

高等学校教材

电机学

上册

ELECTRICAL MACHINES

谢应璞 主编



四川大学出版社

高等学校教材

电机学

上册

谢应璞 主编

四川大学出版社

责任编辑:韩 果
封面设计:罗 光
责任印制:李 平

图书在版编目(CIP)数据

电机学/谢应璞主编. —成都:四川大学出版社,1994.12
(2002.6 重印)

ISBN 7-5614-2091-9

I. 电... II. 谢... III. 电机学-高等学校-教材
IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 034820 号

书名 电机学(上、下册)

作 者 谢应璞
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
印 刷 成都市新都华兴印务公司
发 行 四川大学出版社
开 本 787mm×1 092mm 1/16
印 张 29.25
字 数 652 千字
版 次 1994 年 12 月第 1 版
印 次 2003 年 8 月第 3 次印刷
印 数 2 000 ~ 5 500 册
定 价 28.00 元(上、下册)

◆读者邮购本书,请与本社发行科
联系。电 话:85412526/85414115/
85412212 邮政编码:610064

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回印刷厂调换。

版权所有◆侵权必究

前 言

本书是电力类各专业的大学本科教材,内容符合国家教委所规定的电力类电机学课程的基本要求。

按照电力类各专业的特点,本书主要阐述各类电机的基本原理、基本分析方法、运行特性和参数。

全书按照变压器、异步电机、同步电机和直流机的顺序分为上、下册。上册以变压器为重点,并将交流电机的共同基础部分作为一篇单独列出。下册以同步电机为重点,适当压缩直流电机内容。各章具有相对独立性,具体讲授时秩序可以改变。为了补充和加强学习电机的基础知识,特将磁性材料和磁路诸定律安排在绪论中讲授。

结合我国国情和学生实际,在编著本书过程中,力求作到由浅入深,循序渐进,尽量使物理概念清楚,叙述简洁易懂,便于学生阅读理解和掌握。为便于学生复习和自学,每章有小结、思考题和习题,书末附有习题答案。

本书是在原电机学试用教材的基础上,经过多年的教学实践,补充和修正试用教材中的不足,重新正式出版。教材的各部分由以下教师编写:变压器由廖正菁副教授编写,直流电机由方康勋副教授编写,异步电机及本书的全部思考题及习题由曾德纯副教授编写,同步电机及其余部分由谢应璞教授编写。苏异德高工为本书编写了实验指示书。

本书由谢应璞教授主编,黄耀群教授主审。曾德纯副教授还对全书文字图表和符号进行了终审和修正,并提供了习题答案。

本书编写过程中,得到教研室全体同志和电力系领导的大力支持和帮助,并提供了许多宝贵意见。许多同志为本书的编辑,排印和校对等工作都付出了辛勤的劳动,对此,编写者表示衷心的感谢。同时,本书在编写时博采众长,参阅和引用了有关专家关于电机学和电机理论的论述和文献资料,在此一并向有关作者致以谢意!

由于水平有限,时间仓促,错误和不当之处,在所难免,欢迎读者指正。

编者

1994 年

目 录 (上册)

绪论

0-1 引言	(1)
0-2 铁磁材料的基本特性	(2)
0-3 磁性材料的铁损耗	(4)
0-4 磁路	(5)
0-5 磁路的基本定律	(5)
0-6 电磁基本定律	(10)
0-7 能量守恒原理	(13)
思考题	(16)
习 题	(17)

第一篇 变压器

第一章 变压器的类型和基本结构	(18)
1-1 变压器的主要类型	(18)
1-2 变压器的基本结构	(19)
1-3 变压器的额定值	(25)
1-4 变压器的发热和允许过负载	(25)
思考题	(26)
习 题	(26)
第二章 变压器的基本原理和运行特性	(27)
2-1 变压器的空载运行	(27)
2-2 变压器的负载运行	(33)
2-3 标么值	(39)
2-4 等效电路参数的测定	(41)
2-5 变压器的运行特性	(48)
思考题	(54)
习 题	(55)
第三章 三相变压器	(58)
3-1 三相变压器的磁路系统	(58)
3-2 三相变压器的电路系统——绕组的联接法和联接组	(60)
3-3 三相变压器绕组联接法和磁路系统对电势波形的影响	(64)
3-4 三相变压器的不对称运行	(66)
思考题	(77)
习 题	(77)
第四章 变压器的并联运行	(79)
4-1 变压器理想的并联条件	(79)
4-2 变比或组号不同时的并联运行	(80)
4-3 短路阻抗标么值不等时变压器的并联运行	(82)

