

微 电 机 原 理

上 册

王宗培 等 编著

科 学 出 版 社

1 9 8 3

内 容 简 介

本书是作者在哈尔滨工业大学电机系讲授《微电机原理》讲义的基础上编写而成的。全书分上、中、下三册出版。上册讲述微电机的若干理论基础；中册讲述异步电机及同步电机；下册讲述直流电机和步进电动机等。

上册内容主要包括：电磁耦合电路；机电能量转换及电磁转矩；交流电机的绕组、磁势和电势，以及这些量的空间向量表示法与运算。同时包括变压器及旋转变压器的运行分析。

本书可作为高等工科院校微电机专业高年级学生和研究生阅读，也可供从事微电机设计、制造和运行的技术人员参考。

微 电 机 原 理

上 册

王宗培 等 编著

责任编辑 范铁夫

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 8 月 第 一 版 开本：787×1092 1/32

1983 年 8 月 第一次印刷 印张：5 7/8

印数：0001—11,200 字数：129,000

统一书号：15031·517

本社书号：3182·15—5

定 价： 0.92 元

目 录

第一章 磁路、电磁耦合电路与变压器	1
§ 1-1 磁路	1
§ 1-2 交流磁路	4
§ 1-3 磁性材料的性能	7
§ 1-4 电磁耦合电路——变压器	11
§ 1-5 变压器的空载运行	14
§ 1-6 变压器的负载运行	19
§ 1-7 变压器的T形等值电路及相量图	21
§ 1-8 变压器的线性分析	25
§ 1-9 归算法及等值电路	29
§ 1-10 变压器分析的工程考虑	37
第二章 交流电机的绕组、磁势和电势	50
§ 2-1 旋转电机的极和主磁路	50
§ 2-2 绕组的构成	52
§ 2-3 电机磁场的简化	53
§ 2-4 全距线圈产生的磁势波	54
§ 2-5 分布的全距线圈组产生的磁势波	57
§ 2-6 单层绕组的连接	61
§ 2-7 双层绕组及其磁势波	63
§ 2-8 理想绕组	65
§ 2-9 正弦绕组	67
§ 2-10 磁势波和主磁场	71
§ 2-11 磁场波的空间相量表示	75
§ 2-12 多相绕组产生的磁势波	77
§ 2-13 绕组的磁链	82

§ 2-14	绕组的感应电压	87
§ 2-15	空间相量及合成相量	90
§ 2-16	电机绕组的主电感	92
§ 2-17	绕组间的互感	94
第三章	旋转变压器	96
§ 3-1	四绕组旋转变压器的基本方程式	98
§ 3-2	无补偿正余弦旋转变压器	101
§ 3-3	正余弦旋转变压器副方补偿的原理	108
§ 3-4	正余弦旋转变压器原方补偿的原理	112
§ 3-5	正余弦旋转变压器的一般表达式	115
§ 3-6	线性旋转变压器	121
§ 3-7	旋转变压器的运行方式	130
§ 3-8	正余弦旋转变压器的误差和精度	138
§ 3-9	其他类型的旋转变压器	144
第四章	机电能量转换原理及电磁转矩	149
§ 4-1	能量平衡	150
§ 4-2	净电能输入	152
§ 4-3	磁储能	154
§ 4-4	机械能和转矩	157
§ 4-5	状态函数、自变量、共轭能	158
§ 4-6	旋转电机的磁阻转矩	162
§ 4-7	多个电路系统	166
§ 4-8	旋转电机的互转矩	170

目 录

第五章 多相异步电动机.....	179
§5-1 异步电动机转子开路	181
§5-2 作用原理和运行状态	186
§5-3 异步电动机的空载和负载运行	191
§5-4 异步电动机的等值电路和相量图	201
§5-5 异步电动机的转矩和功率方程式	210
§5-6 异步电动机的运行特性	216
第六章 异步电动机的线性分析.....	236
§6-1 二相电机的基本方程式	236
§6-2 二相电机的坐标变换(双轴法)	239
§6-3 二相电机的复数坐标系	246
§6-4 用新变量表示的转矩公式	250
§6-5 二相异步电动机对称稳态运行	252
§6-6 二相电动机加负序电压	255
§6-7 定子单相的异步电动机	258
§6-8 单相异步电动机的起动方法及电容电动机	267
第七章 交流异步测速发电机.....	275
§7-1 输出特性方程式	277
§7-2 输出特性及原理性误差	281
§7-3 环境条件引起的误差	285
§7-4 剩余电压	287
第八章 交流伺服电动机.....	291
§8-1 伺服电动机的主要性能指标	294
§8-2 交流伺服电动机的分析方法	296

