

5045

700326

1034

微电机原理

上册

王宗培 等 编著



科学出版社

700326

5045

1034

微 电 机 原 理

上 册

王宗培 等 编著

科 学 出 版 社

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

前 言

“电机”作为机电能量转换装置，已有一个半世纪的发展历史，主要包括将机械能转换成电能的发电机和将电能转换成机械能的电动机。作为动力用的发电机及电动机，大约在本世纪初，它们的结构和理论就趋于完善。广泛应用的主要是三相同步电机、三相异步电机和直流电机。

但是，在本世纪四十年代以后，随着自动控制技术、电子技术、电子计算机以及家用电器设备的发展，各种控制用的和驱动用的小容量及特种结构的电机，迅速地发展起来，这类电机通常叫做“微电机”。这些电机与动力电机相比，应用的场合不同，对性能和技术指标的要求不同，结构不一定典型，有些情况下有显著的差别，驱动和控制的方式也有差别。可见，它在原有电机的基础上，大大地扩展了。

微电机是电机在一些新领域内的扩展，包括典型结构的电机，及区别于典型结构的电机。它们的理论基础应认为是一致的。但是，“电机学”的内容不能把微电机的原理都包括进去。过去，为了满足教学和微电机行业发展的需要，出版了一些微电机方面的书籍，但大都是作为“电机学”的补充，即要求先学习电机学，再看这些微电机方面的书籍。这给从事微电机方面的技术工作者带来许多不便。因此，把典型电机的原理（电机学），与特殊用途和结构电机的原理结合在一起是必要的。

传统的电机学所研究的内容，是常用的典型结构的动力电机，其研究的方法是按照各种电机性能的不同分别单独进

行的。这些理论建立在安培定律、电磁感应定律、Bli 定律、欧姆定律和克希荷夫定律等的基础上。

这种理论的特点之一是具体分析不同电机空载和负载情况下主磁路的磁势和磁通，确定它们在各个绕组电路中的作用，再引入电路的方程式。电机是由一些绕组构成的电路系统，也用电路的定律来分析，但是按经典的分析方法处理时，看起来与一般的电路理论有相当大的区别，即与电路理论不成一个连贯的体系，给初学者带来一定的麻烦。另一方面，对各种电机的单独分析，强调了各种电机的特点，而对它们之间的共性及联系没有更深刻的阐明。

随着电机工业的发展，大量现实问题的出现，促进了电机理论的进一步发展。大约半个世纪以来，不少学者在电机的分析方法方面进行了大量的工作，并取得了进展。例如：在研究交流电机过渡过程时，应用算子法求解以坐标轴来描述的运动方程，并创立了不同的(坐标)交换方法；提出电机的统一模型和统一理论；系统动力学及动态系统的状态空间表示法等。

新的电机理论的特点是概括性强，强调了各种电机的共性，因而对电机中的基本问题了解得更深刻，对电机运行的性能理解得更透彻。

然而，新的理论主要是引入了大量的数学名词和概念作为工具，数学模型则建立在统一的理想化电机的基础上，不象经典理论那样针对性强、结合具体对象、物理概念清楚易于理解。对于较少实际工程概念的初学的大学生来讲，接受起来有明显的困难。

电机理论的统一化和对统一模型分析方法的完善化，对于非典型结构的电机来讲，并不能使得分析更精确化。随着电机应用场合的扩展，新材料的应用，新的控制方式以及新原理新结构电机的出现，促进了电机理论的另一个发展方向，即

非典型结构电机的数学模型的建立，以及各类电机数学模型的精确化。当然，这二个发展方向不是完全孤立的。应指出，磁场问题的数值解法，在数学模型精确化的研究中，是一项有力的工具。

作者从五十年代起讲授“交流电机过渡过程”及“电机学”方面的课程，近十年来要求给微电机专业开设“微电机原理”课程，感到没有一本合适的教材是最大的困难。因此总想写一本比较完整的微电机原理的书籍，希望内容具体易懂，又比较统一和深刻，适当地应用现代理论的数学工具，但又避免过于繁难的数学运算。上述愿望的具体实现，会碰到许多矛盾。建立一个什么样的体系便是首先要解决的问题，但是，在写出全书的内容以前，不容易考虑得很周密完善。加之总被各种工作所打断而找不出集中的时间来作详细的通盘考虑。因而使整个工作的速度减慢，现实的办法是分段编写，并分册出版。