4-4 变压器并联运行时负载分配的实用公式	(83)
思考题	(85)
习 题	(85)
第五章 变压器的瞬变过程	(87)
5-1 变压器的空载合闸	(87)
5-2 变压器付边突然短路	(90)
思考题	(93)
习 题	(93)
第六章 三绕组变压器和其它用途的变压器	(94)
6-1 三绕组变压器	(94)
6-2 自耦变压器	(102)
6-3 仪用互感器	(109)
思考题	(112)
习 题	(112)
第二篇 交流电机的绕组、电势和磁势	
第七章 交流电机的绕组	(114)
7-1 基本要求和分类	(114)
7-2 分析绕组时常用的几个基本量	(114)
7-3 三相单层绕组	(115)
7-4 三相双层迭绕组	(118)
7-5 三相双层波绕绕组	(120)
7-6 分数槽绕组	(122)
思考题	(123)
习 题	(123)
第八章 交流绕组的感应电势	(125)
8-1 导体中的感应电势	(125)
8-2 线圈中的感应电势和短矩系数	(126)
8-3 线圈组的电势和分布系数	(127)
8-4 一相绕组的电势	(128)
8-5 在非正弦分布磁场下绕组的谐波电势	(129)
8-6 减小谐波电势的方法	(130)
8-7 齿谐波电势和削弱齿谐波的方法	(131)
思考题	(134)
习 题	(134)
第九章 交流绕组的磁势	(136)
9-1 单相绕组的磁势——脉振磁势	(136)
9-2 单相脉振磁势分解成两个旋转磁势	(141)
9-3 三相绕组的磁势——旋转磁势	(143)

思考题.....	(150)
习 题.....	(150)

第三篇 异步电机

第十章 异步电机的结构与运行状态	(152)
10-1 异步电机的工作原理.....	(152)
10-2 异步电机的三种运行状态.....	(153)
10-3 异步电机的主要结构部件.....	(154)
10-4 异步电机的铭牌及额定值.....	(156)
思考题.....	(157)
习 题.....	(158)
第十一章 异步电动机的运行原理	(159)
11-1 转子不动时的异步电动机.....	(159)
11-2 转子旋转时的异步电动机.....	(165)
11-3 等效电路及其简化.....	(169)
思考题.....	(174)
习 题.....	(174)
第十二章 异步电动机的电磁转矩及机械特性	(176)
12-1 异步电动机的能量转换、功率及转矩平衡方程式.....	(176)
12-2 电磁转矩与机械特性.....	(178)
12-3 最大转矩、过载能力和稳定运行区域.....	(179)
12-4 电磁转矩的实用公式.....	(182)
思考题.....	(185)
习 题.....	(186)
第十三章 异步电动机正常情况与非正常情况下运行分析	(187)
13-1 异步电机正常运行时的工作特性.....	(187)
13-2 异步电机的参数测定、分析与计算.....	(189)
13-3 异步电动机的非正常情况运行分析.....	(192)
13-4 异步电动机运行的节能对策.....	(198)
思考题.....	(200)
习 题.....	(201)
第十四章 异步电动机的起动、调速和制动	(202)
14-1 异步电动机的起动性能和起动方法.....	(202)
14-2 鼠笼式异步电动机的起动.....	(203)
14-3 绕线转子异步电动机的起动.....	(206)
14-4 深槽式和双鼠笼式异步电动机.....	(207)
14-5 异步电动机的调速.....	(209)
14-6 异步电动机的的制动.....	(214)
思考题.....	(218)

习 题.....	(219)
第十五章 单相异步电动机、异步发电机及特殊异步电机	(220)
15-1 单相异步电动机	(220)
15-2 异步发电机	(225)
15-3 两相伺服电动机	(227)
15-4 交流测速发电机	(229)
15-5 自整角机	(230)
思考题.....	(232)
习 题.....	(233)
习题答案.....	(234)
主要符号表.....	(240)

绪 论

0-1 引 言

电能是现代生产中最主要的能源,它的产生、输送和使用是所有能源中最方便、最经济的一种。而电机(包括变压器)是电能的产生、输送和使用中不可缺少的设备。在工业、农业和交通运输业,乃至日常生活中,电机的应用已愈来愈广泛。

随着生产自动化水平的提高,电机已不仅是作为系统中的一个独立的元件来考虑了,它的参数、运行性能、乃至结构型式和组成,都与系统密切相关。电机在各种自控系统中,既是控制对象,又可以作为执行元件。控制系统的自动化程度愈高,电机的作用范围和功能就愈广。电机性能的好坏,直接关系到控制系统运行的稳定性、可靠性及其动态品质,乃至生产效率、产品质量等。要选择和使用好电机,首先必须掌握电机的理论、运行特性、特别是机电能量转换的原理。

衡量一个国家工业现代化水平的一个重要标准,就是机电一体化发展的程度。机电一体化化的开拓除电子技术外,电机工业的发展尤为重要。

总的来说,电机的应用是非常广泛的,地面上、天空中、水底下,只要人们需要去征服的地方,都离不开电机。

电机的类型很多,其工作原理都基于电磁感应定律和电磁力定律。因此,电机构造的一般原理是:用适合的有效材料,构成能互相进行电磁感应的磁路和电路,产生电磁功率和电磁转矩,达到转换能量形态的目的。

电机的分类方法很多,按其功能可分为:

发电机(交流与直流),把机械能转换成电能;

电动机(交流与直流),把电能转换成机械能;

