

普通高等教育“九五”国家级重点教材

高等学校教材

电机学

东南大学 胡虔生 胡敏强 杜炎森 合编

中国电力出版社

PU TONG GAO DENG JIAO YU

"JIU WU "GUO JIA JI ZHONG DIAN JIAO CAI

普通高等教育“九五”国家级重点教材

高等学校教材

电 机 学

东南大学 胡虔生 胡敏强 杜炎森 合编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书为普通高等教育“九五”国家级重点教材。在总结长期教学和教材建设经验基础上,本着“保持特色、突出重点、不断更新”的精神,贯彻“少而精”原则,以适应 21 世纪教学改革的需要。

本书主要阐述变压器、异步电机、同步电机和直流电机的工作原理和运行特性,以及各类电机的共同性问题;突出电气工程类专业本科教学应掌握的基本概念、基本理论和分析方法,提高解决电机实际问题的能力;针对重点内容附有例题、思考题和习题,以及相关的实验。

本书是高等学校电气工程类专业电机学课程的教材,也可供其他相关专业学生以及有关从事电机运行和制造的工程技术人员学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/胡虔生,胡敏强,杜炎森编 北京:中国电力出版社,2001

普通高等学校电气工程类教学指导委员会推荐使用教材
ISBN 7-5083-0681-3

I. 电… II. ① 胡…② 胡…③ 杜… III. 电机学-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 039383 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2001 年 11 月第一版 2001 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.5 印张 507 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书是电气工程类专业的一门主要技术基础课程教材,内容涉及本学科一些最基本的理论和分析方法。东南大学(原南京工学院)历来重视电机学教材建设,本书在总结东南大学长期教学和教材建设经验的基础上,参考本校吴大榕教授、周鹗教授、徐德淦教授、濮开贵教授等编著和修订的电机学教材,本着“保持特色、突出重点、不断更新”的精神,参照全国电力工程类专业教学指导委员会的电机学教学大纲,对教学内容和表述方法进行梳理和更新,使教材适应 21 世纪教学改革的需要。

本书是普通高等教育“九五”国家级重点教材,其编写思路和特点为:

(1) 本书以变压器、异步电机、同步电机和直流电机四种典型通用电机为研究对象,着重讲解其工作原理和稳态运行特性,以及各类电机的共同性问题。突出本专业本科教学应掌握的基本概念、基本理论和基本分析方法。提高学生解决工程实际问题的能力。

(2) 本书编写突出重点内容,减少章节和层次,较大幅度压缩篇幅。针对各校教学改革后电机学教学时数有较多的削减(课内时间 100 学时左右),精简的主要方面有:各类电机的结构和交流、直流绕组的构成;特种电机;直流电机部分的换向等其他次要内容,以及同步电机中一些专题性的内容。使用中根据具体情况还可对本书中的一些内容加以选择。此外,对例题、思考题和习题也进行了精选和调整。

(3) 谐波问题、不对称问题和暂态过程是电机学本科教材中不可缺少的基本内容,也是初学者的几个难点问题,对其要求应适度。谐波问题和不对称问题着重介绍基本概念和分析手段,以及对电机运行的影响,为今后的工作打下一定的基础;暂态过程仅介绍其物理概念,有助于后续课程的学习。

(4) 本书对当前科学技术和生产发展中的一些热点问题给予关注。如交流调速;变压器、异步电动机的经济运行;同步发电机的各种运行方式等。

本书由东南大学胡虔生、胡敏强、杜炎森三位教授共同编写。具体分工:杜炎森编写绪论和变压器篇;胡敏强编写同步电机篇;胡虔生编写交流电机的共同问题篇、异步电机篇和直流电机篇,并负责联系工作。全书由天津大学刘承瑜教授担任主审,刘承瑜教授对本书初稿作了仔细审阅,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

本书的编写大纲得到了全国电力工程类专业教学指导委员会电机组老师们的大力帮助和支持,编写过程得到了东南大学电机学科老师和研究生的大力支持,在此一并表示谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错漏之处,真诚希望使用本教材的师生和广大读者的批评指正。

编 者

2001 年元月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 电机的电磁基本理论	2
第三节 电机的制造材料	13
小 结	15
思考题	16
习 题	16

