

第0章

绪论

0.1 电机总览

0.1.1 电机在国民经济生活中的作用

电能是能量的一种形式。与各种形式的能量相比,电能具有明显的优越性,适宜于大量生产、集中管理、远距离传输和自动控制。人类对能量利用和控制的能力决定着社会的生产潜能,从而又影响着人类生活方式的进步。目前,全球每年电能的用量大约为 10^4 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,并且还在以每年 10 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 的速度增长。

电机是将电能从最初的能源形式转换过来的重要桥梁,又是再将大部分电能转换为机械能的装置。电机在电力工业、工矿企业、农业、交通运输业、国防、科学文化及日常生活等方面都是十分重要的设备。在电力工业中,将机械能转换为电能的发电机以及将电网电压升高或降低的变压器,都是电力系统中的关键设备。在工矿企业中,各种机床电机、轧钢机、压缩机、起重机、水泵、风机,交通运输中的汽车电器、电力机车、磁悬浮列车、城市轨道交通,农业中的电力排灌、农产品加工,日常生活中的汽车、办公设备、电冰箱、空调、洗衣机,航海和航空领域中的舰船推进电源、航空电机,还有国防、文教、医疗等领域都需要不同特性的电机来驱动和控制。随着工业企业电气化、自动化、电脑化的发展,还需要众多的各种容量的精密控制电机,作为整个自动控制系统中的重要元件。

显然,电机在国民经济建设中起着重要的作用,随着生产的发展和科学技术水平的提高,它本身的内容也在不断地深化和更新。

0.1.2 电机的发明简史

电机的历史可追溯到 1831 年迈克尔·法拉第发明的盘式电机,这是一种真正的直流电机。此后,人们对电机的兴趣一直停留在实验室阶段和处于好奇的状态。直到 19 世纪 70 年代,托马斯·爱迪生为实现真正意义上的电功率分配,以便使电灯进入千家万户,开始了商业目的直流发电机的研制。在此项工作中,爱迪生提出将电能从集中的发电站输出,然后对用户进行分配这个全新概念。他作为领路人,倡导广泛地运用电动机,并引入电网的基本框架这一概念。

电机历史上主要的里程碑是,1888 年尼古拉·特斯拉发明了三相感应电动机并申请了专利。特斯拉的交流电的理论领先于查理斯·施泰因梅茨十来年,1900 年可靠的卷铁芯式变压器问世,从而开创了长距离输电的新纪元。当时,美国为完成电气化的进程又花

了 30 年的时间,而且直至 20 世纪 30 年代,美国的农村配电系统还没有完成。但是无论如何,在此期间美国的电气化进程进展得还是很顺利的。电机的推广应用,紧紧跟随着电网扩张的脚步。

尽管今天运用的电机学的理论可追溯到 100 年以前,但是其更新和提高的脚步从来没有停止过。更好的铁磁和绝缘材料的不断研制,使功率密度比早期电机的功率密度超出一个数量级。大容量电机的制造技术,降低了电机制造成本,因而为其更广泛的运用打开了大门。可靠的高功率等级的开关装置,以及近几十年来由于“固态革命”产生的微处理机,使电气拖动领域的控制水平大大提高。所有这一切,都是能量的利用与控制能力的提高从而不断地促进着人类生活方式的进步。

0.1.3 电机的分类

电机是一种以磁场作为中间媒介的双向能量转换装置,它们用于机械能和电能之间的转换、电能形式的变换和信号的传递、变换。而利用光电效应、压电效应、热电效应和化学反应等产生电能的装置通常不包括在电机范畴内。电机本身不是能源,但其输入、输出中至少有一方必须为电能。

电机的用途广泛,种类很多,按照电机在应用中的能量转换功能来分,电机可分为下列各类。

(1) 发电机——将机械能转换为电能;

(2) 电动机——将电能转换为机械能;

(3) 变换器——将电能转换为另一种形式的电能,如变压器、变流器、变频器、移相机;

(4) 控制电机——作为控制系统中的元件,进行信号的传递、变换,不以功率传递为主要职能。

此外,按照所应用的电流种类,电机可分为直流电机和交流电机。按运动方式来分,电机可分为静止设备和旋转设备,前者为变压器,后者包括直流电机、异步电机和同步电机。

本书基本按原理分类,主要包含变压器、直流电机、异步电机、同步电机等四大类电机。此外,对在工业控制和特殊传动领域广泛使用的特种电机也进行了专门叙述。

0.1.4 电机学课程特点和学习方法

电机学是电气工程及其自动化专业必修的重要专业基础课,是后续专业课程的理论基础。通过对电机的基本结构、电磁关系、工作原理和运行性能的分析,可使学生逐步掌握电机的基本理论和基本分析方法,提高分析和解决电机实际工程问题的能力。

电机原理始于对电路和磁场之间的相互影响,对变压器和旋转电机来说,两个或两个以上空间磁场相互之间的作用,是分析的主要内容。对物理学中电、磁、机械三类变量之间的相互关系和相互影响的理解,是学习电机学的基础。同时,电机学的研究对象是讨论实际使用的各种具体电机,不是条件单纯、非具体的理想化元件。这就要求学生要理论联系实际,善于抓住主要矛盾,重视电机学实验和实践环节。

虽然电机形式多样,但本书对电机的分析过程具有共同性。首先概览该类电机的结构、特点、应用、基本原理、参数规格等,然后是对其工作原理和电磁关系的定性分析,再通过电路方程、等效电路和相量图等形式对电机中的各物理量及相互关系进行定量分析,最后是对电机运行性能和实际应用进行总结。这就要求学生要融会贯通,重点培养分析问题和解决问题的能力。

0.2 电磁理论基础

各类电机的运行都以基本电磁定律和能量守恒定律为基础,基尔霍夫电流和基尔霍夫电压定律等电路定律在电路课程中已作详细叙述,下面简单介绍电机学中常用的基本磁路定律和判定定则。

0.2.1 电磁力定律(洛伦兹力方程)

电磁场是一个空间区域,运动电荷在其内将受到力的作用,其大小和方向由下式决定:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (0-1)$$

式中, $\mathbf{F}$ 为力,单位为N; q 为电荷电量,单位为C; $\mathbf{v}$ 为电荷运动速度,单位为m/s; $\mathbf{B}$ 为磁通密度,单位为T。

电荷在导体中流动就形成电流。如图0-1所示,如若一大小为 I 的电流,在均匀磁场中流过长度为 l 的导体,则式(0-1)中的 $q\mathbf{v}$ 可由 $l\mathbf{I}$ 替代,因而得

$$\mathbf{F} = l\mathbf{I} \times \mathbf{B} \quad (0-2)$$

由于图0-1中的 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{I}$ 垂直,则力的大小由 $F = BIl$ 决定,电磁力的方向由左手定则判定。即磁力线方向($\mathbf{B}$ 的方向)穿过左手掌心,四指方向指向电流方向,则大拇指方向即为通电导体的受力方向。

例0-1 如图0-1所示的导体,处于图中所示方向的磁场中,其大小为 $B(t) = 5\cos\omega t$ (T),导体的长度为25 cm,流过的电流 $i(t) = 2\cos\omega t$ (A),方向如图0-1中 $\mathbf{I}$ 所示,求导体上所受的作用力。