本书计划分成三册出版。上册内容是微电机的若干理论基础及旋转变压器的运行分析。作为理论基础的主要有：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。中册主要讲异步电机和同步电机的原理。异步电机主要包括三相、单相异步电动机，交流伺服电动机及异步测速发电机等。同步电机主要包括各类不同结构的小容量同步电动机。下册则讲述直流电机和步进电动机等。

陆永平、徐盘喜及郭庆吉同志协助编写了上册，其中旋转变压器一章的初稿是由陆永平同志编写的。

王宗培
1982年1月

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

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，

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

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

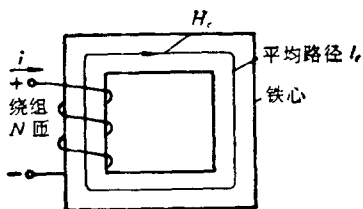


图 1-1 简单磁路

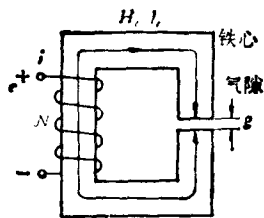


图 1-2 有气隙的简单磁路

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

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

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

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

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

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

或感生电压降

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

式中: ψ ——磁链, 韦, 匝;

φ ——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, ψ 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 $oabo$ 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.

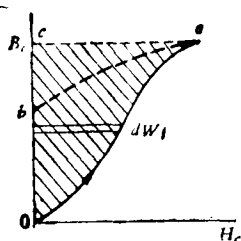


图 1-3 磁能密度的图解表示

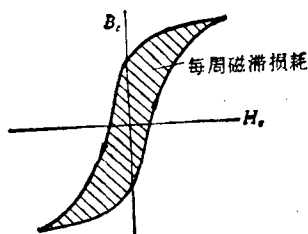


图 1-4 对称的磁滞回线

§ 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

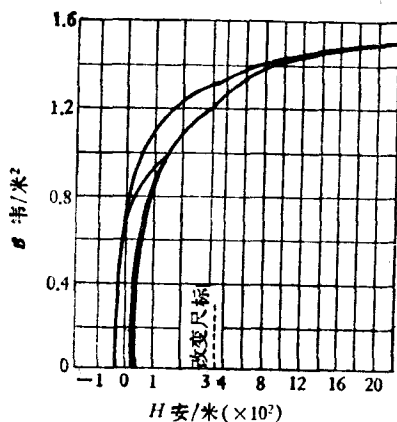


图 1-5 顶点不同的磁滞回线

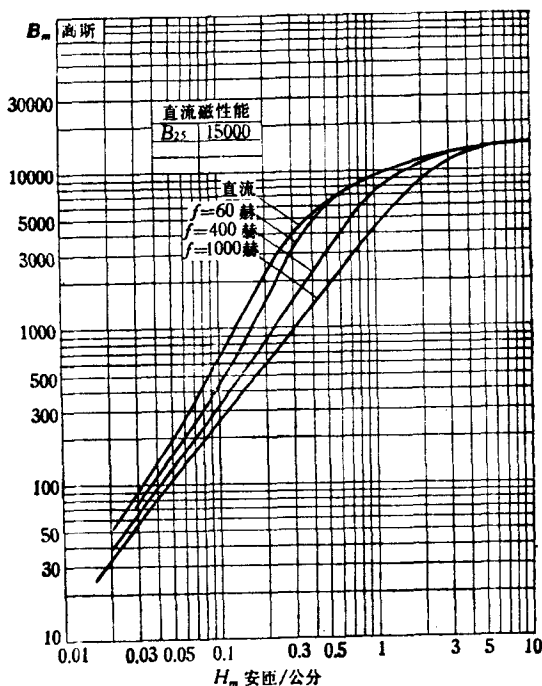


图 1-6 DG41 (0.35 毫米) 不同频率下的磁化曲线

波形有关。

电压与电流的乘积, 即磁化功率(伏安数)为

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

若材料的比重为 r_c , 则比磁化功率为

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

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