

编 者 的 话

本书根据大连海运学院轮机系最新的教学计划和教学大纲的精神，并按第一版使用过程中师生提出的宝贵意见，编者对第一版的内容与安排作了必要的修改，使之更符合轮管专业学生对该课程内容的要求。

全书由大连海运学院曾兆钰主编。全书分上、下两册，上册由曾兆钰同志编写，下册由高嘉生同志编写，全书经隋克立同志审阅。

本书作为大连海运学院轮机系轮机管理专业学生的教材，也可供其它院校相近专业学生的教学参考。

隋克立 立克立

目 录

第一篇 电 机

绪 言

第一章 磁性材料和磁路..... (3)

1 • 1 磁场的基本概念..... (3)

1 • 2 磁性材料的磁性能..... (4)

1 • 3 常用的铁磁性材料..... (5)

1 • 4 磁路计算的基本概念..... (6)

第二章 变压器..... (11)

2 • 1 变压器的基本构造..... (11)

2 • 2 变压器的基本作用原理和主要功能..... (13)

2 • 3 自耦变压器..... (20)

2 • 4 仪用变压器..... (23)

2 • 5 三相电压的变换..... (28)

2 • 6 实际变压器..... (30)

2 • 7 变压器的简化等效电路..... (34)

2 • 8 变压器的运行特性..... (37)

第三章 异步电动机..... (39)

3 • 1 三相异步电动机的构造..... (39)

3 • 2 三相绕组的基本知识..... (42)

3 • 3 旋转磁场..... (44)

3 • 4 三相异步电动机的转动原理和工作状态..... (47)

3 • 5 三相异步电动机运行情况的分析..... (50)

3 • 6 采用折算值的异步电动机等效电路..... (56)

3 • 7 电磁功率和电磁转矩..... (59)

3 • 8 异步电动机的机械特性..... (62)

3 • 9 异步电动机的工作特性..... (70)

3 • 10 异步电动机的起动与起动特性..... (72)

3 • 11 改善起动性能的三相异步电动机..... (77)

3 • 12 异步电动机的调速和调速性能..... (78)

3 • 13 单相异步电动机..... (82)

第四章 同步发电机..... (83)

4 • 1 概论..... (85)

1~57

75~102 105 110 113

122~123

4 • 2	同步发电机的构造	(85)
4 • 3	同步发电机的励磁系统	(87)
4 • 4	同步发电机的电势和空载特性	(89)
4 • 5	同步发电机的电枢反应	(90)
4 • 6	同步发电机的电压方程式与相量图	(92)
4 • 7	同步发电机的外特性与调节特性	(95)
4 • 8	同步发电机的电磁功率和电磁转矩	(97)
4 • 9	同步发电机的并联运行	(98)
4 • 10	同步发电机作并联运行时的功率调节	(103)
第五章 直流电机		(106)
5 • 1	概论	(106)
5 • 2	直流电机的构造	(108)
5 • 3	直流电机按励磁方式的分类	(110)
5 • 4	直流电机中的电动势	(112)
5 • 5	直流电机中的电磁转矩和电磁功率	(115)
5 • 6	直流电动机的转速	(118)
5 • 7	直流电机的电枢反应	(119)
5 • 8	直流发电机的运行特性	(121)
5 • 9	并励发电机的电压建立	(126)
5 • 10	直流电动机的起动与反转	(127)
5 • 11	直流电动机的制动	(129)
5 • 12	直流电动机的机械特性和转速调节	(131)
第六章 自动控制用电机		(139)
6 • 1	E 型变压器	(139)
6 • 2	自整角机	(140)
6 • 3	伺服电动机	(141)
6 • 4	测速发电机	(144)
6 • 5	步进电动机	(145)
6 • 6	旋转变压器	(146)

目 录

第二篇 电力拖动的自动控制基础

绪论	(148)
第七章 继电器接触器控制系统	(149)
7-1 继电器接触器控制系统中常用的电器元件	(149)
7-2 自动控制线路图示法	(150)
7-3 电动机的基本控制环节	(152)
7-4 电动机的基本控制原则	(162)
7-5 电动机的保护	(160)
第八章 顺序控制器	(176)
8-1 概述	(178)
8-2 基本逻辑型顺序控制器的组成	(176)
8-3 二极管矩阵逻辑运算原理	(174)
8-4 二极管矩阵板	(178)
8-5 输出和输入设备	(176)
8-6 可编程序控制器概述	(138)
8-7 PC 控制系统的组成及其工作原理	(172)
8-8 PC 控制器的结构及工作原理	(180)
8-9 PC 程序表达方式及编程器	(188)
第九章 机舱辅机的自动控制	(188)
9-1 概述	(188)
9-2 泵的自动控制	(180)
9-3 辅助锅炉的自动控制	(191)
9-4 辅助锅炉自动控制系统电路原理介绍	(192)
第十章 甲板机械的电力拖动	(204)
10-1 概述	(204)
10-2 双输出直流 $F-D$ 系统起货机的控制线路	(205)
10-3 交流多速电动起货机的控制线路	(209)
10-4 交流多速电动锚机的控制线路	(210)
第十一章 船舶舵机电力拖动的自动控制	(218)
11-1 舵机的传动机构及其对电力拖动的要求	(218)
11-2 单动操舵的工作原理	(221)
11-3 随动操舵的工作原理	(222)
11-4 自动操舵的工作原理	(223)
11-5 自动舵的控制信号	(225)
11-6 国产 HD—5L 型自动舵	(227)