解 由于 $\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{B}$ 相互垂直,因此,由式(0-2)可知力的大小为

$$F = l \cdot i(t) \cdot B(t) \cdot \sin(\pi/2) = 0.25 \times 2\cos\omega t \times 5\cos\omega t$$

$$F = 2.5\cos\omega t\cos\omega t = 1.25 + 1.25\cos 2\omega t(\text{N})$$

力 $\mathbf{F}$ 的方向向上。

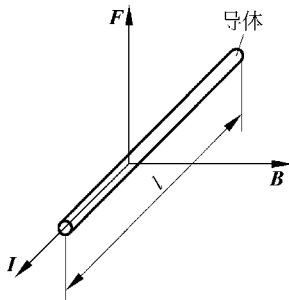


图0-1 洛伦兹力

0.2.2 毕奥-萨伐尔(Boit-Savart)定律

电荷的流动,即电流,产生磁场强度 $\mathbf{H}$ 。在距一长载流导体的垂直距离为 R (单位为m)的任意一点 P 处的 $\mathbf{H}$ (单位为A/m)的大小和方向,由下式决定:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{2\pi R} \mathbf{I} \times \mathbf{a}_R \quad (0-3)$$

式中,被一以 R 为半径的环形路径所包围的电流矢量 I (单位为 A),以及矢量 a_R 如图 0-2 所示。磁通密度 B 可根据式(0-4)由磁场强度 H 求出:

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad (0-4)$$

系数 μ (单位为 H/m),即所谓磁导率,由处于电流 I 与 P 点之间的材料特性决定,而相对磁导率 μ_r 是一无单位的量,为以下比值:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (0-5)$$

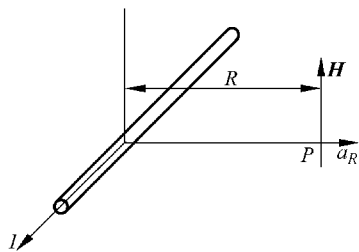


图 0-2 比奥-萨伐尔定律

式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m,为真空中的磁导率。

例 0-2 直径可忽略不计的导体长 10 m,载 5 A 的恒定电流,假定导体足够长,所处空气的磁导率为 $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。求与导体距离为 R 处的磁通密度 B 和磁场强度 H 。

解 点 P 可以半径 R 绕着导体任意转动,其每点的 H 值相同,方向为逆时针,据式(0-3),在距离为 R 处 H 值为

$$H = \frac{I}{2\pi R} = \frac{5}{2\pi R} = \frac{0.796}{R} \text{ (A/m)}$$

据式(0-4),得

$$B = \mu H = (4\pi \times 10^{-7}) \left(\frac{0.796}{R} \right) = \frac{1 \times 10^{-6}}{R} \text{ (T)}$$

0.2.3 右手定则

根据毕-萨定律,运用右手定则的方法,能很方便地判断一载流导体周围磁场的方向。如若右手握着一载流导体,且其大拇指的方向指向电流的方向,微微握紧的四指所指的方向,便为 B 或 H 的方向。

磁通 ϕ (单位为 Wb) 的大小由下式得出:

$$\phi = \int B \cdot dA \quad (0-6)$$

式中, dA 为 B 经过出面积的微分。如若 dA 所处的平面与 B 正交,则由右手定则可知磁通 ϕ 的方向。图 0-3 给出了由已知电流 I 决定的磁场方向。

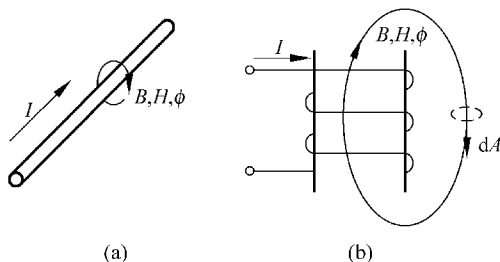


图 0-3 右手定则示意图

(a) 直导线; (b) 圆线圈

0.2.4 法拉第电磁感应定律

一匝数为 N , 与交变磁通 ϕ 匝链的线圈, 其两端的感应电动势 e 大小为

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad (0-7)$$

0.2.5 楞次定律

式(0-7)中电压极性由楞次定律判断。由交变磁通在线圈中感应电压的极性为: 若该感应电压产生一电流, 则该电流产生的磁通将阻碍原磁通的变化。图 0-4 中说明了产生电动势 e 极性的两种情况。在这两种情况中, 磁通的方向是相同的, 但前一种情况下磁通是增大的, 而后一种情况下磁通则是减小的。

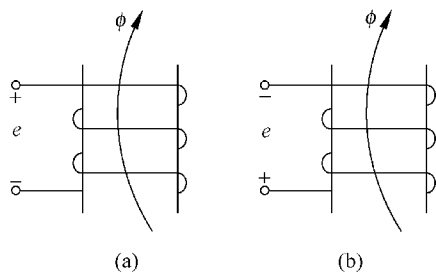


图 0-4 楞次定律示意图

(a) 磁通增大 ($d\phi/dt > 0$); (b) 磁通减小 ($d\phi/dt < 0$)

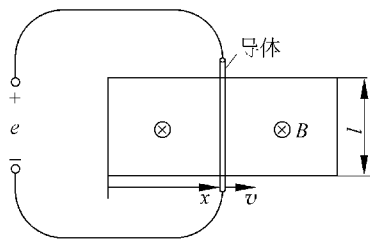


图 0-5 Blv 定则示意图

0.2.6 Blv 定则

下面分析图 0-5 中, 由长为 l 的直导体 (单位为 m) 与少许连线形成的矩形区域。此处, 一时不变的均匀磁通垂直进入纸面。此时, 该导体以速度 v (m/s) 沿着纸面向右运动切割磁力线。由式(0-6)可知, 进入纸面在由导体与其连线形成的一匝线圈两端感应电压的磁通为

$$\phi = BA = Blx \quad (0-8)$$

根据式(0-7), 由于 $N=1$, 因此有

$$e = \frac{d\phi}{dt} = \frac{dBlx}{dt} = Bl \frac{dx}{dt} = Blv \quad (0-9)$$

由于磁通密度 B 不变, 因而 $\frac{dB}{dt} = 0$, 故而有式(0-9)的结果。因此, Blv 定则仅适用于恒定磁场。图 0-5 中的感应电动势极性可由楞次定律来检验其正确性, 这时应注意, 通过一匝线圈的磁通是增加的。

0.2.7 安培电路定律 (全电流定律)

电路与其产生的磁场之间的关系为

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I = \text{封闭电流} = F \quad (0-10)$$

式中, $d\mathbf{l}$ 为沿积分的闭合路径中的长度元, F 即为通常所说的磁动势。虽然式(0-10)在一般情况下求解很麻烦, 但若沿积分路径上某一段上的磁场强度是均匀的, 则方程就变得简单多了。在图 0-6 中, 假定磁场强度 H 在分别沿 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 各段上都是均匀的, 则运用式(0-10)可得

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4$$

$$= NI = F \quad (0-11)$$

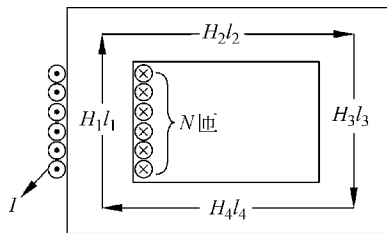


图 0-6 安培电路定律示意图

0.2.8 能量守恒定律

机电能量转换, 是指将能量从电能转换为机械能, 或者将机械能转换为电能的过程。这种转换并不是直接的, 而需首先将其转换为媒介形式的磁能(然后再转换为另一种形式的能量)。这种转换是可逆的, 只是在转换过程中伴随有作为热所消耗的能量。