§8-3 双轴等值电路的讨论及应用	307
§8-4 理想交流伺服电动机	312
§8-5 实际交流伺服电动机	316
§8-6 无自转条件	320
§8-7 始动电压	324
第九章 同步电机	326
§9-1 同步电机的空载特性	329
§9-2 同步电机的电枢反应	334
§9-3 隐极同步电动机的相量图	339
§9-4 电动机和发电机运行	341
§9-5 凸极同步电动机	345
第十章 同步电机的线性分析	351
§10-1 原始方程式及其参数	352
§10-2 各绕组的磁链方程式	356
§10-3 d 、 q 、 0 变换	363
§10-4 同步稳态运行	369
§10-5 反应式同步电动机	374
第十一章 电磁减速式同步电机	380
§11-1 减速式磁阻电动机	380
§11-2 磁阻电动机的电枢磁场	384
§11-3 磁阻电动机的转矩及磁减速器	391
§11-4 感应子式同步电机	393
§11-5 感应子式电机的气隙磁场	396
§11-6 感应子式电机的同步稳态运行	401
第十二章 磁滞电动机	404
§12-1 磁滞电动机的基本结构型式	406
§12-2 磁滞电动机的基本作用原理	409
§12-3 理想磁滞电动机	411
§12-4 磁滞电动机的基本理论	418
§12-5 对转子材料的基本要求及材料的基本特性	431
第十三章 自整角机	437

§13-1 控制式自整角机	439
§13-2 力矩式自整角机	452
§13-3 差动式自整角机	467
§13-4 自整角机的静态误差和精度	470

第一章 磁路、电磁耦合电路与变压器

微电机,又称控制电机,它是以磁场为媒介来完成机电信息或能量的传送或转换的器件,它们大都用磁性材料把磁场限于一定空间,因此,研究磁场的量与电路量之间的联系是研究这类器件运行很重要的基础。使用导磁性能好的磁性材料,相对地把磁场集中起来,可使元件的体积缩小,容量加大,性能提高。但是,由于磁性材料的饱和效应,磁场的集中也是有限度的,同时还会影响器件多方面的性能。

变压器是一组电磁耦合电路,它以磁场为媒介把能量从一个电路传送到没有电路联结的另一个电路中。它不是能量转换器件,按照通常的概念,也称不上是一种微电机。但是,所有的微电机都是一些电磁耦合电路,也可以说都是一些广泛的变压器。所以,对变压器作较详细的分析,搞清它内部的物理过程,熟悉一些分析问题的方法,可以看成是掌握微电机理论的一个重要基础。

§ 1-1 磁 路

对磁场的完整描述,应是麦克斯韦方程组,再加上充满磁场的不同介质材料的性能参数及几何形状。对于本书研究的器件,它的磁场交变频率很低,线性尺寸比电磁波的波长小很多,因此,麦克斯韦方程中的位移电流可以忽略不计。在电磁场理论中,这样的场称为准稳电磁场。这样,就可以按恒定场来解磁场问题,然后再给它加上随时间的变化规律就行了。

在恒定磁场内，磁场强度 H 沿任意闭合回线 C 的线积分值，恰好等于通过以回线 C 作为边缘的曲面 S 上的全电流值。这一规律称为安培全电流定律。用数学形式表示时，

$$\oint_C \overline{H} d\vec{C} = \int_C \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (1-1)$$