第三篇 船舶电力系统

第十二章 船舶电力系统总述	(235)
12-1 船舶电力系统的组成及其基本参数	(235)
12-2 船舶电力系统的工作环境及对电力系统的基本要求	(237)
12-3 船舶电站	(237)
12-4 船舶应急电源	(246)
12-5 船舶配电装置	(247)
12-6 船舶电网	(248)
第十三章 同步发电机的自动调压装置	(252)
13-1 概述	(252)
13-2 相复励自激恒压装置	(255)
13-3 可控相复励自激恒压装置	(259)
13-4 无刷同步发电机及其自动调压装置	(261)
第十四章 同步发电机并联运行	(266)
14-1 概述	(266)
14-2 手动准同步并车方法	(265)
14-3 粗同步并车方法	(269)
14-4 同步发电机准同步自动并车原理	(270)
14-5 并联运行同步发电机之间无功功率的分配	(278)
14-6 并联运行同步发电机之间有功功率的分配	(281)
14-7 并联运行同步发电机的频率和有功功率自动调整简述	(283)
14-8 发电机组并联运行的稳定性 (以柴油机发电机组为例)	(284)
第十五章 船舶电力系统的保护	(286)
15-1 概述	(286)
15-2 同步发电机的保护	(286)
15-3 船用自动空气断路器	(287)
15-4 逆功率保护及逆功率继电器	(290)
15-5 自动卸载装置	(291)
15-6 船舶电网的保护	(292)
15-7 岸电的相序和断相保护	(294)
主要参考文献	(297)

第一篇 电机

绪 言

在现代化的船舶上,电能的应用已经普及到船上的各个方面。各种电气设备,种类之多,真是数不胜数。复杂的有机舱自动化中采用的电子计算机,简单的有控制管道的电磁阀。随着时代的进展,各种电气设备日新月异,旧的逐渐被新的取而代之。然而,作为重要的电气设备——电机(包括变压器),到目前为止,还未见有一种新的、在原理上是全然不同的电气机械能够有效地取而代之。

在机舱中,各种油、水泵和风机是用电动机拖动的。在舵机房中,各种型式的舵机要有电动机为它服务。在甲板上,起货机、锚机等一般也都用电动机来拖动。对航行至为重要的导航设备,各种型式的电动机也是它们的重要组成部分。至于说到船舶主电源,现在还无例外地由发电机来担任。船上的整个动力系统,电机是它的重要组成部分。所以,对一个轮机员来说,掌握电机的基本知识当然是十分必要的。

电机的种类繁多,有按电流种类来分的,如直流电机,交流电机和交直流两用电机等。有按其功能来分的如发电机、动力用电动机和控制电机等。

海轮上的环境往往比陆上差,特别是远洋船舶,它的航行区域广,气温变化大,机舱中的温度高,空气中常含有盐雾、油雾及霉菌等腐蚀物,甚至还混合有爆炸性气体。此外,由于风浪的作用而使船舶产生倾斜和摇摆。这些条件,安装在陆地上的电机,一般是难于满足船舶要求的。为此,电机制造部门生产了船用电机的专门系列,以适应船舶的特殊条件。

尽管电机的种类很多,功能也不相同,但从总的说来,都是一种能量转换机械,或是将机械能转换成电能,如各种发电机,或是将电能转换成机械能,如各种电动机。变压器也是一种能量转换设备,它只不过是將一种参数的电能(如50Hz、400V)转换成另一种参数的电能(如50Hz、220V)。所有这些形式的能量转换,都是以物理学中的电磁感应定律和安培力定律为基础的。从另一角度看,即从电机(变压器)的构造看,都具有电路和磁路两大部分。所以,有关电路、磁路的基本定律和定理,是分析电机原理和性能的必要工具。当然,电机作为一种能量转换机械,在其能量转换的过程中,总是遵守着能量守恒定律的。所以,上面提到的这些定律和定理,是学习电机的基础知识。

学习电机,分析它的性能、基本工作原理和应用,都是针对某一类型的具体的电机来进行的。所以,了解电机的具体构造是学好电机原理的前提。

我们在学习电路理论时曾经指出,电路是一种实物的理想化后的模型。利用模型来

研究和分析工程中的实际问题是一种很重要的手段，是一种科学的处理问题的方法。它可以使我们暂时避开一些次要的因素而集中力量解决主要矛盾。否则，那怕是一个简单的电器，分析起来也将是十分复杂的事。我们在研究电机问题时，也常利用理想化的实物模型，以便着眼于最基本、最重要的问题。然后在有必要时，再根据问题的性质，考虑那些必需考虑的其它因素。本教材也将遵循这样的方法来分析各种电机的原理和应用。