电机在能量转换或传递的过程中, 能量守恒定律必须遵守。虽然可任意假定, 但还是按惯例假定能量从电机的一对端口流进, 并由机械负载吸收, 即转化为运动。这样能量转换符合以下等式:

$$\{\text{电能输入}\} - \{\text{绕组热损耗}\} - \{\text{铁芯损耗}\}$$

$$= \{\text{机械系统能量}\} + \{\text{摩擦损耗}\} + \{\text{磁场储能}\}$$

0.3 铁磁材料和磁路

从磁性能方面看, 所有材料分为铁磁材料和非磁性材料两类, 这主要取决于它们的磁化曲线。非磁性材料的磁化曲线是线性的, 而铁磁材料呈现出非线性的 B - H 曲线形。图 0-7 给出了两种典型的材料分类。由于考虑到有效的工作温度, 图中仅给出了纯金属状态下的铁、镍、钴以及一些合金。实际电机几乎整个磁路都是用铁磁材料构成的。

0.3.1 饱和现象

图 0-7(a) 中典型的铁磁材料的 B - H 特性曲线, 通常分为线性和饱和两区域。两者之间的转折点就是人们通常所说的膝点。此外, 图 0-7(b) 中还画出了铁磁材料的相对磁导率。

非铁磁材料的相对磁导率 $\mu_r = 1$, 而在整个实用的磁通密度范围内, 铁磁材料的相对磁导率要比 1 大得多(2000~6000)。

专门用于机电能量转换装置的电工钢片, 是经过特殊加工工艺生产的出来的, 主要用于某些特殊场合。铁磁材料的原子的电子数比内层全电子数要少, 因此, 由电子旋转产生的磁场在原子内部并不能完全抵消。所以, 铁磁材料的每一个原子就有一个磁力能。当熔化的铁磁材料凝固时, 在原子层面的区域内便形成晶体。在每一个区域内, 所有原子的磁力能排列一致。

无向性电工钢片要经过特殊的冶金工艺程序加工, 以便使其形成斜角形的磁畴, 如

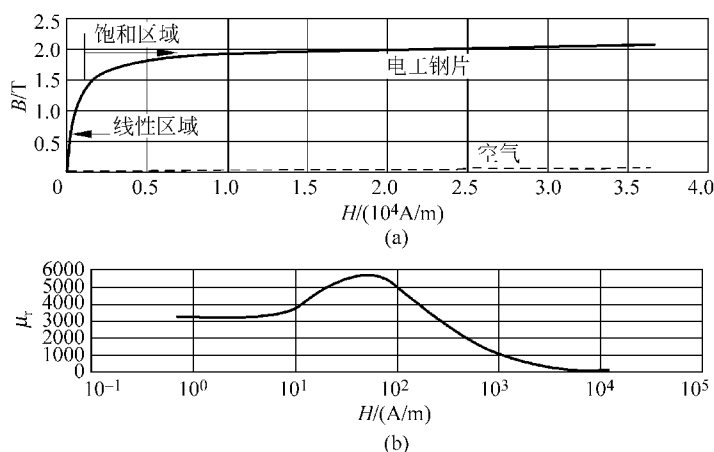


图 0-7 磁化特性曲线

图 0-8(a)所示,其中晶体的结构达到了静态磁平衡。如图 0-8(b)所示,只需一个中等程度的 H 场,便可使原子的磁力能方向相反,且在每一晶体中能有效地移动磁畴。由于此时的合成磁力能的方向向右,因此磁通的方向也是自左向右的。这种磁畴移动现象发生在图 0-7(a)中磁化曲线的线性区域段。如若 H 场方向向上,则磁畴便这样移动,以使磁力能的方向也向上;如若此时施加一中等程度的 H 场,材料中的磁通流向可为任何方向。这种支持任意方向磁通的潜能,使得这种材料适用于构造电机的磁路,这便是无向性电工钢片的基础。

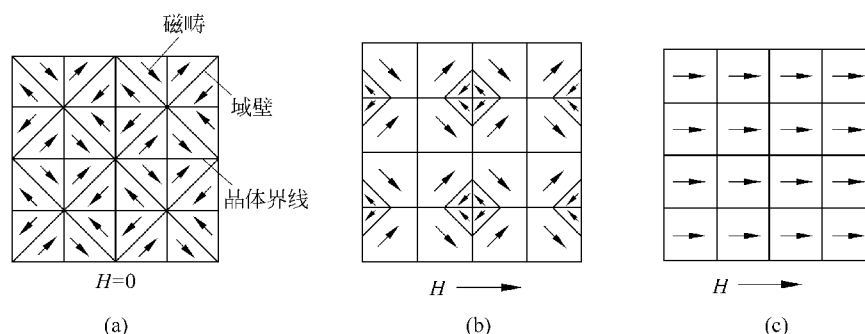


图 0-8 磁化过程

(a) 无外加 H 场; (b) 外加中等 H 场; (c) 外加强 H 场

在磁畴完全崩溃后,磁力能仍然有一个唯一的方向,这就是外施磁场的方向。如若外施磁场明显增加,则所有的磁力能便沿着外施磁场方向一致排列,如图 0-8(c)所示。在外施磁场大量增加的情况下,从磁畴的崩溃到磁力能的排列一致,大约增加了 15% 的磁通。该现象发生在图 0-7(a)中磁化曲线中的饱和区域段。

另一些冶金加工工艺,采用加强晶体结构和控制轧制方向的方法,可产生纹理取向电工钢片。在这种情况下,磁畴几乎是一个方向,仅仅只需必要的磁畴移动,便可获得很高的磁通密度。因此,纹理取向电工钢片与无向电工钢片相比,只需一很小的 H 场,便可获

得很高的 B 场。这种纹理取向电工钢片在变压器中得到了很好的应用,因为变压器的磁路方向是一定的。

0.3.2 磁滞现象与磁滞损耗

若给一铁磁材料样品外施一磁场,而后又移开,在不再对其施加反向磁场的情况下,磁畴便不再在原处出现。其内在原因,是一些原子的磁力能的排列方向与原来的排列轴心不一致。因此,其磁力能并不为零,因而产生一个小的 B 场。这样,下降的 $B-H$ 曲线段,并不再沿上升的 $B-H$ 曲线段返回,这种现象便称之为磁滞现象。由于存在磁滞现象,对铁磁进行反复磁化时可得到一条闭合曲线,称为磁滞回线。反复磁化过程中所消耗的能量称为磁滞损耗,该损耗与磁滞回线的面积(由磁通密度的最大值 B_m 决定)、磁场交变频率 f 和铁磁材料体积 V 成正比,可用经验公式表示为

$$p_{Hy} = C_{Hy} B_m^n f V$$

其中, C_{Hy} 为与材料有关的磁滞损耗系数, $n=1.5\sim 2$, 估算时一般取 $n=2$ 。

0.3.3 涡流现象与涡流损耗

因为铁芯是导磁体也是导体,交变磁场在铁芯内产生自行闭合的感应电流,即称为涡流,涡流在铁芯中产生热损耗,即所谓涡流损耗。频率越高,磁通密度越大,感应电动势就越大,涡流损耗也越大;铁芯的电阻率越大,涡流流过的路径越长,涡流损耗就越小。电机铁芯通常由加入适量硅的硅钢片(又称电工钢片)叠压而成,由于硅的加入使铁芯材料的电阻率增大,硅钢片沿磁力线方向排列,钢片间有绝缘层,叠片越薄,损耗越低,如图 0-9(a)~(c)所示。如不计饱和影响,由正弦波电流所激励的交变磁场中的铁芯涡流损耗的经验公式为