变压器、变频器、移相等,分别用于改变电压、电流、频率和相位;

控制电机,用于控制系统中传递信号、执行指令等。

电机学是基础课向专业课过渡的一门技术基础课,内容上既有较强的理论,又必须联系实际。在分析电机电磁理论时,有些情况下可略去某些次要因素,抓住主要矛盾解决问题;但在另一些条件下,某些次要因素,又成为主要的了。因此,分析问题时必须以生产实际为依据,分清矛盾的主次,抓住主要因素讨论问题,这样所得结论,仍是符合工程实际的。这门课程的另一个特点是,涉及的学科知识面广,牵扯到的问题繁杂,诸如发热与冷却、机械、高压与绝缘、导电与导磁材料等,学习中要求具有较宽的知识面和较强的综合分析问题能力。

总之,电机学课程是理论性、实践性和综合性均较强的一门课程,学习时应重视基本物理概念,强调联系工程实际,要熟悉数学计算方法,掌握实验技能,重视理论与实际相结合

合,方能收到良好的学习效果。

0-2 铁磁材料的基本特性

一、铁磁材料的磁滞回线与基本磁化曲线

铁磁材料包括铁、钴、镍及其合金。

电机和电器中作为导磁的铁芯,在受线圈交流电激励时,受到反复磁化和去磁的作用,在此过程中,磁场强度(亦称磁化力) H 往复地在一个正的最大值($+H_m$)和一个负的最大值($-H_m$)之间变化,如图 0-1 所示。如果铁磁材料最初是以完全去磁的零状态开始,则初次磁化过程的磁通密度(亦称磁感应强度) B 是沿着“起始磁化曲线”随 H 值的增加而上升。当到达图 0-1 所示 a_1 点时,磁通密度达最大值($+B_m$),与之相应的磁场强度为($+H_m$)。随后转入去磁过程,当 H 值从($+H_m$)开始减小时, B 并不按原来的起始磁化曲线减小,而是沿着另一条曲线 $\widehat{a_1b}$ 下降。当 H 值降到零时, B 并未回到零值,直到 H 值过零后向相反方向增加, B 值继续下降,直到 H 在“负”方向达到某一个值时, B 值才下降到零,此后, H 继续向负值方向增加,铁磁材料开始被反方向磁化,磁化过程沿图示 $\widehat{cd_1}$ 曲线进行。当反方向磁场强度达负的最大值(即 $-H_m$)时,磁通密度达到图中 d_1 点(即 $-B_m$)。以后,磁场强度又从($-H_m$)值开始减小,铁磁材料处于反方向去磁,该去磁过程沿图示 $\widehat{d_1e}$ 曲线进行,直到 H 值减至零, B 值仍不为零, e 点并不与坐标原点重合。若 H 又从零开始向正值方向增加,铁磁材料又重复正方向的磁化过程。如此继续正方向的磁化与去磁,和反方向的磁化与去磁,经多次循环以后,形成对称于坐标原点的闭合回线,如图中 $\widehat{a_1bcd_1efa_1}$,称磁滞回线。

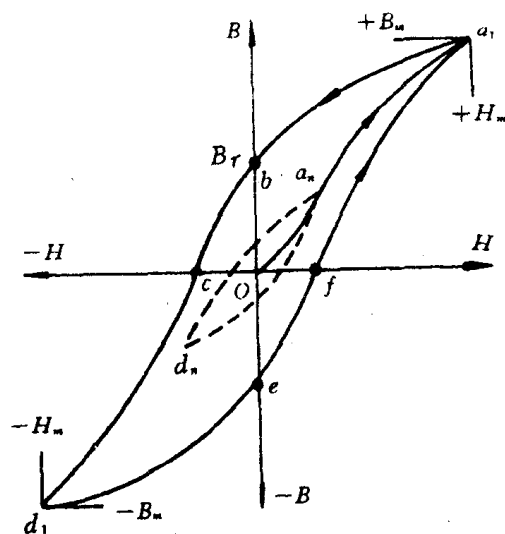


图 0-1 磁滞回线

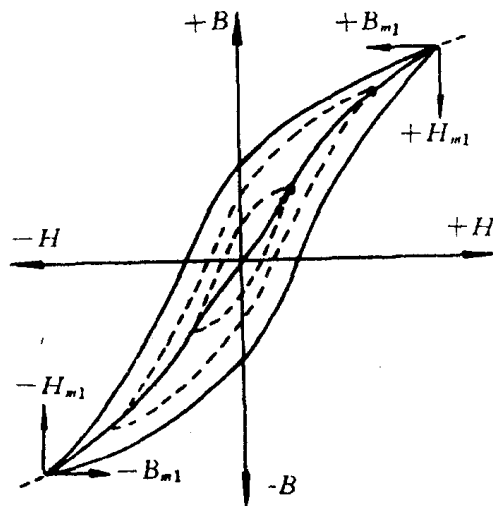


图 0-2 基本磁化曲线

工程实用中,通常就 B 与 H 的函数关系,取不同的 H_m 值,得到若干个对称于坐标原点的磁滞回线,由各回线的顶点确定出不同 H_m 相应的 B_m 值,把这些点联接起来,就是铁磁材料的基本磁化曲线,简称为“ B - H 曲线”,如图 0-2 所示。工程上把铁磁材料的 B - H