前言

本书是根据《电机学》课程的教学大纲编写的。本书可作为高等院校电机专业及相关专业的教材，也可供从事电机工作的工程技术人员参考。

本书在编写过程中，参考了国内外有关电机学教材和文献。本书力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书共分八章。第一章介绍电机的基本理论，包括电机的分类、电机的基本方程、电机的能量转换等。第二章介绍直流电机的原理和应用。第三章介绍交流电机的原理和应用。第四章介绍同步电机的原理和应用。第五章介绍异步电机的原理和应用。第六章介绍特种电机的原理和应用。第七章介绍电机的运行特性。第八章介绍电机的保护和控制。

本书可作为高等院校电机专业及相关专业的教材，也可供从事电机工作的工程技术人员参考。

第一章 磁性材料和磁路

我们在日常生活和工作中所遇到的电工设备，如电机、变压器、电磁铁和电工仪表等，它们的具体构造虽然各不相同，但从总的说来，都可以看成是由电路和磁路两大部分组成的。

所谓磁路，就是磁通量所经过的特定的路径。例如变压器中的铁芯，就是变压器工作磁通所经过的路径。所以，变压器的铁芯是它的磁路，两副线圈是它的电路。磁路问题，也就是局限于一特定路径内的磁场问题。因此，在物理学中用来描述磁场性质的基本物理量也同样适用于磁路。为了学习上的方便，现将有关磁场方面的基本物理量简述如下。

1.1 磁场的基本概念

任何运动的电荷和电流，除了和静止电荷一样产生电场外，还在它的周围空间产生另一种特殊的场，称为磁场。磁场的重要特征是它对运动着的电荷或电流作用以力。在磁场中的任一点，自由悬挂着的磁针所取的方向（N 极的指向），作为该点磁场的方向。

一、磁感应强度

磁感应强度 B 是表示磁场内某点的磁场大小和方向的物理量，它是矢量，其方向就是磁场在该点的方向。若磁场中每一点 B 的大小和方向都是相同的，这样的磁场称为均匀磁场。

假定在均匀磁场中，与磁场方向相垂直地放置一通有电流的直导体，则在该导体上的作用力为 $F = BIl$ 。我们可以利用这个公式来定义磁感应强度 B 。式中，若作用力 F 的单位为牛顿 [N]，长度 l 的单位为米 [m]，电流的单位为安培 [A]，则磁感应强度 B 的单位为特斯拉 [T]。特斯拉也就是韦伯/米² [Wb/m²]。此外，也常用高斯 [GS] 作为磁感应强度的单位。它们之间的关系是

$$1\text{T} = 1\text{Wb/m}^2 = 10^4\text{Gs}$$

二、磁力线

为了形象地描述磁场，也像在研究电场时引入电力线的概念一样，我们用磁力线来形象地描绘磁场。为此，对磁力线作出这样的规定：磁力线上每一点的切线方向应与该点磁场的方向相吻合。在垂直于磁力线的平面上，单位面积所穿过的磁力线数，应等于磁感应强度 B 。应该指出的是，由于磁场的特定性质，磁力线是闭合的空间曲线。

三、磁通量

在磁场中，穿过某一面积的净磁力线数，称为该面积的磁通量，简称磁通，用符号 ϕ 来表示。

设面积 S 垂直于均匀磁场 B ，则该面积中的磁通量为

$$\phi = B \cdot S$$

1·1·1

在国际单位制中，磁通的单位是韦伯〔Wb〕。在电磁单位制中，磁通的单位是 马克斯韦〔Mx〕，简称马。它们之间的关系是

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

四、磁场强度

在磁路计算中，常采用一个称为磁场强度 H 的辅助量。它不计及磁介质的磁性而只考虑电流的大小和导体的形状对磁场大小的影响。磁场强度 H 与磁感应强度 B 之间的关系是

$$B = \mu H$$

1·1·2

式中， μ 是磁介质的导磁率。磁场强度的国际单位是安/米〔A/m〕。在工程中常用安/厘米为单位。

五、导磁率

导磁率 μ 是用来衡量物质导磁能力的物理量。在国际单位制中，它的单位是 亨/米〔H/m〕。实验测定，真空的导磁率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ 。

任意一种物质的导磁率 μ 与真空导磁率 μ_0 的比值称为该物质的相对导磁率 μ_r 。

$$\mu_r = \mu / \mu_0$$

1·1·3

1·2 磁性材料的磁性能

自然界的所有物质，大体上可分为非磁性材料和磁性材料两大类。非磁性材料的导磁率 $\mu \approx \mu_0$ ，即 $\mu_r \approx 1$ ，是个常数。空气、木材、纸、铜、铝等都是非磁性材料。