$$p_{Ft} = C_{Ft} B_m^2 f^2 d^2 V$$

其中, C_{Ft} 为取决于材料性质的涡流损耗系数, d 为铁芯叠片厚度,其余符号的含义同前。

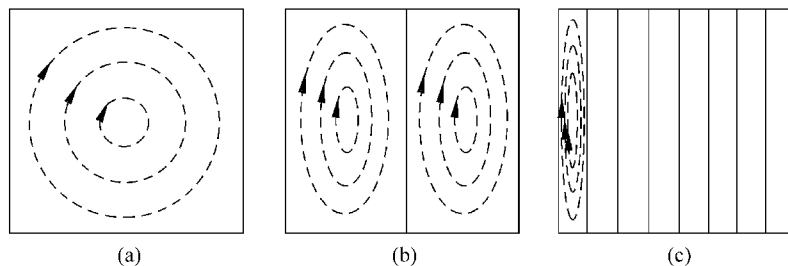


图 0-9 铁磁材料中的涡流

磁滞损耗和涡流损耗之和为铁芯损耗,对于一般电工钢片, B_m 在 1.8 T 以内,可近似表示为

$$p_{Fe} = C_{Fe} B_m^2 f^{1.3} G \quad (0-12)$$

式中, C_{Fe} 为铁芯的损耗系数, G 为铁磁材料质量,其他符号同前。

工程上常用实验测出并以曲线或表格表示各种铁磁材料在不同频率、不同磁通密度

下的比损耗(每 kg 材料的铁芯损耗),再来计算铁磁损耗 p_{Fe} 。

铁芯损耗均转化为热能使铁芯温度升高。为防止电机过热,一方面采用硅钢片以减小铁芯损耗,另一方面则应采取散热降温措施。

0.3.4 磁路

由铁磁材料构成的磁通路径,是机电能量转换装置中重要的组成部分。当今所有实际的电动机、发电机、进相机和变压器等,都是由一个或多个这样的磁通路径构成的。沿着激励源伸展开的磁通路径叫磁路。磁路设计的目的是,在一有限的空间内,以最少的励磁磁动势,达到建立一定磁通的目的。在大多数情况下,机电装置的物理功能要求磁路中有一个或多个气隙。一个明显的特例就是变压器,其整个磁路都是铁磁材料构成的。

当分析磁路时,通常将其分为两类问题:第一为建立一定磁通,求其所需的磁动势;第二为已知励磁磁动势,求其建立的磁通。

如若铁磁材料的 $B-H$ 曲线是线性关系,则解决这两类问题都非常简单。然而情况往往是,除单一均匀磁路这种极少数情况外,由于磁路的非线性,第二类问题通常需用图解法或试探法来求解。如果在磁路中存在多条路径,则第一类问题很可能就需要图解法或试探法来求解。

0.3.5 磁路分析方法

恒定磁动势作用下的交流磁路分析,与直流磁路的分析之间可进行类比。除受磁路非线性的限制外,磁路的分析方法与电路的分析方法是类似的。

在由铁磁材料构成的磁路中,式(0-11)的积分路径与磁场方向是一致的。如若沿整个闭合的线积分路径中的磁通 Φ 为常数,那么,由 $B=\mu H$ 和 $B=\Phi/A$ 知,式(0-11)可改写为

$$\oint \Phi \frac{dl}{\mu A} = NI = F \quad (0-13)$$

由式(0-12)便得

$$\Phi_1 \int_{l_1} \frac{dl}{\mu_1 A_1} + \cdots + \Phi_n \int_{l_n} \frac{dl}{\mu_n A_n} = NI = F \quad (0-14)$$

$$\Phi_1 R_1 + \cdots + \Phi_n R_n = NI = F \quad (0-15)$$

$$R_1 = \frac{l_1}{\mu_1 A_1}, \quad \cdots, \quad R_n = \frac{l_n}{\mu_n A_n} \quad (0-16)$$

R 即为人们通常说的磁阻,意为磁通在磁路中,就像电流在电路中遇到的一种阻碍。再将这种类比延伸到电路,也就是磁动势与电压之间,沿着闭合路径的所有磁动势降之和,就必须等于该磁路中的磁动势。这是与基尔霍夫电压定律的最直接的类比。

下面分析如图 0-10(a)所示的具有分布参数的电路图,图中有一电源电压 V ,其驱动电流流过 3 根串联金属棒。每一金属棒的电阻值可由 $R=\rho \frac{l}{A}$ 计算,这便可用左边所画的集中参数的电路图,作为实际的分布参数电路图的等效电路模型。运用由式(0-14)到式(0-16)引出的磁阻的概念,图 0-10(b)中的磁路,也可由类似电路的方法,得到其右边

的集中参数的磁路图。磁路与其类似的电路中各量之间的比较,如表 0-1 所示。

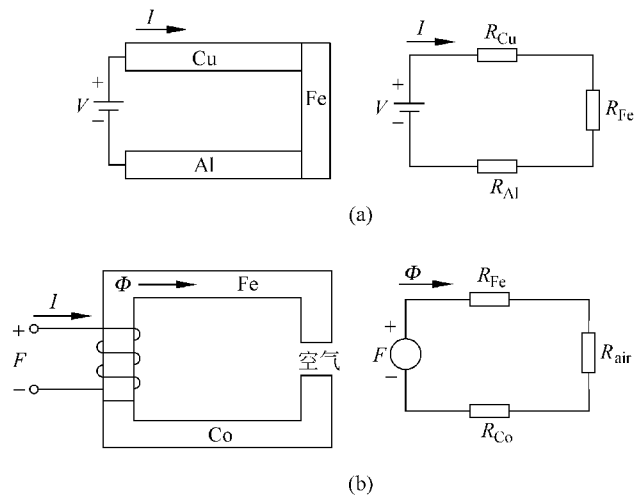


图 0-10 分布与集中参数路径图
(a) 电路; (b) 磁路

表 0-1 电磁量的比较

电 路		磁 路	
电压	$V \text{ (V)}$	磁动势	$F \text{ (A)}$
电流	$I \text{ (A)}$	磁通	$\Phi \text{ (Wb)}$
电阻	$R \text{ (}\Omega\text{)}$	磁阻	$R_m \text{ (H}^{-1}\text{)}$
电场强度	$E \text{ (V/m)}$	磁场强度	$H \text{ (A/m)}$
电流密度	$J \text{ (A/m}^2\text{)}$	磁通密度	$B \text{ (T)}$
电导率	$\sigma \text{ (S/m)}$	磁导率	$\mu \text{ (H/m)}$
	$J = \sigma E$		$B = \mu H$
	$V = IR$		$F = \Phi R_m$
	$\sum U = \sum E$		$F(\sum NI) = \sum \Phi R_m$
	$\sum I = 0$		$\sum \Phi = 0$

由于已确立了电路与磁路之间的类比关系,因此磁路的分析便简单得多了。只是在铁磁材料中,磁导率 μ 是磁通密度 B (即磁场强度 H) 的函数,由此便产生了一个像在电路分析中那样的困难,即怎样来确定电阻值究竟是不是电流的函数。

0.3.6 气隙边缘效应

如图 0-11(a)所示,当磁通在两个铁磁磁路表面之间的气隙穿过时,磁场面将会向边缘扩展。这时气隙中的导磁面,将比两边面积相等的铁磁材料的导磁面更大。当气隙的长度大于 0.5 mm 时,由于磁通穿过气隙时其可用有效面积大大增加,便使得在进行气隙磁场密度计算时,如若用气隙两边的铁磁材料的面积进行计算,便会产生很大误差。除非铁磁材料处于饱和区,否则气隙磁动势降总是占总磁动势的绝大部分。因此,气隙磁动势的计算误差便接近整个磁路磁动势的计算误差。