曲线作为电机理论分析和设计计算的依据。由于该曲线在坐标的第一、三象限中都是对称的,通常只取第一象限的这一段来表征铁磁材料的磁化特性。

二、铁磁材料具有下述三个共同特性

1. 磁滞性:从图 0-1 可以看出对应同一磁场强度 H 值,在去磁过程中的磁通密度 B ,比磁化过程中的磁通密度 B 要大一些。如果要达到同一 B 值,还需要去磁得再多一点。可见磁通密度 B 的变化滞后磁场强度 H 的变化。铁磁材料所具有的这种特点,叫作“磁滞现象”。在图 0-1 中 ob 段叫“剩余磁通”,简称剩磁 B_r 。使 B 值达零时的 H 值称“矫顽磁力”为图 0-1 中的 oc 段。 B_r 和 H_c 是铁磁材料的两个重要参数。

按磁滞回线形状的不同,铁磁材料又可分为软磁材料和硬磁材料两大类。磁滞回线窄,剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都小的材料称为软磁材料,如铸铁、钢、硅钢片等,软磁材料的导磁率较高,可用以制造电机和变压器铁心。磁滞回线宽, B_r 和 H_c 都大的材料称为硬磁材料,硬磁材料有铁氧体、铝镍钴和稀土三大类,其中稀土永磁材料是近年发展的新材料,其 B_r , H_c 和 $(BH)_m$ 都很大,是一种性能优异的永磁材料。采用稀土永磁材料研制永磁电机是电机学科当前的发展方向之一。

2. 饱和性:图 0-3 曲线 1 为任一铁磁材料的 $B-H$ 曲线,可粗略地分为三段,设最初磁化是从剩磁为零开始,随 H 的增加 B 缓慢上升,如图 oa 段。之后,随 H 的增加 B 值便迅速增加, B 与 H 近似成正比关系变化,如图 ab 段。再以后,随着 H 的增加 B 的增加又缓慢下来,如图 bc 段。过 c 点以后, H 再增加, B 值增加得愈来愈小。与各段相应的导磁系数 $\mu_r = B/H$ 也随 H 的变化而变化。如图 0-3

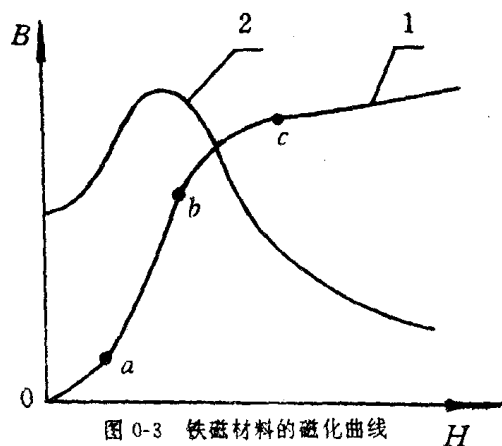


图 0-3 铁磁材料的磁化曲线

1—磁化曲线

2— μ_r 随 H 变化的曲线

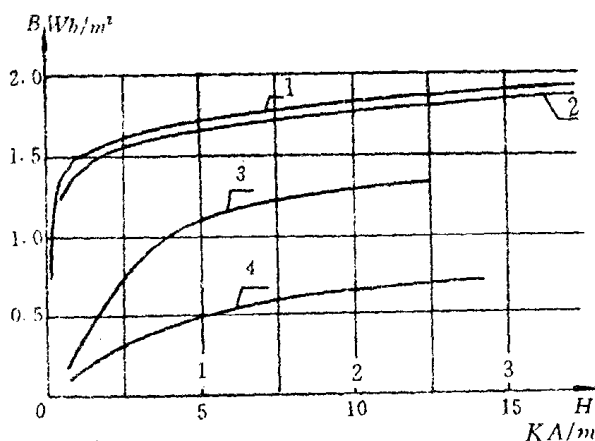


图 0-4 不同材料的 $B-H$ 曲线

1—电机用硅钢片 2—高电阻硅钢片

3—锻钢

4—铸铁

曲线 2 所示在不饱和段内, μ_r 随 H 的增加而增加,在饱和段内, μ_r 则随 H 的增加而减小。磁化曲线呈现上述变化的原因是,在 oa 段由于外磁场较弱,顺着外磁场方向的磁畴刚开始扩大,逆着外磁场方向的磁畴在缩小,因而 B 值增加较缓慢。在 ab 段,外磁场已较强,虽然磁畴的扩大与缩小仍在继续进行,但逆着外磁场方向的磁畴已开始倒转到与外磁场的方向一致了,故 B 随 H 的增加迅速上升。在 bc 段,当外磁场在增强时,由于铁磁材料内部的磁畴几乎全部都转到与外磁场方向一致,即使再增强外磁场,铁磁材料的附加磁场已达到最大值,因而 B 值的增加也很有限,所以出现了磁饱和现象。对于结构和尺寸相同,