某些金属及其合金，在外加磁场的作用下，会呈现很强的磁性，这类金属与合金统称为铁磁性材料。制造电机、变压器铁芯的硅钢片就是铁磁性材料。自然界的铁磁物质虽然只有铁、镍、钴等几种，但它们的合金呈铁磁性的却非常多。这些铁磁性材料的主要磁性能表现为高导磁率，导磁率呈非线性以及在反复磁化过程中出现磁滞现象和磁滞损失。

一、磁化曲线

物质的 $B-H$ 曲线称为磁化曲线。各种铁磁材料的磁化曲线各不相同，但它们的形状却很相似。图 1·2·1 示出铁磁性材料 $B-H$ 曲线的一般形状。它除了显示出非线性的特征外，最重要的一个特点可算是它的饱和现象了。这个现象表现为当磁场强度 H 已经相当大后，若将它进一步增大，相应的磁感应强度 B 几乎不再增大（图中 m 点以右的线段）。

二、磁滞回路

将铁磁材料作交变反复磁化时，它的 $B-H$ 曲线是一具有方向性的闭合曲线（图 1·2·2），

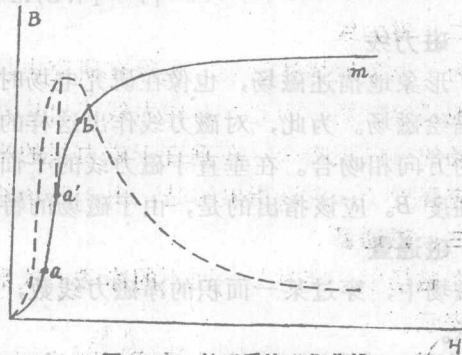


图1·2·1 铁磁质的磁化曲线

称为磁滞回线。由图中可见，假定材料已被磁化到曲线上的 m 点，接着减小磁场强度 H 直至零 (r 点)，这时，材料中的磁感应强度 B 并未消失，就是说，它仍具有磁性 B_r 。 B_r 称为剩磁。永久磁铁中的磁性就是剩磁。如果要将剩磁去掉，则必须将材料作反方向磁化，直到曲线上的点 c 。为使 $B=0$ 所需的 H 值称为矫顽磁力 H_c 。假定将材料继续磁化至 m' 点后再逐渐将 H 减小至 0，接着再正向增加 H 直至回复到 m 点，就形成一个闭合的曲线。

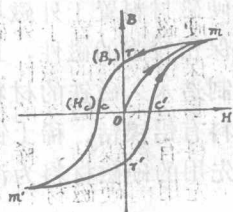


图1.2.2 磁滞回线

由图可见，当材料在反复交变的磁化过程中，磁感应强度 B 总是落后于磁场强度 H 的变化，这种现象称为磁滞。磁滞现象也是铁磁性材料的一个特征。

若将一铁芯作反复交变磁化，铁芯中的磁滞现象将引起铁芯发热。在电机和变压器中，由于磁滞现象而引起铁芯发热，是一种损耗，称为磁滞损失。磁滞损失的大小与磁滞回线所包围的面积成正比。

电机和变压器的铁芯，在交变磁通的作用下，还会产生涡流。它也会引起铁芯发热，这也是一种损失，称为涡流损失。磁滞损失和涡流损失的总和称为铁损。它影响着电机的效率。铁损的大小一般很难用公式作准确的计算。它除了与铁芯的材料、工艺有关外，大体上与交变磁通的交变频率 f 的平方和铁芯中磁感强度最大值 B_m 的平方成正比，即：铁损 $P_e \propto (fB_m)^2$ 。

1.3 常用的铁磁性材料

按照磁滞回线的特点，铁磁材料主要可分为两大类，即：软磁性材料和硬磁性材料。另外，由于计算技术和磁性记录技术的发展，具有矩形磁滞回线（图1.3.1c）的材料也得到广泛的应用。

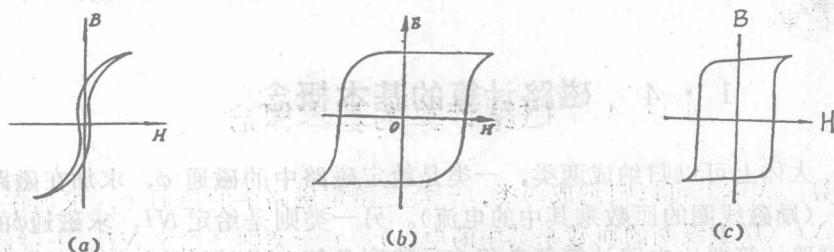


图1.3.1 三种不同典型的磁滞回线

一、软磁性材料

软磁性材料的磁滞回线面积较窄（图1.3.1a），具有较小的矫顽磁力，导磁率高，剩磁也较小，故它的磁滞现象不显著，因而在交变磁场中的磁滞损失小，一般用来制造电机、变压器及各种电器的铁芯。常用的有生铁、铸钢、硅钢片、坡莫合金和铁氧体等。