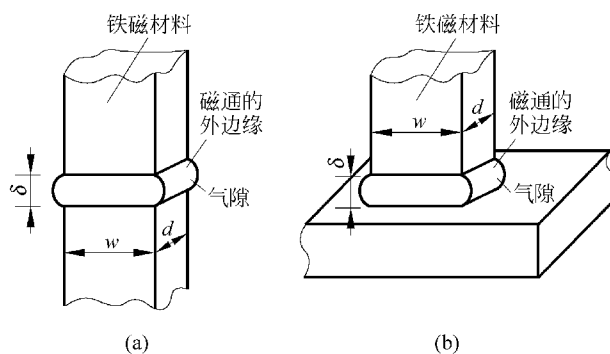


图 0-11 气隙边缘效应

(a) 气隙两边铁磁磁路面积相同；(b) 气隙两边铁磁磁路面积相差悬殊

通常气隙两边多为图 0-11(a)所示的气隙两边铁磁磁路面积相等的情况。如若将沿着气隙磁场的边缘所生成的边缘路径,看成其在 4 个角上带有 1/4 球面的半圆柱形的路径,则气隙的磁导为

$$p_g = \mu_0 \left[\frac{wd}{\delta} + 0.52(w+d) + 0.308\delta \right] \quad (0-17)$$

对如图 0-11(b)所示的气隙两边铁磁磁路面积相差悬殊时的情况,其合乎情理的气隙磁导计算公式为

$$p_g = \mu_0 \left[\frac{wd}{\delta} + 1.04(w+d) + 0.616\delta \right] \quad (0-18)$$

0.3.7 漏磁通

经由并非人为理想设计路径的磁通,称为漏磁通。图 0-12 表示了没经由理想设计路径中的气隙的漏磁通 Φ_g 的概念。在任何实际的磁路中,一些漏磁通经由不同材料的磁路路径。一般说来,当磁路饱和时漏磁通便会增加。

0.3.8 串联磁路

若漏磁通忽略不计,仅有单一路径的磁路,则称为串联磁路。很明显,其类似于单回路电路。在图 0-12 和图 0-10(b)中分别画出了没有漏磁通通过和有漏磁通通过的串联磁路的实物图和类似的电路图。

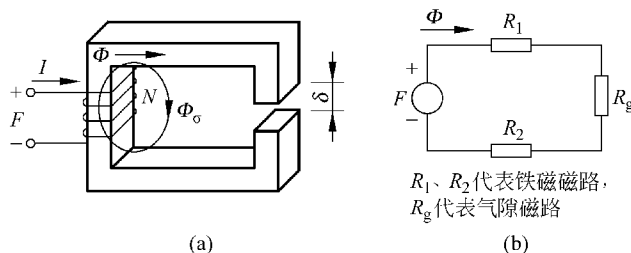


图 0-12 串联磁路(C 字形)

(a) 实物图；(b) 原理图

0.3.9 并联磁路

具有两个或两个以上磁路路径,且忽略漏磁通的磁路,称为并联磁路。除某些可看成线性磁路的情况外,无论是分析第一类还是第二类磁路问题,都至少有一部分需要用到图解法或插值法。求解并联磁路的分析方法,不管磁通路径多么复杂,都能用这么一种磁路的分析方法来求解,该磁路的主要路径环绕着两个高磁阻的区域或窗口。这种由图 0-13 所示的基本几何形状的图形,便称为双磁路。尽管为使尺寸的维度能够减少些,图 0-13 中的磁路采取了以水平中心线为其对称轴,但人们选择时也可有例外。此外,通常选择矩形磁路以简化磁路长度和横截面的计算。然而,以上要介绍的磁路分析方法,对于在几何形状上更为复杂的电机磁路的分析也同样适用。

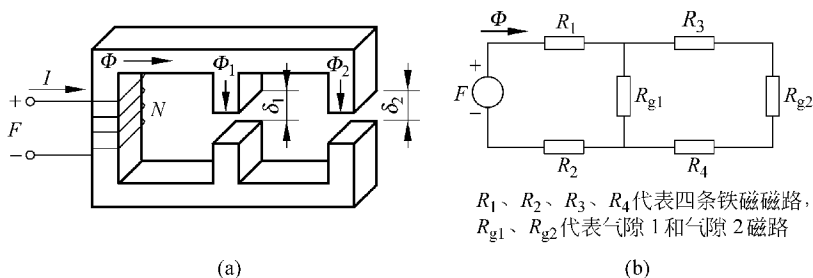


图 0-13 并联磁路(双窗口)

(a) 实物图; (b) 原理图

0.3.10 永磁材料

永磁材料是一种典型的合金材料,其经 H 磁场处理后,仍然还会有一部分剩余磁通密度 B_r 残留。为使磁通密度能降至零,就必须施加一个与原磁场方向相反的 H 磁场。这个外加磁场的大小必须达到矫顽力 H_c 。

静态磁滞回线是永磁电机材料的关键特性。磁滞回线是当铁磁材料受到周期变化的磁场作用时,由材料的 $B-H$ 值的轨迹所包围的一个非零的环形区域。材料的运行点按逆时针方向绕着该环运动。一般来说,磁滞环的区域越大,其永磁性能就越好。图 0-14 描述了三种截然不同的磁滞回线。

第一种磁滞回线(图 0-14(a))是低碳钢的,这种钢主要是用于制作电机和变压器的铁芯材料的电工钢片。即使磁化的饱和程度很高,以至于材料中的所有磁畴方向都不一致,当移去外部磁场后,剩磁仍然很小,通常只是 $B_r < 0.5 \text{ T}$ 。比剩磁 B_r 更有意义的是矫顽力的典型值为 $H_c < 50 \text{ A/m}$ 。只要稍加一点反向磁场,便可使磁通密度等于零。

第二种磁滞回线(图 0-14(b))是不可复原(容易去磁)的永磁材料,如铝镍钴(一种铝、镍与钴的合金)。这种材料以较高的 $B_r (> 1 \text{ T})$ 和不很大的 $H_c (< 100 \text{ kA/m})$ 著称。由于成本相对较低,许多永磁装置都是用这类磁性材料来制作。

第三种磁滞回线(图 0-14(c))是具有像陶瓷(钡或锶的铁氧体)或稀土(钕铁硼或钕钴合金)这样的弹性永磁材料的特性。陶瓷的成本极低,其特性为 $B_r < 0.4 \text{ T}$, $H_c < 300 \text{ kA/m}$ 。

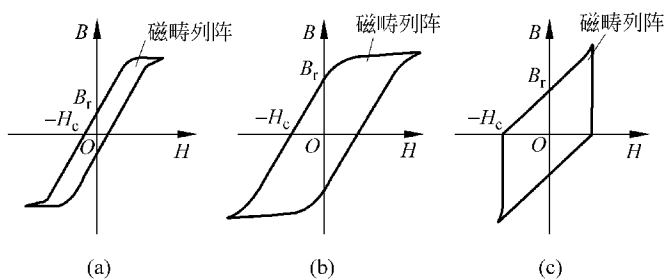


图 0-14 铁磁材料的磁滞回线

(a) 低碳钢的贫永磁性能；(b) 第一类不可复原的永磁性能；(c) 第二类可复原的永磁性能

稀土的成本较高,但性能很好,其 $B_r > 1 \text{ T}$, $H_c > 600 \text{ kA/m}$ 。所以从性能的角度看,绝对是一种好材料。