但铁磁材料不同的磁路达到磁饱和段所需要的磁场强度 H 值亦不相同。如图 0-4 所示。

3. 高导磁性:

实验表明所有非铁磁材料(如铝、铜等)的导磁率都接近于真空的导磁率 μ_0 , 而对于电机中常用的导磁材料, 其导磁率 $\mu_{Fe} = (2000 \sim 6000) \mu_0$ 。因此在同样大小的励磁电流下, 铁心线圈中的磁通比空心线圈的磁通大得多。

铁磁材料之所以有高的导磁性能, 是因为磁性材料不同于其他物质。在它的内部有许多很小的被称为磁畴(由分子电流产生的)的磁化区。磁化前, 这些磁畴杂乱无章地排列着, 磁场互相抵消, 所以对外界不显示磁性。但在外界磁场的作用下, 这些磁畴沿外界磁场的方向作有规则的排列, 使得磁场不能互相抵消, 从而形成一个附加磁场迭加在外磁场上, 显现出强的导磁性能。非磁性材料没有这种自身存在的磁畴, 即使受外磁场作用, 也不会显示出磁化特性来。

0-3 磁性材料的铁损耗

带铁芯的交流线圈中, 除线圈电阻上的功率损耗(称为铜损耗)外, 处于反复磁化下的铁芯中也要产生功率损耗, 该损耗以发热的方式表现出来, 称为铁磁损耗(简称铁损耗)。铁损耗是由磁滞现象及涡流作用产生的。

一、磁滞损耗

铁磁材料在交流磁场作用下, 正、反方向的交替磁化过程, 材料内部磁畴之间不停地相互摩擦, 引起铁磁材料发热, 消耗功率, 这种按线圈交流电流频率反复磁化而引起的铁损耗, 称为“磁滞损耗”。磁滞回线面积愈大, B_m 值亦愈大, 磁滞损耗愈大。通入线圈交流励磁电流的频率愈高、损耗亦愈大。

经理论分析和试验证明, 磁滞损耗可用下式表示:

$$P_h = C_R f B_m^n V \quad (0-1)$$

式中 C_R 取决于材料性质的磁滞损耗系数,

n ——对一般电工钢片取 $n=1.6 \sim 2.3$

V ——铁磁材料的体积

由于硅钢片磁滞回线面积较小, 故电机和变压器常用硅钢片迭成。

二、涡流损耗

由于铁磁材料又是导体, 在交变的磁场作用下, 变化的磁通在铁心中将感应电势并产生电流, 这些电流在铁心内部环绕磁通呈旋涡状流动, 故称为“涡流”。如图 0-5 所示。涡流在铁芯中引起损耗($i^2 r_c$), 使铁心发热。

为了减小涡流损失, 交变磁路的铁心都是用电工钢片迭成, 并在片间涂上绝缘限制涡流只在较小截面内流通以形成较大电阻。不言而喻, 频率越高磁通密度越大, 感应电动势就愈大, 涡流损耗亦越大; 铁磁材料的电阻率越大, 涡流所经过的路径越长, 涡流损耗就愈小。对于由硅钢片迭成的铁心, 理论分析和试验表明, 涡流损耗 P_e 为:

$$p_e = \frac{1}{6} \gamma \pi^2 \Delta^2 f^2 B_m^2 V \quad (0-2)$$

式中 γ ——磁性材料的导电系数；

V ——磁性材料的体积；

Δ ——钢片厚度。

由式 0-2 可见, 涡流损耗与磁性材料的导电系数 γ 成正比。在电工钢中由于渗入了硅, 其导电系数大大减小。

涡流损耗还与钢片厚度 Δ 的平方成正比。因此将硅钢片压得很薄, 减低涡流损耗是极有效的办法。

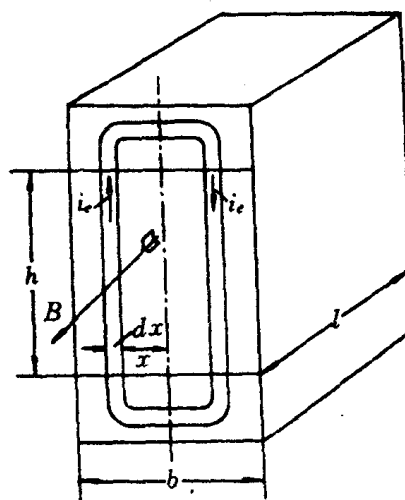


图 0-5 涡流损耗

b ——铁芯厚度 l ——铁芯宽度
 h ——涡流路径平均高度
 i_e ——涡流电流, B ——磁感应强度

三、铁心损耗

铁心中磁滞和涡流损耗之和, 称为铁心损耗, 用 p_{Fe} 表示;