二、硬磁性材料

硬磁性材料具有较大的矫顽磁力，剩磁也较大，磁滞回线的面积较大，磁滞现象比

较显著(图1·3·1b)。

若将硬磁材料置于外磁场中磁化后取出,它能保留较强的磁性,且不易消失,所以它是制造永久磁铁的材料。目前重要的硬磁材料有铝镍钴、稀土钴、硬磁铁氧化物等。早先用的硬磁材料为淬火后的碳钢。

表1·3·1 示出几种磁性材料的主要性能。

图1·3·2 是几种常用软磁性材料的磁化曲线。

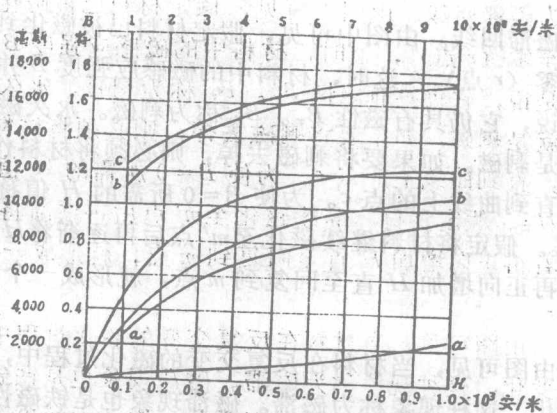


图1·3·2 常用软磁性材料的磁化曲线
a—铸铁, b—铸钢, c—硅钢片

表1·3·1 常用磁性材料的最大相对导率、剩磁及矫顽磁力

材料名称	μ_{max}	$B_r(T)$	$H_c(A/m)$
铸铁	200	0.475~0.500	880~1040
硅钢片	8,000~10,000	0.800~1.200	32~64
坡莫合金 (78.5%Ni)	20,000~200,000	1.100~1.400	4~24
碳钢(0.45%C)		0.800~1.100	2400~3200
钴钢		0.750~0.950	7200~20,000
铝钴合金		1.100~1.350	40,000~52,000

练习思考题

1·3·1 试利用图1·3·2中的磁化曲线,计算当磁场强度H分别为0.7和7(A/m)时硅钢片的导磁率。

1·4 磁路计算的基本概念

磁路的计算,大体上可以归纳成两类,一类是给定磁路中的磁通 ϕ ,求加在磁路上的励磁安匝数NI(励磁线圈的匝数乘其中的电流)。另一类则是给定NI,求磁通 ϕ 的问题。一般说来,磁路计算要比电路计算复杂得多,特别是第二类的计算问题更是如此。这是由于构成磁路的铁磁性材料的导磁率并非常数原因。作磁路计算时,必须利用厂家或有关手册中所提供的磁化曲线,才能获得有关磁性材料的必要的数据。

磁路计算的基本依据是全电流定律。绝大多数的计算公式都是由全电流定律导出的。全电流定律又称为安培环路定律。全电流定律指出:磁场强度H沿任一闭合回线的线积分,等于穿过此回线所围成的面的电流的代数和(图1·4·1)即:

$$\oint H dl = \sum I \tag{1·4·1}$$

式中，电流的正负号要看它的方向与回线所选定的环行方向是否符合右螺旋定则而定。在图中， I_1 应取正号，因为它符合右螺旋定则，而 I_2 则应取负号。

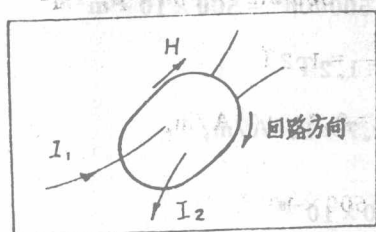


图1.4.1 全电流定律

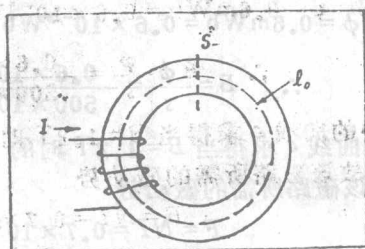


图1.4.2 环状铁芯磁路

现在让我们来看看这个定律如何应用于由铁磁材料构成的简单磁路上。

图 1.4.2 是一个圆截面的环状铁芯，其上均匀地绕以 N 匝的励磁线圈。设铁芯的截面积为 s ，平均长度为 l_0 ，线圈中的电流为 I 。要求导出励磁安匝数 NI 与铁芯中磁通量 ϕ 的关系。

由于环形铁芯的铁磁材料的导磁率，较之周围空气的导磁率要高得多，所以可以认为由电流 I 所产生的磁通 ϕ ，实际上都局限在铁芯磁路中。铁芯各截面上通过的磁通是相等的。假定铁芯的平均长度远大于铁芯横截面的直径，那么，可以认为磁通在截面上的分布是均匀的，就是说，截面 s 上各点的磁感应强度 B 是相同的，所以各点的磁场强度也是相同的。