此外,还要说明铁磁材料的两个特性。其一是居里温度,在这个温度下,铁磁材料中的磁力能方向各不相同,因而变成非磁性。对于所有实用的电磁装置来说,其居里温度都远远高于实际的运行温度。其二是磁致伸缩,其为铁磁材料在外部磁场方向上的一种塑性变形,其每米尺寸的变化是微米级。虽然磁致伸缩会对性能产生一些小的影响,但主要是人听觉范围内的励磁振动,这便给电磁装置带来两倍电源频率的噪声。

0.4 电机制造材料

电机的技术经济指标在很大程度上与其制造材料有关。性能优越的材料能提高电机的性能,还可节省尺寸。正确地选择导电材料、磁性材料和绝缘材料等,在设计和制造电机时极为重要。同时,在选择材料时,又必须保证电机的各部分都有足够的机械强度,即使在按技术条件所允许的不正常运行状态下,也能承受较大的电磁力而不致损坏。

根据电机所用材料的功能,可将其分为导电、导磁、绝缘、散热和机械支撑五种材料。

0.4.1 导电材料

铜是最常用的导电材料,电机中的绕组一般都用铜线绕成。电力工业上用的标准铜,在温度为 20°C 时的电阻率为 $17.24 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$,即长度为 1 m 、截面积为 1 mm^2 的铜线,其电阻为 $17.24 \times 10^{-3} \Omega$,相对密度为 8.9 g/cm^3 ,含纯铜量 99.9% 以上。电机绕组用的导体是硬拉后再经过退火处理的。换向片的铜片则是硬拉或轧制的。

铝的电阻率为 $28.2 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$,相对密度为 2.7 g/cm^3 。作为导电金属,铝的重要性仅次于铜。铝线在输电线路应用很广,但由于容积较大,在电机中尚不能普遍使用,而鼠笼式异步电动机的转子绕组则常用铝浇铸而成。

黄铜、青铜和钢都可作为集电环的材料。

碳也是应用于电机的一种导电材料。电刷可用碳-石墨、石墨或电化石墨制成。为了降低电刷与金属导体之间的接触电阻,某些牌号的电刷还要镀上一层厚度约为 0.05 mm 的铜。碳刷的接触电阻并不是常数,随着电流密度的增大而减小。每对电刷的接触电压

降随着电刷的牌号略有不同。

0.4.2 导磁材料

前已述及钢铁是良好的导磁材料。铸铁因导磁性能较差,应用较少,仅用于截面积较大、形状较复杂的结构部件。各种成分的铸钢的导磁性能较好、应用也较广。特性较好的铸钢为合金钢,如镍钢、镍铬钢,但价格较贵。整块的钢材,仅能用以传导不随时间变化的磁通。

如所导磁通是交变的,为了减少铁芯中的涡流损耗,导磁材料应当用薄钢片,称为电工钢片。根据轧制工艺不同,电工钢片分为热轧钢片和冷轧钢片。电工钢片的成分中含有少量的硅,使它有较高的电阻,同时又有良好的磁性能。因此,电工钢片又称为硅钢片。随着牌号的不同,各种电工钢片的含硅量也不相同,最低的为 0.8%,最高的可达 4.8%。含硅量愈高则电阻愈大,但导磁性能略差。在近代的电机制造工业中,变压器和电机的铁芯愈来愈多地应用冷轧硅钢片,它具有较小的比损耗,且有较高的磁导率。此外,有取向电工钢片比无取向电工钢片可工作在更高磁通密度下。

电工钢片的标准厚度为 0.35、0.5、1 mm 等。变压器用较薄的钢片,旋转电机用较厚的钢片。高频电机需用更薄的钢片,其厚度可为 0.2、0.15、0.1 mm。钢片与钢片之间常涂有一层很薄的绝缘漆。一叠钢片中铁的净长和包含有片间绝缘的叠片毛长之比称为叠片因数。对于表面涂有绝缘漆、厚度为 0.5 mm 的硅钢片来说,叠片因数的数值约为 0.93~0.95。

0.4.3 绝缘材料

导体与导体间、导体和机壳或铁芯间,都必须用绝缘材料隔开。绝缘材料的种类很多,可分为天然的和人工的、有机的和无机的,有时也用不同绝缘材料的组合。绝缘材料的寿命和它的工作温度有很大关系,过高的运行温度,绝缘材料会加速老化,会使其丧失其机械强度和绝缘性能。在电机材料中绝缘材料的耐热程度较低,为了保证电机能在足够长的合理的年限内可靠运行,对绝缘材料都规定了极限允许温度。国家标准根据绝缘的耐热能力分为七个标准等级,见表 0-2。表中绝缘级别的符号及其极限允许温度是由国际电工技术协会所规定的。

表 0-2 绝缘材料的等级

绝缘级别	Y	A	E	B	F	H	C
极限允许温度/℃	90	105	120	130	155	180	>180

Y 级绝缘为未用油或漆处理过的纤维材料及其制品,如棉纱、棉布、天然丝、纸及其他类似的材料。

A 级绝缘为经过油或树脂处理过的棉纱、棉布、天然丝、纸及其他类似的有机物质。整个绕组可先用油或树脂浸透,再在电烘箱中烘干,此种工艺称为浸渍。纤维间所含的气泡或潮气,经过烘干后逸出,油和树脂即行填充原来的空隙。因为油类物质的介质常数较

大,所以 A 级绝缘能力较 Y 级绝缘为强。普通漆包线的漆膜也属于 A 级绝缘。在早期的中小型电机中,A 级绝缘应用最多。20 世纪 60 年代以后,由于绝缘材料工业的发展,中小型电机多采用 E 级绝缘。当今,已普遍采用 B 级及以上绝缘等级。

E 级绝缘包括由各种有机合成树脂所制成的绝缘膜,如酚醛树脂、环氧树脂、聚酯薄膜等。

B 级绝缘包括用无机物质如云母、石棉、玻璃丝和有机粘合物,以及 A 级绝缘为衬底的云母纸、石棉板、玻璃漆布等,B 级绝缘物质在大中型电机中采用颇广。

F 级绝缘是用耐热有机漆(如聚酯漆)粘合的无机物质,如云母、石棉、玻璃丝等。

H 级绝缘包括耐热硅有机树脂、硅有机漆,以及用它们作为粘合物的无机绝缘材料,如硅有机云母带等。H 级绝缘由于价格昂贵,所以仅用于对尺寸和重量限制得特别严格的电机。

C 级绝缘包括各种无机物质,如云母、瓷、玻璃、石英等,但不用任何有机粘合物。这类绝缘物质的耐热能力极高。它们的物理性质使它们不适用于电机的绕组绝缘。C 级绝缘在输电线上应用很多。在电机工业中利用瓷做成变压器的绝缘套管,用于高压的引出端。

变压器油为一特种矿物油,在变压器中它同时起绝缘和散热两种作用。

0.4.4 机械支撑材料

电机上有些结构部件是专为机械支撑用的,例如机座、端盖、轴与轴承、螺杆、木块间隔等。在漏磁场附近,任何机械支撑,最好应用非磁性物质。例如置于槽口的槽楔,中小型电机用木材或竹片,大型电机用磷青铜等材料。定子绕组端部的箍环应当用黄铜或非磁性铜制成。转子外围的绑线采用非磁性钢丝。钢的成分中如含有 25% 镍或 12% 锰,即可完全使其丧失磁性。