当磁性材料, 体积, 厚度均为一定时。

铁损耗 p_{Fe} 为:

$$p_{Fe} = p_h + p_e = (C_h f B_m^2 + C_e f^2 B_m^2) V \quad (0-3)$$

对于一般电工钢片, 在正常工作磁通密度范围内 ($1T < B_m < 1.8T$), 式 (0-3) 可近似写成

$$p_{Fe} \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G \quad (0-4)$$

式中 C_{Fe} 为铁心损耗系数; G 为铁心重量。上式表明, 总的铁心损耗与频率的 1.3 次方、磁通密度的平方和铁心重量成正比。

0-4 磁 路

电机和变压器都是利用磁场作为介质来实现能量变换的装置。除某些特殊电机的磁场是用永久磁铁产生的以外, 在大多数情况下, 磁场都是用电流来产生, 而且利用具有良好导磁性能的材料, 把磁场集中在一定范围内, 形成磁路。由于磁通的变化要引起电势的变化, 因此在学习电机之前, 除应对铁磁材料的基本性质有所了解外, 还应掌握磁路和电磁感应等基本定律。

磁路问题是局限于一定路径内的磁场问题, 因此对电机的专门研究, 应该运用电机电磁场理论来分析。在工程运用上为了分析问题简便, 把本是场的问题等效为路的问题来研究, 这是允许的, 因此一般而言, 磁场的各个基本物理量也适用于磁路, 至于场和路二者的差别: 如饱和、介质温度等影响将在遇到具体问题时加以说明。

图 0-6(a) 和 (b) 为两种常见的磁路。

由于铁心导磁性能比空气好得多, 因此, 磁通绝大部分是在铁心内通过, 称为主磁通, 相应路径称为主磁路, 少量经过部份铁心和空气而闭合的磁通, 称为漏磁通, 相应的路径称为漏磁路。

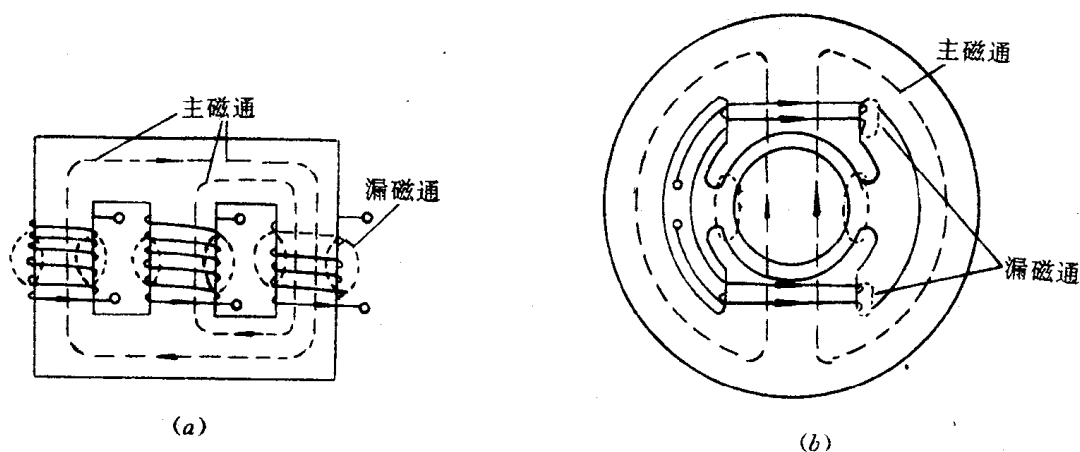


图 0-6 两种常见磁路

(a) 变压器磁路

(b) 二极直流电机磁路

用来产生磁通的电流叫励磁电流(激磁电流)。由励磁电流的性质不同又分为直流磁路和交流磁路,图 0-6(a)为交流磁路,(b)为直流磁路。

0-5 磁路的基本定律

磁路的分析和计算如同电路的分析和计算一样,可以通过一些基本定律来进行。在电机研究中,以下几条定律是常要用到的。

一、安培环路定律

安培环路定律(又称全电流定律)告诉我们:在磁路中,沿任一闭合路径,磁场强度矢量的线积分,等于与该闭合路径交链的电流的代数和。用公式表示,即

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I \quad (0-5)$$

当电流的方向与闭合路径的积分方向符合右螺旋定则时,式(0-5)中电流 I 的前面取(+)号,反之取(-)号。将此定律应用于图 0-7 所示磁路中,取中心线即平均长度的磁力线回路为积分回路,由于中心线上各点的磁场强度矢量的大小相同,其方向又与 $d\vec{l}$ 的方向一致,故

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint H dl = H \oint dl = Hl \quad (0-6)$$