将全电流定律应用于由平均长度 l_0 所构成的回线，则有

$$Hl_0 = NI$$

或

$$H = \frac{NI}{l_0} \quad 1.4.2$$

式 1.4.2 指出，磁场强度 H 在数值上等于磁路每单位长度的励磁安匝数。

将 $B = \mu H$ 和 $\phi = Bs$ 的关系式代入式 1.4.2 后即得

$$\phi = \frac{NI}{\frac{l_0}{\mu s}} \quad 1.4.3$$

这个公式与电路中的欧姆定律在形式上很相似。式中的励磁安匝数 NI 是产生磁通 ϕ 的“动力”，所以我们称它为磁动势，用 F 表示，即

$$F = NI \quad 1.4.4$$

$l_0/\mu s$ ，相当于电路欧姆定律中的电阻，我们称它为磁路的磁阻，用 R_m 来表示。单位为亨⁻¹ [H^{-1}]。

$$R_m = \frac{l_0}{\mu s} \quad 1.4.5$$

可见，磁路的磁阻与磁路的长度成正比，与其截面积及构成该磁路的材料的导磁率成反比。

例1.4.1 图 1.4.3 是一个由硅钢片叠成的铁芯，平均长度 $l = 500\text{mm}$ ，截面积 $s =$

500mm²。现欲在铁芯中产生 0.6mWb 的磁通量, 问需要多少安匝数? 若线圈为1500匝, 问电流需多大?

解: 已知 $\phi = 0.6\text{mWb} = 0.6 \times 10^{-3}\text{Wb}$, $s = 500\text{mm}^2 = 500 \times 10^{-6}\text{m}^2$

$$\therefore B = \frac{\phi}{s} = \frac{0.6 \times 10^{-3}}{500 \times 10^{-6}} = 1.2\text{T}$$

由图 1.3.2 中的曲线 c 求得当 $B = 1.2\text{T}$ 时的 $H = 0.7 \times 10^3\text{A/m}$,
因 $Hl = NI$, 故该磁路所需的磁动势

$$\begin{aligned} F = NI &= 0.7 \times 10^3 \times 500 \times 10^{-3} \\ &= 350(NI) \end{aligned}$$

励磁电流 I 为

$$I = \frac{350}{1500} = 0.23\text{A}$$

下面我们进一步来看如何应用全电流定律于几段不同材料构成的串联磁路(图 1.4.4)。图中, 截面积为 s 的圆环, 由三段不同材料的磁路串联组成。材料的导磁率分别为 μ_1 , μ_2 和 μ_3 。其平均长度分别为 l_1 , l_2 和 l_3 。圆环上绕有 N 匝励磁线圈, 其中的电流为 I

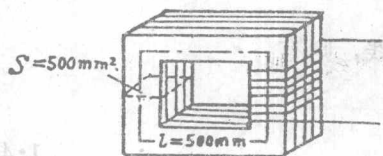


图1.4.3 例1.4.1

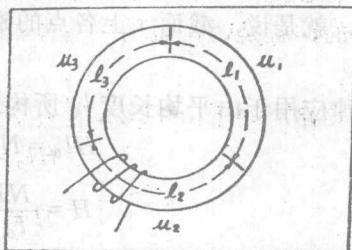


图1.4.4 由三段不同材料构成的串联磁路

我们仍然假定圆环的尺寸可以使得横截面 s 上各点的磁感应强度是相等的, 于是对于各段的磁路, 有

$$B = \mu_1 H_1 \quad B = \mu_2 H_2 \quad \text{和} \quad B = \mu_3 H_3$$

对平均长度 $l_1 + l_2 + l_3$ 所组成的回线, 取其上各点 H 的线积分, 得

$$\oint H dl = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3$$

根据全电流定律 $\oint H dl = NI$, 则有

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 = NI$$

1.4.6

上式中的 Hl 各项, 称为每一段磁路的磁压。例如 $H_1 l_1$ 是 l_1 段磁路的磁压等等。

对于 n 段由不同材料组成的串联磁路, NI 与 Hl 的关系可写成一般化的形式

$$NI = \sum Hl$$

1.4.7

若磁路上有数个励磁线圈, 则式 1.4.7 可写成

$$\sum NI = \sum Hl$$

1.4.8

公式 1·4·8 就是所谓的磁路克希荷夫第二定律。

例1·4·2 有一环形铁芯，内径为 10cm，外径为 15cm，材料为铸钢。磁路中有一短空气隙，其长度 $\delta = 0.2\text{cm}$ 。设励磁线圈中通有 1A 的电流，若要得到 0.9T 的磁感应强度，试求线圈的匝数。