制造电机所用的材料种类极多,以上所述仅是大概的情况。

小 结

电机是机电能量转换装置,通过将能量转换成磁能,形成了在能量转换过程中的媒介。运用铁磁材料形成能量转换的主要通量路径,产生高功率密度的机电装置。

电机的运行还是遵从基本电路和磁路定律,特别是电磁感应定律、电磁力定律和全电流定律,而左手和右手定则是判断电机中电磁量的基本判别准则。

铁磁材料呈现出一种非线性的 $B-H$ 曲线特性,这给电机的研究带来分析上的困难。同时这种材料具有的磁滞现象和涡流现象会造成使用时的种种问题必须注意。将磁路对应于电路进行类比分析,可加强对磁路的理解,也可用来指导对磁路的分析过程。

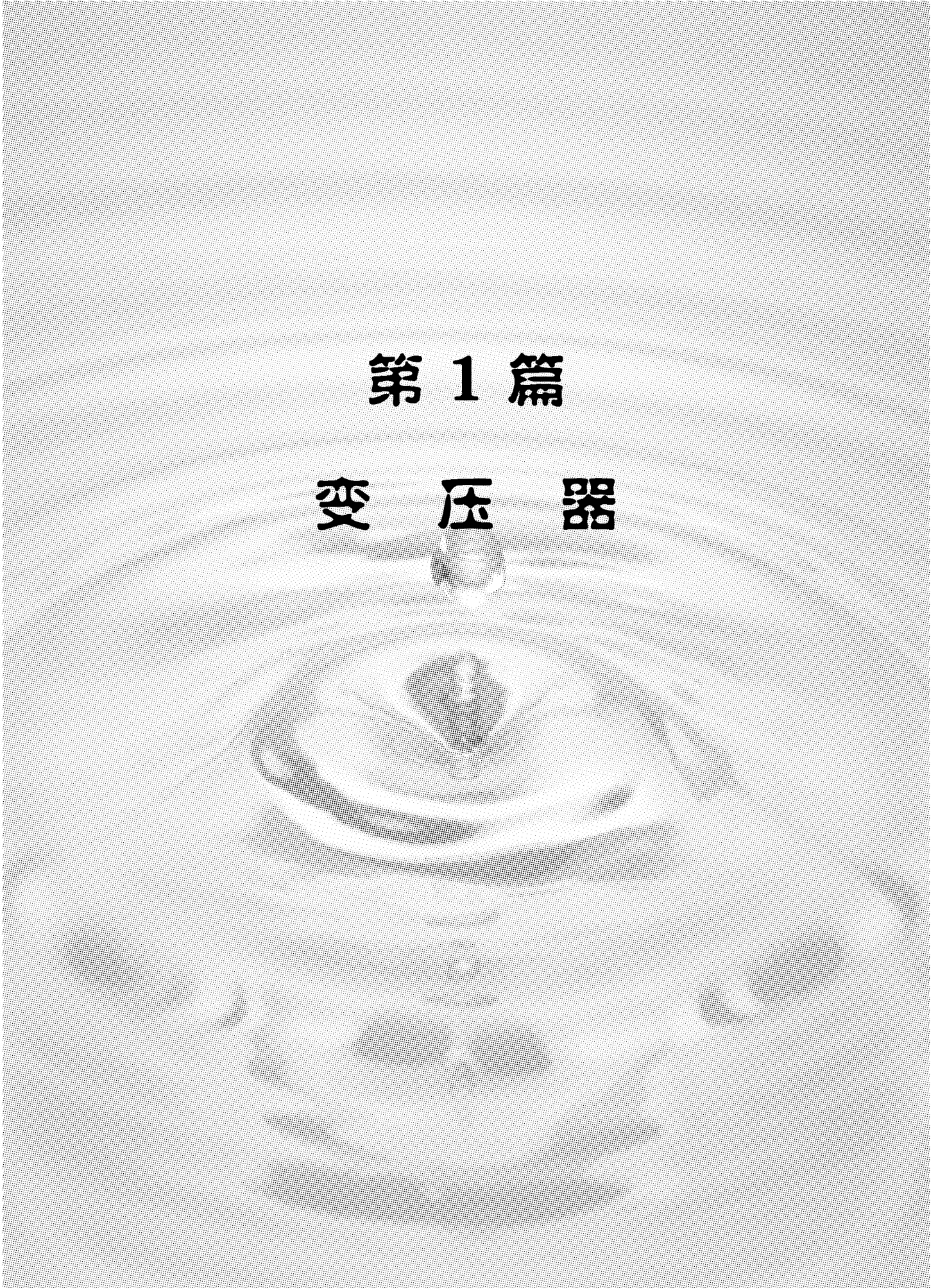
在制造中还要根据用户要求,采用不同的导电、导磁、绝缘、支撑等材料才能制造出一台性能优越、运行可靠的电机产品。

习 题

- 0-1 如果磁通密度 B 的方向与导体中心线成 30° 夹角,重新求解例 0-1 中的问题。
- 0-2 图 0-2 中的导体直径为 D ,求:描述导体内磁场强度 H 场的表达式。
- 0-3 假设图 0-5 中磁通密度 B 为均匀场,但其大小随时间变化,其表达式为 $B(t) = B_1 + B_2 \sin \omega t$ 。求其感应的电动势 e 。
- 0-4 令 $w = d = 50 \text{ mm}$, $\delta = 2 \text{ mm}$ 。求:如图 0-11 所示的两个气隙结构装置中的气隙磁导率相差的百分数。
- 0-5 电机的磁路常采用什么材料制成,这些材料有哪些主要特性?
- 0-6 磁滞损耗和涡流损耗是什么原因引起的?它们的大小与哪些因素有关?
- 0-7 试叙述全电流定律、电磁感应定律和电磁力定律的物理意义以及它们在电机中的作用。

第 1 篇

变 压 器



1.1 变压器的用途

电力变压器是一个静止的电器,它是由绕在同一个铁芯上的两个或两个以上的绕组组成的,绕组之间通过交变的磁通相互联系着。它的功能是将一种电压等级的电能变成同频率另一种电压等级的电能。

为了将发电厂发出的电能经济地传输、合理地分配和安全地使用,都要用到电力变压器。图 1-1 是简单的输配电系统图。发电机发出的电压不可能太高,一般只有 $10.5\sim 20\text{ kV}$,要想将发出的大功率电能直接送到很远的用电区去,几乎是不可能的。这是因为,低电压大电流输电,除了在输电线路路上产生很大损耗外,线路上产生的压降也足以使电能送不出去。为此,需要用升压变压器将发电机端电压升高到较高的输电电压——当输电的功率一定时,电压升高,电流就减小,输送过程产生的损耗将降低,能比较经济地将电能送出去。一般地,当输电距离越远,输送的功率越大,要求的输电电压也越高。例如,输电距离为 $200\sim 400\text{ km}$,输送容量为 $200\sim 300\text{ GW}$ 的输电线,输电电压一般需要 220 kV ,输电距离在 1000 km 以上,则要求有更高的输电电压。