式中， $\vec{J}$ 为通过面积元 $d\vec{S}$ 处的电流密度向量，积分回线 C 的正方向与面积 S 的正方向之间符合右手螺旋关系。当式 (1-1) 用于图 1-1 所示的简单情况时，左边变成场强与平均路径长度的乘积 $H_c l_c$ ，右边为电流和绕组匝数的乘积 Ni ，即

$$H_c l_c = Ni \quad (1-2)$$

磁感应强度 B 与磁场强度 H 之间的关系为

$$B = \mu H \quad (1-3)$$

式中，导磁率 μ 的值由材料的性质决定，在 MKS 制中，真空的导磁率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 韦/安匝·米，对于铁磁材料，常用相对导磁率来表示，即 $\mu = \mu_r \mu_0$ 。对于电机硅钢片来说它的典型值是 $\mu_r = 2000-6000$ ，铁镍合金则高达数万。

在图 1-1 中，取任何与绕组相链的闭合路径，不论在铁心内闭合，还是经过周围空气中，式 (1-1) 都同样成立。可见， H 的值不一定在铁心内就大一些，事实上与铁心或是空气无关。由 H 产生的 B 就不同了，除了铁心内以外都很小。当分析磁路以计算主磁路的磁通和磁通密度时，铁心和铁心间的主气隙以外的磁场都可以略去不计。但是当铁心上有二个或二个以上的绕组，像电机和变压器中那样时，上述铁心和主气隙以外的磁场称为漏磁场，是十分重要的一部分，它决定了绕组之间的耦合程度。

变压器的铁心是闭合的；电机元件因为有运动部件，铁心之间必须有气隙。有气隙的磁路如图 1-2 所示。应用式 (1-1) 得

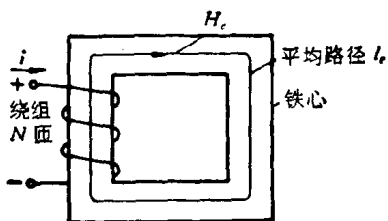


图 1-1 简单磁路

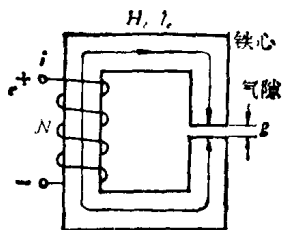


图 1-2 有气隙的简单磁路

$$Ni = H_c l_c + H_g g \quad (1-4)$$

式中: H_g 表示气隙内的磁场强度。

在整个磁回路上, 磁通 ϕ 是连续的, 截面 S 上的磁通, 定义为

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1-5)$$

式中: $\vec{B}$ 为截面积元 $d\vec{S}$ 处的磁感应强度向量。在铁心和不大的气隙内, 可以认为磁感应强度是均匀的, 则

$$\phi = B_c A_c \quad (1-6)$$

$$\phi = B_g A_g \quad (1-7)$$

式中: A_c 和 A_g 分别表示铁心和气隙的计算截面积。由式 (1-4) 得

$$Ni = \frac{B_c}{\mu_c} l_c + \frac{B_g}{\mu_g} g \quad (1-8)$$

$$Ni = \frac{l_c}{\mu_0 A_c} \phi + \frac{g}{\mu_0 A_g} \phi \quad (1-9)$$

上式左边项 Ni 用 F 表示, 称为磁动势, 或简称磁势; 右边项 ϕ 的系数用 R 表示, 称为磁阻, 或者用磁阻的倒数称为磁导 Λ 表示。定义

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c} = \frac{1}{\Lambda_c} \quad (1-10)$$

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} = \frac{1}{\Lambda_g} \quad (1-11)$$

因此,式(1-9)变为

$$F = \phi(R_c + R_g) \quad (1-12)$$

或

$$F = \phi \left(\frac{1}{\Lambda_c} + \frac{1}{\Lambda_g} \right) \quad (1-12')$$

式(1-12)称为磁路的欧姆定律,与电路的欧姆定律比较时,磁势 F 对应于电势 E ,磁通 ϕ 对应于电流 I ,磁阻 R 对应于电阻 R 。 ϕR 与电压降相对应,称为磁压降。但是,式(1-12)中,铁心的磁阻 R_c 与 B_c 有关,它们是非线性关系,使这个式子求解复杂化。式(1-12)的解答可写为

$$\phi = \frac{F}{R_g} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_c}{R_g}} = \frac{F}{R_g} \frac{1}{1 + \frac{\mu_0 A_g l_c}{\mu_c A_c l_g}} \quad (1-13)$$