电流的代数和 $\sum I$ 则等于线圈的匝数 w 与电流 I 的乘积,因此

$$Hl = wI \quad (0-7)$$

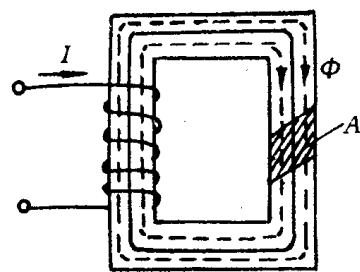


图 0-7 无分支磁路

二、磁路的欧姆定律

由于磁场强度等于磁通密度除以导磁率即 $H = \frac{B}{\mu}$, 且在均匀磁场中 $B = \frac{\phi}{A}$ 故式(0-6)可以写成:

$$Hl = \frac{B}{\mu}l = \frac{\phi}{\mu A}l = \phi \frac{l}{\mu A} = \phi R_m \quad (0-8)$$

或

$$F = wI = Hl = \phi R_m = \frac{\phi}{\Lambda} \quad (0-9)$$

式中 F ——磁路的磁动势,它是造成磁路中有磁通的根源,简称磁势。

单位为安匝,或(A);

$R_m = \frac{l}{\mu A}$ ——磁路的磁阻

$\Lambda = \frac{1}{R_m}$ ——磁路的磁导

式(0-9)称磁路的欧姆定律,它表明,作用在磁路上的总磁动势 F 等于磁路内的磁通量 ϕ 与磁路磁阻 R_m 的乘积。

三、磁路的克希荷夫第一定律

如果铁心不是一个简单的回路,而是带有并联分支的分支磁路,从而形成磁路的节点,则当忽略漏磁通时,在磁路任何一个节点处,磁通的代数和恒等于零,即:

$$\sum \phi = 0 \quad (0-10)$$

式(0-10)与电路第一定律 $\sum i = 0$ 形式上相似,因此称为磁路的克希荷夫第一定律,就是磁通连续性定律。若令流入节点的磁通定为(+),则流出该节点的磁通定为(-)。如图(0-8)节点 N 处有:

$$\phi_1 - \phi_2 - \phi_3 = 0$$

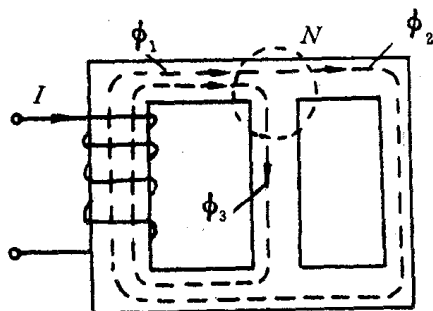


图 0-8 分支磁路

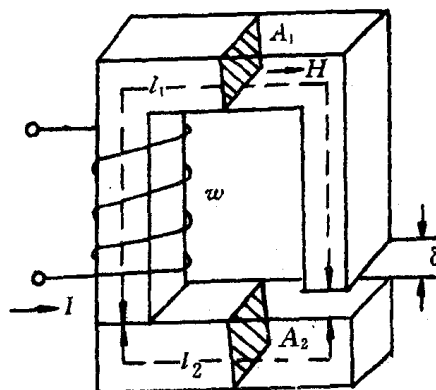


图 0-9 不同磁阻磁路

四、磁路的克希荷夫第二定律

工程上遇到的磁路并不都是用同一种铁磁物质构成的,而且还可能含有气隙,各处的截面积也不相同,如图 0-9 所示的三段磁路,分别由磁导率为 μ_1, μ_2 的导磁材料和气隙组成,对这种无分支磁路,应用全电流定律可得

$$\omega I = \sum_{n=1}^3 H_n l_n = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_g \delta \quad (0-11)$$

或

$$\sum \omega I = \sum H l \quad (0-12)$$

式(0-12)表明:在磁场的任何一个闭合回路中,磁压降的代数和等于磁动势的代数和,磁场的方向与回路环行方向一致时, Hl 前取(+)号,否则取(-)号;电流的方向与回路环行方向符合右手螺旋定则时, ωI 前取(+)号,否则取(-)号。从与电路定律 $\sum E = \sum I R$ 形式上相似的观点,公式(0-12)称为磁路的克希夫第二定律。

表 0-1 磁路与电路形式上的相似关系

一、物理量					
磁 路			电 路		
名 称	常用符号	通用单位	名 称	常用符号	通用单位
磁 动 势	F	安匝(A)	电 动 势	E	伏(V)
磁 通 量	ϕ	韦伯(Wb)	电 流	I	安(A)
磁感应强度	$B(=\frac{\phi}{S})$	韦/平方米(Wb/m ²)	电流密度	$J(=\frac{I}{\Delta})$	安/平方厘米(A/mm ²)
磁 阻	$R_m(=\frac{l}{\mu A})$	1/亨(H ⁻¹)	电 阻	$R(=\frac{l}{\gamma S})$	欧(Ω)
磁 导	$\Lambda(=\frac{1}{R_m})$	亨(H)	电 导	$G(=\frac{1}{R})$	乏(var)
二、基本定律					
磁 路			电 路		
1. 欧姆定律		$F = \phi R_m$	$E = IR$		
2. 克希荷夫第一定律		$\sum \phi = 0$	$\sum i = 0$		
3. 克希荷夫第二定律		$\sum \omega I = \sum H l$	$\sum E = \sum IR = \sum U$		