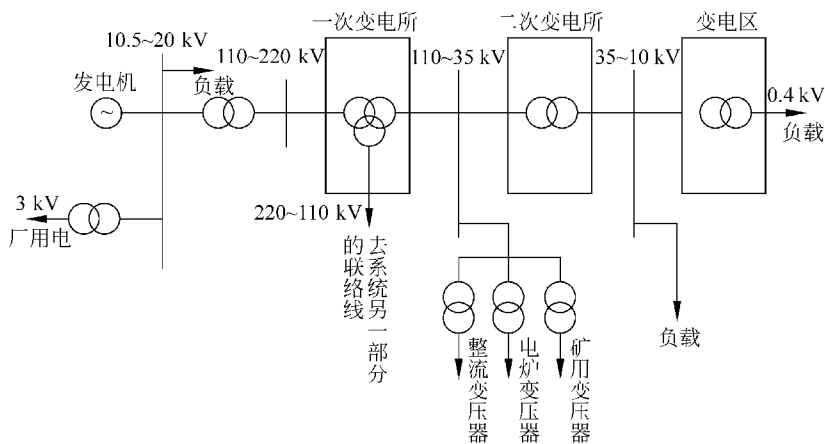


图 1-1 简单的输配电系统图

当电能送到用电地区,还要用降压变压器将电压降低为配电电压,然后再送到备用电分区,最后再经配电变压器将电压降到用户所需要的电压等级,供用户使用。大型动力设

备,采用 6 kV 或 10 kV;小型动力设备和照明用电则为 380 V/220 V。为了将两个不同电压等级的电力系统彼此联系起来,常常用到三绕组变压器,如图 1-1 中的联络变压器。此外,还有各种专门用途的变压器,如整流变压器、电炉变压器等。由此可见,变压器的用途十分广泛,其品种、规格也很多。通常,变压器的安装容量约为发电机安装容量的 6~8 倍。由此可见,电力变压器对电能的经济传输、灵活的分配和安全使用,都具有重要意义。

1.2 变压器的分类与基本结构

1.2.1 变压器的分类

变压器有多种分类方法。

按用途分类:有电力变压器和特种变压器;

按绕组数目分:有双绕组变压器、三绕组变压器和自耦变压器;

按相数分:有单相变压器和三相变压器。

电力变压器是电力系统中输配电的主要设备,容量从几十 $\text{kV} \cdot \text{A}$ 到几十万 $\text{kV} \cdot \text{A}$,电压等级从几百伏到 500 kV 以上。电力系统中用得最多的是高、低压两套绕组的双绕组变压器,其次是具有高、中、低三套绕组的三绕组变压器和高、低压绕组共用一个绕组的自耦变压器。本书限于篇幅,只重点叙述普通双绕组变压器,而三绕组变压器、自耦变压器和仪用互感器的运行分析只作简单介绍。

1.2.2 电力变压器的基本结构

电力变压器主要由铁芯、带有绝缘的绕组、油箱、变压器油和绝缘套管组成,下面主要介绍铁芯、绕组和油箱。

1.2.2.1 铁芯

变压器的铁芯构成变压器的磁路。为了减小涡流损耗,变压器的铁芯用双面涂绝缘漆的电工钢片叠成,钢片的厚度为 0.35 mm。变压器的铁芯平面如图 1-2 所示。铁芯结构可分为两部分,C 为套线圈的部分,称为铁芯柱。Y 为用以闭合磁路部分,称为铁轭。单相变压器有两个铁芯柱,三相变压器有三个铁芯柱。

变压器的铁芯材料结构有两种基本形式。第一种是为如图 1-3(a)所示芯式结构。这种铁芯结构的特点是铁轭靠着绕组的顶面和底面,不包围绕组的侧面。它结构简单、工艺简单,因此国产电力变压器均采用芯式结构。第二种为如图 1-3(b)所示的壳式结构。这种结构的铁芯不仅包围绕组的顶面和底面,而且还包围绕组的侧面。

它机械强度高,制造复杂,耗材料多,仅在一些特种变压器中采用。

组成铁芯的钢片应先裁成所需用的形状和尺寸,称为冲片,然后按交错方式进行装

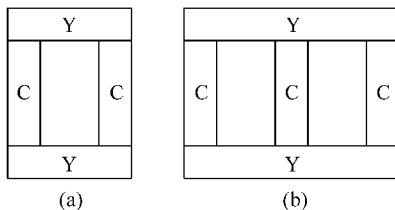


图 1-2 变压器的铁芯平面

(a) 单相变压器; (b) 三相变压器

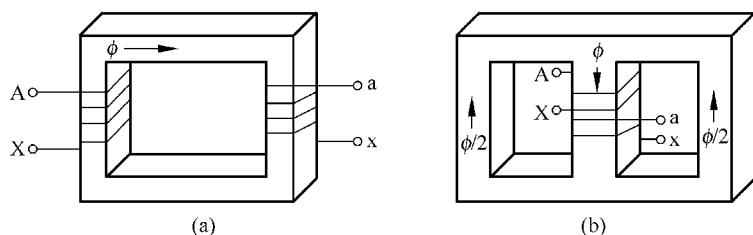


图 1-3 变压器的结构形式

(a) 芯式结构; (b) 壳式结构

配。图 1-4(a)表示单相变压器的铁芯,每层由四片冲片组合而成。图 1-4(b)表示三相变压器的铁芯,每层由六片冲片组合而成,每两层的冲片组合应用了不同的排列方式,使各层磁路的接缝处互相错开,这种装配方式称为交叠装配。这种装配可避免涡流在钢片与钢片之间流通。且因各层冲片交错相嵌,所以在将铁芯压紧时可用较少的紧固件而使结构简单。为提高磁导率和减少铁芯损耗,电力变压器一般采用冷轧硅钢片,为减少接缝间隙和励磁电流,有时还采用由冷轧硅钢片卷成的卷片式铁芯。

1.2.2.2 绕组

绕组构成变压器的电路部分,一般用绝缘铜线或铝线绕制而成。在变压器中接到高压电网的绕组为高压绕组,接到低压电网的为低压绕组。变压器绕组的基本形式有同心式和交叠式两种,芯式变压器常用同心式绕组,壳式变压器常用交叠式绕组。参看图 1-5(a),高压绕组和低压绕组均做成圆筒形,然后同心地套在铁芯柱上。交叠式绕组又称为饼式绕组,参看图 1-5(b),高压绕组和低压绕组各分为若干个线饼,沿着铁芯柱的高度交错地排列着。为了排列对称起见,也为了使高压绕组离铁轭远一些以便于绝缘,高

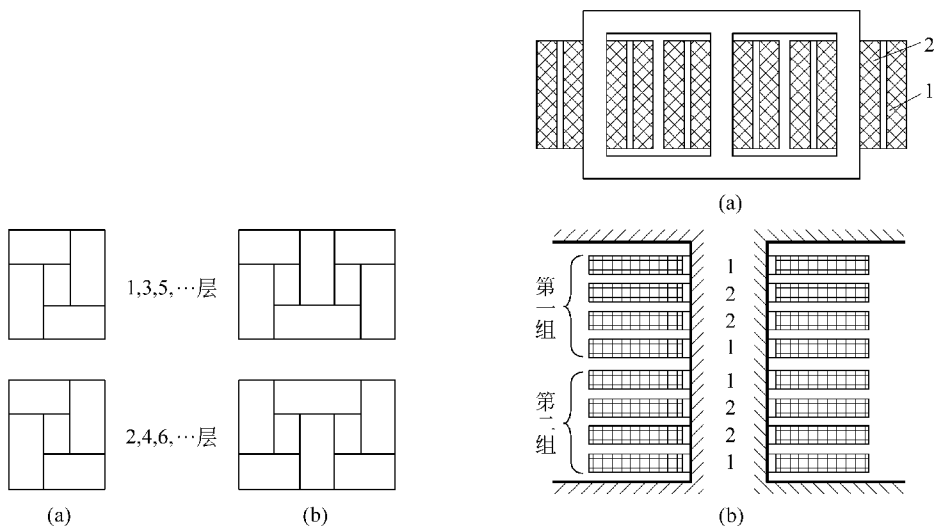


图 1-4 变压器铁芯的交叠装配

(a) 单相变压器; (b) 三相变压器

图 1-5 变压器绕组

(a) 同心式圆筒形绕组; (b) 交叠式绕组

1—高压绕组; 2—低压绕组