在典型的电机磁路中, $\frac{R_c}{R_g} \ll 1$, 所以实际上磁路的解主要取决于气隙的磁阻,它是一个常数,与磁密无关。

§ 1-2 交流磁路

当磁场随时间变化时,在空间产生感应电场强度 ε ,按法拉第定律

$$\oint \varepsilon \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1-14)$$

式中:线积分的路径是沿着面积 S 的周界; ε 的单位是伏/米,如图1-2那样,当磁路上绕有线圈,磁路内的磁通随时间变化时,线圈内的感生电势为

$$e_T = -N \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d\psi}{dt} \quad (1-15)$$

或感生电压降

$$u_T = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\psi}{dt} \quad (1-16)$$

式中: ϕ ——磁链, 韦, 匝;

ψ ——随时间交变磁通的瞬时值, 韦。

当磁性材料的导磁率为常数, 或者磁路中气隙磁阻起主要作用时, ϕ 与产生它的电流 i 之间存在正比例关系, 可定义电感系数 L 为

$$L = \frac{\psi}{i} \quad (1-17)$$

$$L = \frac{N^2 B A}{H l} = N^2 \frac{\mu A}{l} = N^2 \Lambda = \frac{N^2}{R} \quad (1-18)$$

上式表明 L 与磁路几何尺寸之间的关系。可以看出, 它与线圈匝数平方 N^2 及磁导 Λ 成正比。其单位为亨或韦·匝/安。代入式 (1-16) 得

$$u = \frac{d}{dt} (Li) \quad (1-19)$$

对于静止的电路, L 是常数, 上式可变成熟悉的电路形式, 即

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-20)$$

在电机里, 由于有运动的部件, 电感就不一定是常数, 所以

$$u = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad (1-21)$$

假设线圈电阻为零, u 就是线圈上的总电压降, 输入的电功率 ui 应是磁场能量的增长率,

$$P = ui = i \frac{d\psi}{dt} \quad (1-22)$$

在从 t_1 到 t_2 时间内, 磁路内磁能的增加为

$$\Delta W_f = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{\psi_1}^{\psi_2} i d\psi \quad (1-23)$$

用磁场的参数表示时

$$\Delta W_f = \int_{B_1}^{B_2} \left(\frac{H l_c}{N} \right) N A_c dB = A_c l_c \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (1-24)$$

式中: $A_c l_c$ 是磁场的体积。所以很显然 $\int_{B_1}^{B_2} H dB$ 就是磁能密度的增加, 如果起始磁链 $\psi_1 = 0$, 起始时磁场能量为零, 则磁场能量的增量就是磁场的储能

$$W_f = \int_0^{\psi} i d\psi \quad (1-25)$$

或

$$W_f = A_c l_c \int_0^B H dB \quad (1-26)$$

当磁路为铁磁材料时, B_c-H_c 的关系是非线性的, 从零值上升时如图 1-3 中曲线 oa 所示。上式的积分只能用图解法求出如图中斜线部分的面积所示。由于磁滞效应和涡流的影响, B_c-H_c 的关系不是单值的。例如从 a 点下降时, B_c-H_c 的关系如图 1-3 的虚线 ab 所示, 当 H_c 下降到零时, 磁场的能量只有一部分返回到电路, 返回的能量用面积 abc 表示, 剩下的能量, 一部分变为电子回转的动能产生剩磁, 另一部分变为铁心内的磁滞及涡流损耗, 以热能的形式耗散。上升和下降过程总计由磁场吸收的能量用面积 $oabco$ 表示。由于铁心中的涡流与磁场变化的速率有关, 所以图 1-3 中下降曲线 ab 与磁场变化速率有关。如果变化速度很慢, 涡流可以忽略不计, 则上升曲线 oa 是直流起始磁化曲线, ab 是磁滞回线上的一部分。磁场以足够慢的速度周期交变时, 则 B_c-H_c 的关系沿磁滞回线变化, 如图 1-4。回线所包围的面积表示变化一周过程中铁心内能量损耗密度, 即单位体积内的磁滞损耗。

