝 (Hz)。式 (1-12) 为设计电机和变压器很重要的公式。

交流磁路中,由于磁通是交变的,在磁路的铁心中引起功率损耗,即铁损。它包括磁滞损失和涡流损失。

涡流损失是铁心中涡流产生的。涡流是交变磁通在铁心中与磁通垂直的铁心截面上产生感应电势所引起的旋涡状电流。涡流使铁心产生损耗并发热,其能量损耗要由电源供给。而发热给电气设备带来不利影响。

根据实验得出,涡流损耗为

$$P_{\text{涡}} = Kf^2 B_m^2 \quad (1-13)$$

为减少涡流损耗,铁心用薄硅钢片叠成,片与片之间涂上绝缘漆,增大电阻限制涡流。根据实验得出,磁滞损失为

$$P_{\text{滞}} = K' f B_m^n \quad (1-14)$$

式中, $n = 1.6$ 或 2 。

铁损常用 P_F 表示,单位是瓦 (W) 即

$$P_F = Kf^2 B_m^2 + K' f B_m^n \text{ 瓦} \quad (1-15)$$

铁心线圈交流电路消耗的有效功率为

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R + P_F \text{ 瓦} \quad (1-16)$$

式中 I 为线圈中电流的有效值, R 为线圈电阻。

具有铁心线圈的交流电路,在某些情况下,将它变为用等效参数元件组成的等效电路,可避开铁心磁化过程和非线性关系,而使计算简化。等效条件是两种电路在相同电压作用下,功率和电流及各量间的相位关系均相同,如图 1-10 所示。

把图 1-9 的铁心线圈交流电路中的线圈电阻 R 和感抗 x_r (漏磁电抗) 两参数划出,剩下的是一个没有线圈电阻和漏磁的理想铁心线圈磁电路。理想铁心线圈电路具有铁损,用等效参数 $R_0 = \frac{P_F}{I^2}$ 表示。另外铁心中还有磁场能量的存储与释放,用等效感抗 X_0 表示,即

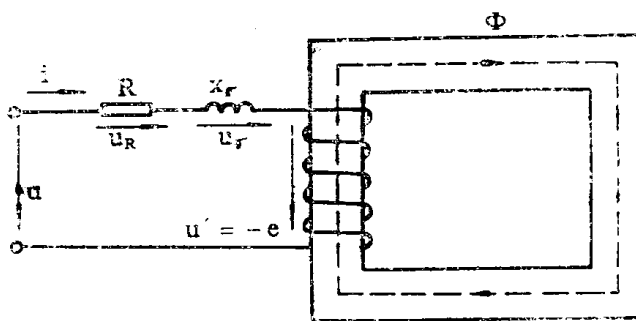


图 1-9 交流磁路

$X_0 = \frac{Q_c}{I^2}$, Q_c 为理想铁心线圈的无功功率, 且

符合 $\dot{E} = -j \dot{I} X_0$, 即把感应电势 E 看成是由电流 I 引起的电抗压降。

例 1—3 有一具有铁心线圈的交流电路, 电源电压为 380 伏, 电流为 2 安, 有功功率为 120 瓦, 频率 f 为 50 赫, 漏磁通及线圈上的电阻压降不计, 求: $\cos \varphi$ 及铁心线圈的等效电阻和感抗。

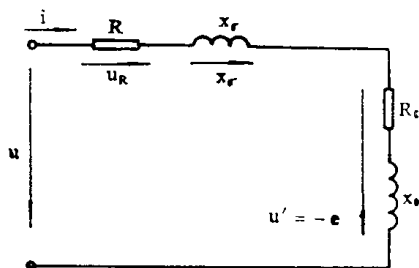


图 1—10 等效电路

解: $\cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{120}{380 \times 2} = 0.157$

等效阻抗

$$Z_0 = \frac{U}{I} = \frac{380}{2} = 190 \text{ 欧}$$

等效电阻

$$R_0 = \frac{P}{I^2} = \frac{120}{2^2} = 30 \text{ 欧}$$

等效感抗

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{190^2 - 30^2} = 187.6 \text{ 欧}$$

例 1—4 绕制一个铁心线圈, 已知电源电压为 220 伏, f 为 50 赫, 铁心截面 S 为 33.2 厘米^2 , 由硅钢片叠成, 间隙系数为 0.91。如取 $B_m = 1.2$ 特, 问线圈匝数 N 为多少? 如磁路平均长度为 60 厘米, 问励磁电流为多少?

解: 铁心有效面积

$$S = 33.2 \times 0.91 = 27.5 \text{ 厘米}^2$$

$$(1) \quad N = \frac{U}{4.44 f B_m S} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 1.2 \times 27.5 \times 10^{-4}} = 300 \text{ 匝}$$

(2) 从磁化曲线查出 $B_m = 1.2$ 特时, $H_m = 700$ 安/米

得
$$I = \frac{H_m L}{\sqrt{2} N} = \frac{700 \times 60 \times 10^{-2}}{\sqrt{2} \times 300} = 1 \text{ 安}$$

第一章 习 题

1—1 如果线圈铁心由彼此绝缘的硅钢片沿垂直磁场方向叠成, 是否可以? 为什么?

1—2 在电压相同的情况下, 如果把一个直流铁心线圈接到交流电源上或把一个交流铁心线圈接到直流电源上, 会发生什么后果?