解：磁路的平均长度为

$$l = \frac{10+15}{2} \times \pi = 39.2\text{cm}$$

由于空气隙的长度 δ 远小于磁路的平均长度 l ，所以认为空气隙中的磁感应强度与铁芯中的相同，并且是均匀的。

利用图 1·3·2 中的曲线 b ，查得对应于 $B = 0.9\text{T}$ 的磁场强度 $H_1 = 500\text{A/m}$ 。所以这段材料为铸钢的磁路的磁压降为

$$H_1 l_1 = 500 \times (39.2 - 0.2) \times 10^{-2} = 195\text{A}$$

空气隙中的磁场强度 H_0 为

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.9}{4\pi \times 10^{-7}} = 7.2 \times 10^5 \text{A/m}$$

它的磁压降为

$$H_0 \delta = 7.2 \times 10^5 \times 0.2 \times 10^{-2} = 1440\text{A}$$

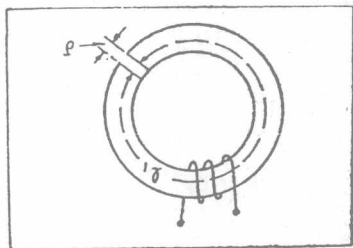


图1·4·5 例1·4·2

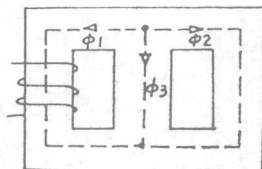


图1·4·6 具有分支的磁路

根据 1·4·6 式，算得所需的安匝数为

$$NI = H_1 l_1 + H_0 \delta = 195 + 1440 = 1635\text{A}$$

故线圈的匝数 N 为

$$N = \frac{NI}{I} = \frac{1635}{1} = 1635\text{匝}$$

从本例中可以看出，当磁路中含有空气隙时，由于其磁阻较大，所以磁压降差不多都在空气隙中。

我们前面谈到的磁路是一种没有分支的串联磁路。在某些电器中，它们的铁芯是一种分支磁路，壳式变压器的铁芯（图 1·4·6）就是一个例子。

对于有分支的磁路中的每一个闭合磁路，磁路克希荷夫第二定律也是适用的。当然，还要考虑到各支路磁通的关系。我们知道，磁力线是一种闭合的回线。所以，对图 1·4·6 这个有分支的磁路，必定有

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0$$

如果在某一支磁路的汇集点处有几条分支磁路，则该汇集点处的磁通关系可以写成一般的形式

$$\sum \phi = 0$$

1.4.9

式 1.4.9 称为磁路的克希荷夫第一定律

从原则上讲，有分支磁路的计算是以磁路克氏第一和第二定律为基础的，当然，它的计算一般说来要比无分支磁路计算要复杂一些。

应该指出的是，上面所举的磁路计算例子，它们的励磁电流都是直流电。而且都是已知 B 来计算 NI 的。如果给定的问题是相反的，即已知 NI ，进而求 B 。那么即使是直流磁路，计算起来也是比较复杂的。对于这样一类的磁路计算问题，已超出本教材的范围。读者若有兴趣，可参考其它有关的书籍。

练习思考题

1.4.1 在本节所举的例题中，不知你是否已注意到各物理量所用到的单位问题，例如截面积 s 和长度 l 用的是什单位？

1.4.2 在例 1.4.1 中，如果铁芯的材料是铸钢，线圈中的电流需要多大？

1.4.3 在例 1.4.2 中，如果空气隙的长度为 0.4cm，线圈的匝数需多少？如果空气隙仍为 $\delta = 0.2\text{cm}$ ，而铁芯材料改用硅钢，线圈的匝数需多少？

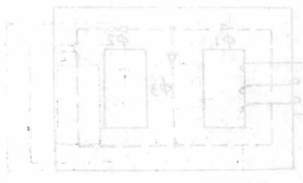


图 1.4.1 例 1.4.1 的磁路图

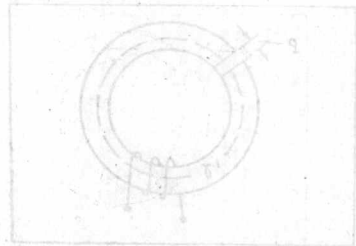


图 1.4.2 例 1.4.2 的磁路图

第二章 变 压 器

变压器是一种应用十分广泛的交流电气设备。无论在城市、农村或船上，它都起着十分重要的作用。例如在船上，船舶主电站发电机的额定输出电压一般都在400V以上，甚至达数千伏，而照明及其它的生活用电则为220V。安全工作灯的电压只有24V或更低一些。为此，就要求用变压器来降压。在某些设备中，例如辅助锅炉中点火电极所需的电压可以高达10000V，这就要求用变压器来升压。在主配电盘中，装有供测量和继电保护用的特殊变压器，称作仪用互感器。在无线电通讯设备中，一般都安装有电源变压器。焊接作业用的电焊变压器也是一种特殊的变压器。