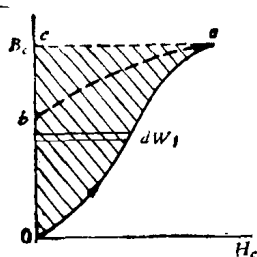


图 1-3 磁能密度的图解表示

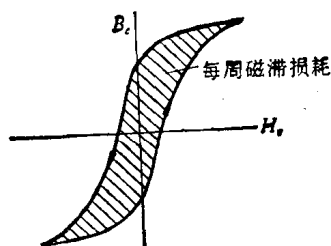


图 1-4 对称的磁滞回线

§ 1-3 磁性材料的性能

变压器和微电机中的磁路材料包括很多品种，一般可分为软磁材料和硬磁材料二种。矫顽力很小的称为软磁材料，反之则称为硬磁材料。常用的软磁材料为硅钢片，铁镍合金片，电工纯铁及低碳钢（例如 #10 钢）等。常用的硬磁材料则包括：铝镍钴合金，铁氧体和稀土钴等类永磁材料；以及铁钴钒和铁钴钼等类磁滞材料。本节主要对软磁材料的特性作简单的介绍。

软磁材料的性能不能用少量的常数来全面地说明，而是用一系列的曲线来表示。这些曲线除了与材料的成分（牌号）有关外，还与材料厚度，磁场交变的频率等有关。

材料最基本的特性是它的磁滞回线，它反映 $B-H$ 瞬时值之间的关系。磁密的最大值，即回线的顶点不同时，回线也不一样，如图 1-5 所示。回线虽然可表明材料内部的物理过程，但在工程上却用处不大，不同磁滞回线顶点的连线，称为平均磁化曲线，是经常进行磁路计算用的直流磁化曲线。交流时的磁化曲线，则随频率增高而略有下降，或者用后文讲的比磁化功率来计算。

当铁心内的磁通交变时,若绕组内的感应电压为

$$u = \sqrt{2} U \sin 2\pi f t \quad (1-27)$$

式中: U 为感应电压的有效值. 铁心内的磁密为

$$B_c = \frac{1}{N A_c} \int u dt = \frac{-\sqrt{2} U}{N A_c 2\pi f} \cos 2\pi f t \quad (1-28)$$