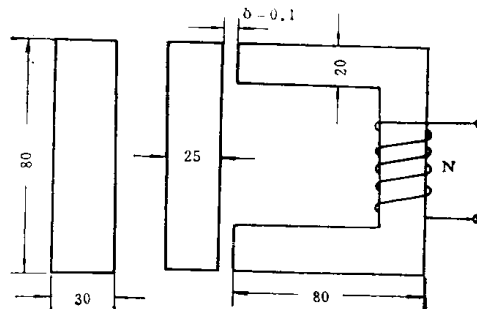
1—3 有一线圈, 其匝数 $N = 1000$, 绕在铸钢制成的闭合铁心上, 铁心截面 $S = 20 \text{ 厘米}^2$, 磁路平均长度 $L = 50 \text{ 厘米}$ 。如果要在铁心中产生磁通 ϕ 为 0.002 韦, 问线圈中通过的励磁

电流 I 为多大直流电流？如果在垂直铁心方向开一气隙， $\delta = 0.2$ 厘米，不考虑边缘扩散影响，问线圈中电流需增加多少，才能保持磁通为 0.002 韦。

1—4 有一直流电磁铁，其磁路由铁心、衔铁和气隙三部分构成，铁心材料为硅钢片，衔铁的材料为铸钢。各部分尺寸如题 1—4 图所示。今需在气隙中产生磁通为 0.06 韦，已知 $N = 2500$ 匝，试求线圈中通过的电流为多少？（长度单位为厘米）

1—5 为了求铁心线圈的铁损，先将它接在直流电源上，测得线圈的电阻为 1.75 欧；然后接到交流电源上，测得电压为 $V = 220$ 伏，功率 $P = 90$ 瓦，电流 $I = 2$ 安。试求铁损和线圈的功率因数。

1—6 将一铁心线圈接于电压 $V = 100$ 伏， $f = 50$ 赫的正弦交流电源上，其电流 $I_1 = 5$ 安， $\cos \varphi_1 = 0.7$ 。若将此线圈中铁心抽出，再接到上述电源上，则线圈中电流 $I_2 = 10$ 安， $\cos \varphi_2 = 0.05$ 。求 ① 线圈具有铁心时的铜损及铁损；② 求铁心线圈的等效电路的参数（ R 、 R_0 、 X_0 ），取 $X_0 \approx 0$ 。



题 1—4 图

第二章 变 压 器

从交流发电机到用电设备，要经过升压输电和几次降压以适应对电压高低要求不同的用户。变压器就是把交流电压升高或降低，并传送电能的电气设备。电力系统使用的变压器叫电力变压器，如图 2—1 所示。电力变压器是电力系统非常重要的电气设备。因为在输送一定电功率时，当输电的电压愈高，则输电线上的电流愈小，线路的损失也愈小。同时导电金属材料用量也减少。目前我国电力网的输送电压已达 220 千伏、330 千伏和 500 千伏，而工农业生产中及民用电的电压多为 380 伏和 220 伏。这样一来，高压和低压间的变换，均用变压器来完成。

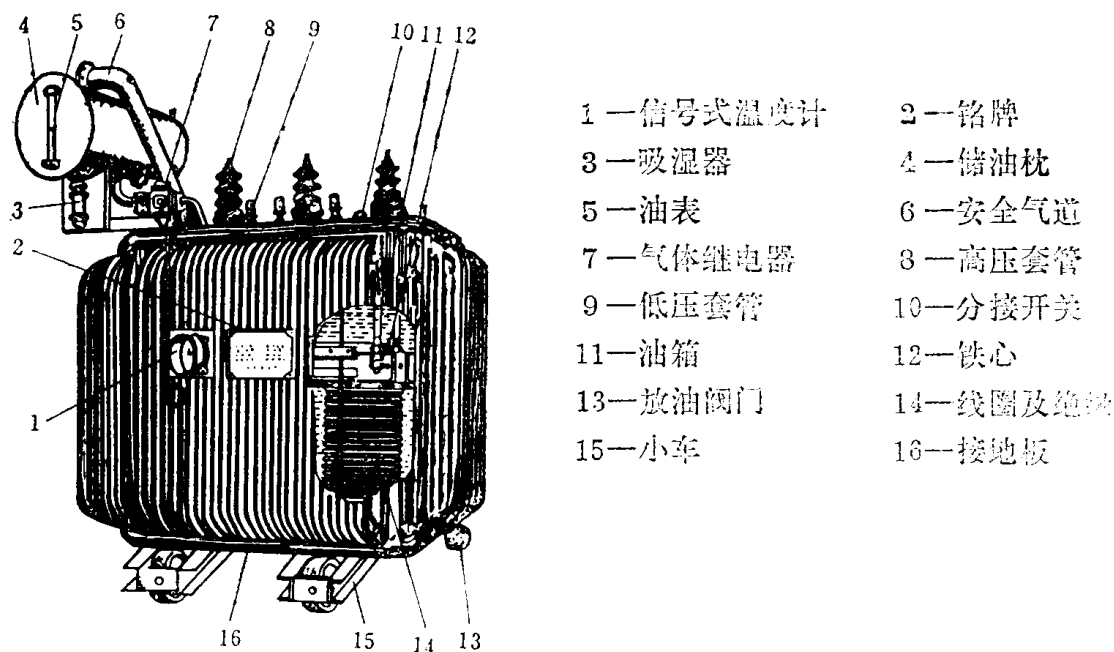


图 2—1 电力变压器

变压器除用来变换交流电压外，利用同一原理还可以变换电流和变换阻抗，故在电工测量及电子设备中广泛应用。

根据用途不同，变压器的种类很多，如电力变压器、整流变压器、电炉变压器、焊接变压器、实验用变压器、自耦变压器、线间变压器及输出、输入变压器等，种类繁多，结构各异，但其基本原理都是一样的。

第一节 变压器的结构

变压器的结构主要有铁心、高低压绕组、油箱和绝缘套管等组成，详见图 2—1。

一、变压器的铁心

变压器的铁心是用硅钢冲片叠成。硅钢片的厚度为 0.35~0.5 毫米，表面涂有绝缘漆。