应当指出虽然磁路定律在形式上与电路定律有许多相似处,但它们的物理本质是有区别的:(1)在电路中,电动势的方向与电流方向一致(或相反)。在磁路中,产生磁动势的电流与磁动势的正方向之间符合右手螺旋关系。(2)电路中电流要引起 $I^2 R$ 的功率损耗,而磁路中只有当磁通交变时才引起铁耗。(3)电路中导体的电阻率 ρ 在一定温度下是常数,而磁路中铁心的磁导率 μ_F 随饱和程度的增加而降低。(4)在线性电路中,计算时可以应用迭加原理,在磁路中,只有在不考虑饱和效应时才能应用迭加原理,而随着磁密的增高,具有铁心的磁路必然越来越饱和。

表 0-1 列出磁路与电路形式上的相似关系。

例 0-1 有一闭合铁心,截面积 $A = 3 \times 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$,磁路的平均长度 $l = 0.3 \text{ m}$,铁心的磁导率 $\mu_F = 5000 \mu_0$ 。励磁绕组有 500 匝。试求在铁心中产生 1 Wb/m^2 的磁通密度时所需

的励磁磁势和励磁电流。

解 本题可用磁路的欧姆定律或安培环路定律求解。

(1) 用磁路的欧姆定律

$$\text{磁通量 } \phi = BA = 1 \times 9 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\text{磁阻 } R_m = \frac{1}{\mu_{Fe} A} = \frac{0.8}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 9 \times 10^{-4}} = 5.3 \times 10^4 \text{ A/Wb}$$

$$\text{磁势 } F = \phi R_m = 9 \times 10^{-4} \times 5.3 \times 10^4 = 47.7 \text{ A}$$

$$\text{励磁电流 } i = \frac{F}{w} = \frac{47.7}{500} = 9.54 \times 10^{-2} \text{ A}$$

(2) 用安培环路定律

$$\text{磁场强度 } H = \frac{B}{\mu_{Fe}} = \frac{1}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 159 \text{ A/m}$$

$$\text{磁势 } F = Hl = 159 \times 0.3 = 47.7 \text{ A}$$

$$\text{励磁电流 } i = \frac{F}{w} = \frac{47.7}{500} = 9.5 \times 10^{-2} \text{ A}$$

例 0-2 若在例 0-1 的磁路中, 开一个长度 $\delta = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 的气隙, 问铁心中激励 1 Wb/m^2 的磁通密度时, 所需的励磁磁势为多少? 考虑到气隙磁场的边缘效应, 在计算气隙的有效面积时, 通常在长、宽方面各增加一个长度 δ' ($\delta' \approx 1\% \delta$) 值。

解 该题可用磁路欧姆定律, 也可用磁路克希荷夫第二定律求解。

(1) 用磁路欧姆定律 $F = \phi \Sigma R_m$

$$\text{磁通量 } \phi = BA = 1 \times 9 \times 10^{-4} = 9 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\begin{aligned} \text{铁心磁阻 } R_{mFe} &= \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe} A} = \frac{(3000 - 5) \times 10^{-4}}{5 \times 10^3 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 9 \times 10^{-4}} \\ &= 5.29 \times 10^4 \text{ A/Wb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{气隙磁阻 } R_{m\delta} &= \frac{5 \times 10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7} (3 + 0.05)(3 + 0.05) \times 10^{-4}} \\ &= 42.77 \times 10^4 \text{ A/Wb} \end{aligned}$$

$$\text{总磁阻 } \Sigma R_m = R_{mFe} + R_{m\delta} = 48.06 \times 10^4 \text{ A/Wb}$$

$$\text{励磁磁动势 } F = \phi \Sigma R_m = 9 \times 10^{-4} \times 48.06 \times 10^4 = 432.6 \text{ A}$$

(2) 用磁路克希荷夫第二定律 $F = \Sigma H_i l_i$

$$\text{铁心磁场强度 } H_{Fe} = \frac{B_{Fe}}{\mu_{Fe}} = \frac{1}{5 \times 10^3 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 159 \text{ A/m}$$

$$\text{气隙磁场强度 } H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{1 \times \frac{9}{3.05^2}}{4\pi \times 10^{-7}} = 77 \times 10^4 \text{ A/m}$$

$$\text{铁心磁压降 } H_{Fe} l_{Fe} = 159 \times 0.2995 = 57.6 \text{ A}$$

$$\text{气隙磁压降 } H_{\delta} l_{\delta} = 77 \times 10^4 \times 5 \times 10^{-4} = 375 \text{ A}$$

$$\text{励磁磁动势 } F = H_{Fe} l_{Fe} + H_{\delta} l_{\delta} = 432.6 \text{ A}$$

由此可见, 气隙虽然很短, 仅 $5 \times 10^{-4} \text{ m}$, 但其磁阻及磁压降却占整个磁路的 89%。另外, 由于磁路是非线性的, μ_{Fe} 常常无法事先给定, 所以虽然原则上两种解法都是可行的, 但是实际计算时都用后一种解法。