或写作

$$B_c = -B_{\max} \cos 2\pi f t \quad (1-29)$$

式中

$$B_{\max} = \frac{U}{4.44 f N A_c} \quad (1-30)$$

因此

$$U = 4.44 f N A_c B_{\max} \quad (1-31)$$

而磁化电流为

$$I_m = \frac{H_{\max} l_c}{k_1 N} \quad (1-32)$$

式中: k_1 为磁化电流的最大值与有效值的比值, 它与电流的

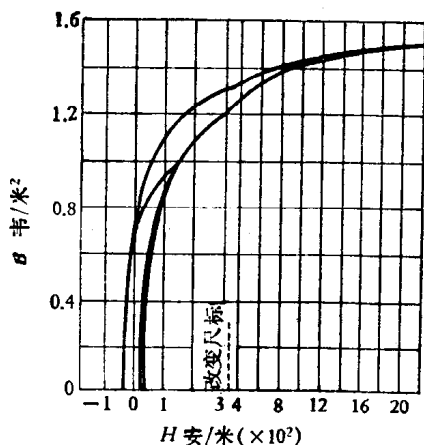


图 1-5 顶点不同的磁滞回线

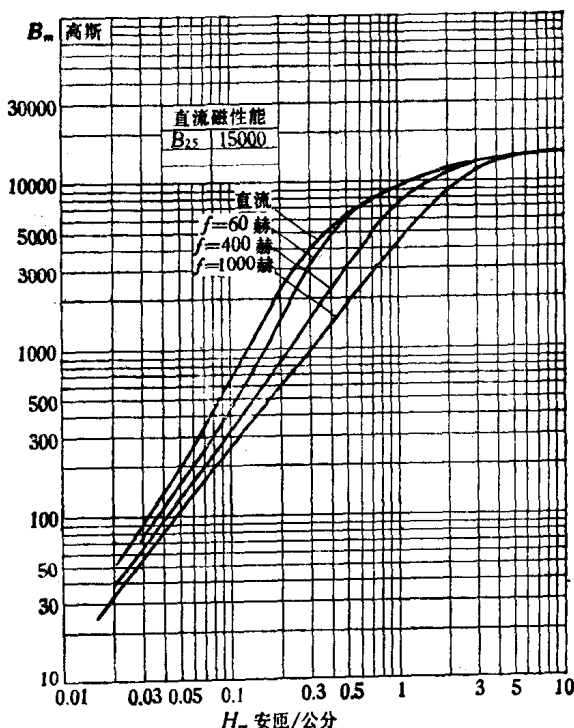


图 1-6 DG41 (0.35 毫米) 不同频率下的磁化曲线

波形有关。

电压与电流的乘积, 即磁化功率(伏安数)为

$$UI_m = \frac{4.44f}{k_1} (A_c l_c) (B_{\max} H_{\max}) \quad (1-33)$$

若材料的比重为 r_c , 则比磁化功率为

$$p_m = \frac{UI_m}{A_c l_c r_c} = \frac{4.44f}{k_1 r_c} (B_{\max} H_{\max}) \quad (1-34)$$

可见, 比磁化功率 p_m 在特定的频率下只是最大磁感应强度 $B_{\max}$ 的函数。根据给出的 $p_m - B_{\max}$ 关系曲线和对应的 $B_{\max}$ 值, 可求出 p_m 值, 再乘上铁心的重量, 就得到所需的磁化功

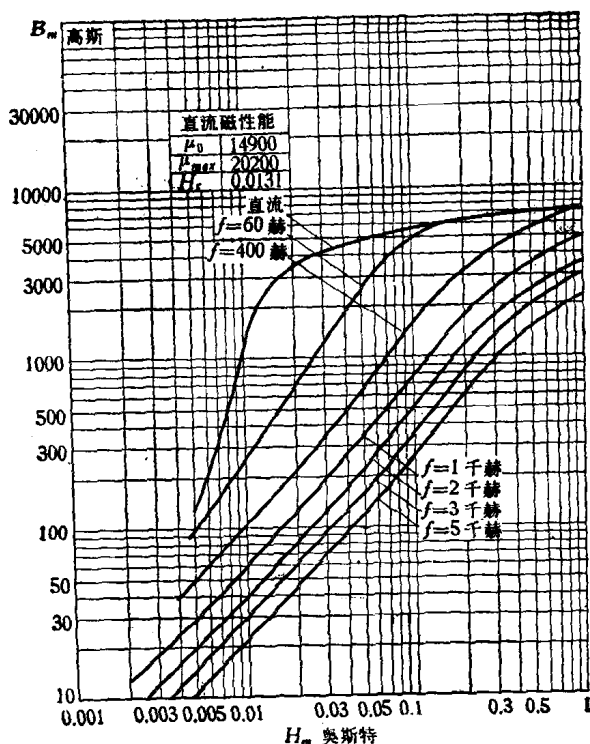


图 1-7 1J79 (0.35 毫米) 不同频率下的磁化曲线

率。还应指出一点,软磁材料的导磁性能,分为各向同性和各向异性两类。在电机中一般用各向同性的导磁材料,它们的导磁性能在不同方向上没有明显的差别。变压器中则常采用各向异性的导磁材料,例如一些冷轧的硅钢片沿轧制方向的导磁性能明显地优于垂直于轧制方向。

前面已讲过,磁场交变时,铁心内产生损耗,分为磁滞损耗和涡流损耗二部分,前者消耗于磁畴旋转,使磁畴与磁场的方向相一致;后者由于铁心内产生涡流以阻止磁通变化而产生损耗,损耗的值与材料的成分,片厚,频率和最大磁感应强