变压器的种类虽然很多，通常按其用途我们只将它分成下列几类：

电力变压器这种变压器主要用于输配电中，将电压升高或降低到合适的数值。这类变压器的容量一般都比较大大，从几个kVA至数千kVA甚至更大。

测量变压器属于这一类的有电流互感器和电压互感器。对这类变压器，除了要求有合适的电流比或电压比外，还要求一定的准确度。

其它特殊用途的变压器如调压变压器、电焊变压器等。另外，电子设备中的电源变压器、隔离变压器、输入输出变压器等都属于特殊用途的变压器。

2 · 1 变压器的基本构造

无论是那一种变压器，它的基本组成部分只是铁芯和绕组。图2·1·1示出变压器构造的原理图。它由一个闭合回路的铁芯和绕在其上的两副绕组构成。其中的一副绕组接至交流电源，称为原绕组或一次绕组。另一副绕组向负载供电，称为副绕组或二次绕组。这两副绕组是变压器中的电路部分，而铁芯则是磁路部分。工作磁通沿着铁芯磁路分布，并将原、副绕组通过磁通而紧密地耦合起来。

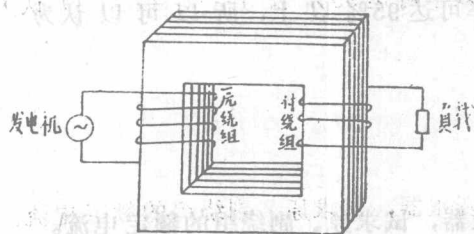


图2·1·1 变压器构造的原理图

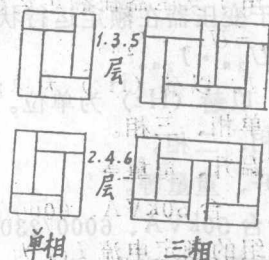


图2·1·2 各层芯片的交错叠法

铁芯是用裁成条状的硅钢片按一定的方式迭装而成。硅钢片的含硅量达4~5%，片的厚度为0.35~0.5mm。这样可以降低铁芯在交变磁通作用下所产生的铁损（涡流和磁滞损失）。在迭装之前，一般将钢片的两面涂以绝缘漆并烘干，使片与片之间有较

好的绝缘。在迭钢片时,应将每层的接缝错开,如图 2·1·2 所示,迭片迭到一定的厚度后,用螺杆或夹件夹紧成为一个坚固的铁芯体。在实际的变压器中,为了获得紧密的磁耦合,原、副绕组套在同一芯柱上,高压绕组在外面,低压绕组靠近铁芯。常见的铁芯结构有两种,一种是芯式结构(图 2·1·3),它的特点是绕组包围着铁芯。芯式变压器的用铁量较少,构造简单,绕组的安放和绝缘都比较容易。因此容量较大的变压器多采用芯式结构。另一种是壳式结构(图 2·1·4),其特点是铁芯包围着绕组。壳式变压器的用铜量较少,小容量的变压器多采用这种结构。一个完整的变压器,除了上述的主体外,尚有外壳和供引出线用的套管等。

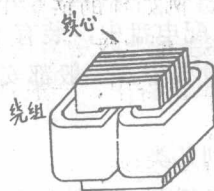


图 2·1·3 芯式变压器

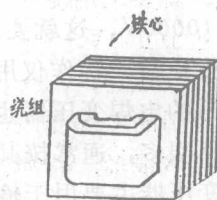


图 2·1·4 壳式变压器

变压器在工作时有能量损失,绕组和铁芯都会发热,所以要考虑冷却问题。根据冷却用的媒介质的不同,变压器分干式和油浸式两种。干式变压器利用空气的自然循环来冷却。船上多用干式变压器,因为它比较安全,不易引起火灾。油浸式变压器则将主体(铁芯、绕组)浸没在变压器油中。利用油加热后的对流作用,并通过油将热传到外壳,而散到周围空气中。为了增加散热面积,外壳外表有散热片或装有油管。

每一台变压器的外壳都附有一块铭牌。铭牌数据是使用变压器时的主要依据。铭牌内的主要数据是:

额定电压 (U_{1n}/U_{2n}): 以伏 (V) 或千伏 (kV) 为单位。 U_{1n} 表示正常运行时原绕组应加的额定电压值。 U_{2n} 则为副绕组开路 (空载) 时的输出电压值。对于三相变压器, U_{1n} 和 U_{2n} 指线电压值。

额定电流 (I_{1n}/I_{2n}) 以安 (A) 为单位。

额定容量 S_n 以伏安 (VA) 或千伏安 (kVA) 为单位。它应等于额定电压和额定电流的乘积。由于变压器在额定运行状态时,其效率可达 95% 以上,所以可以认为 $S_n = U_{1n} \cdot I_{1n} = U_{2n} \cdot I_{2n}$ 。

额定频率 f_n 以赫 (Hz) 为单位。

相数例如单相、三相。

其它还有温升、重量等。

例 2·1·1 一台 50kVA、6000/230V 的单相变压器,试求原、副绕组的额定电流。

解: 原绕组的额定电流 I_{1n} 为

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} = \frac{50,000}{6,000} = 8.3 \text{ A}$$

副绕组的额定电流 I_{2n} 为