第一篇 变 压 器

第二章 变压器的基本作用原理与理论分析	18
第一节 电力变压器的基本结构和额定值	18
第二节 变压器空载运行	22
第三节 变压器负载运行	28
第四节 标么值	33
第五节 参数测定方法	34
第六节 变压器的运行性能	39
小 结	41
思考题	42
习 题	43
第三章 三相变压器及运行	46
第一节 三相变压器的磁路	46
第二节 三相变压器的连接组	47
第三节 三相变压器绕组连接法及其磁路系统对电动势波形的影响	49
第四节 变压器的并联运行	51
小 结	54
思考题	55
习 题	55
第四章 三相变压器的不对称运行及瞬变过程	57
第一节 对称分量法	57
第二节 三相变压器的各序阻抗及其等效电路	59
第三节 三相变压器 Yyn 连接单相运行	62
第四节 变压器次级侧突然短路时的瞬态过程	64

第五节 变压器空载合闸时的瞬态过程	67
小 结	70
思考题	70
习 题	71
第五章 电力系统中的特种变压器	72
第一节 三绕组变压器	72
第二节 自耦变压器	78
第三节 电压互感器和电流互感器	82
小 结	84
思考题	84
习 题	85

第二篇 交流电机的共同问题

第六章 交流电机绕组及其感应电动势	87
第一节 旋转电机的基本作用原理	87
第二节 交流绕组	89
第三节 绕组的感应电动势	96
第四节 谐波电动势及其削弱方法	101
小 结	104
思考题	105
习 题	105
第七章 交流绕组的磁动势	110
第一节 概述	110
第二节 单相绕组的磁动势	110
第三节 对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势	115
第四节 不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势	119
第五节 三相绕组磁动势的空间谐波分量和时间谐波分量	120
小 结	123
思考题	124
习 题	124
第八章 电机的发热和冷却	128
第一节 电机的额定容量	128
第二节 电机的发热	128
第三节 电机的散热	131
小 结	133
思考题	134

第三篇 异 步 电 机

第九章 异步电机的理论分析与工作特性	135
---------------------------------	------------

第一节	异步电机的基本结构	135
第二节	异步电机的基本原理	139
第三节	三相异步电机的等效电路	142
第四节	异步电机的参数	147
第五节	异步电动机的功率平衡式和转矩平衡式	151
第六节	异步电动机的机械特性	155
第七节	异步电动机的工作特性	161
小 结	.....	163
思考题	.....	164
习 题	.....	164
第十章	三相异步电动机的起动和调速	168
第一节	起动电流和起动转矩	168
第二节	谐波转矩及其对起动的影响	169
第三节	笼型异步电动机的起动	174
第四节	笼型异步电动机的调速	181
第五节	绕线转子异步电动机的起动和调速	185
小 结	.....	188
思考题	.....	189
习 题	.....	189
第十一章	单相异步电动机及异步电机的其他运行方式	191
第一节	三相异步电动机在不对称电压下运行	191
第二节	单相异步电动机	194
第三节	异步发电机	200
第四节	异步电机的制动运行	201
小 结	.....	203
思考题	.....	204
习 题	.....	204

第四篇 同 步 电 机

第十二章	同步电机的基本理论和运行特性	208
第一节	同步电机的结构	208
第二节	同步电机的励磁系统	213
第三节	同步电机的空载运行	215
第四节	对称负载时的电枢反应	218
第五节	隐极同步发电机的分析方法	224
第六节	凸极同步发电机的分析方法	228
第七节	电枢绕组的漏抗	232
第八节	同步发电机的空载、短路和负载特性	233
第九节	同步发电机的参数及测定	237

第十节	同步发电机的稳态运行特性	241
小 结	.....	247
思考题	.....	248
习 题	.....	249
第十三章	同步发电机在大电网上运行	252
第一节	同步发电机的并联运行	252
第二节	隐极同步发电机的功角特性	254
第三节	凸极式同步电机的功角特性	258
第四节	同步发电机的有功功率调节	261
第五节	无功功率的调节和 V 形曲线	264
第六节	同步电动机与同步补偿机	267
小 结	.....	271
思考题	.....	272
习 题	.....	273
第十四章	同步发电机的不对称运行	275
第一节	同步电机各序阻抗与等效电路	275
第二节	同步发电机的单相稳定短路	279
第三节	同步发电机的两相稳定短路	281
小 结	.....	285
思考题	.....	285
习 题	.....	285
第十五章	同步发电机的突然短路与振荡	286
第一节	同步发电机突然短路的物理过程	286
第二节	同步电机的瞬态电抗和超瞬态电抗	288
第三节	三相突然短路电流	292
第四节	同步电机振荡的物理概念	296
小 结	.....	298
思考题	.....	299
习 题	.....	299

第五篇 直 流 电 机

第十六章	直流电机的基本原理和电磁关系	301
第一节	直流电机的基本结构	301
第二节	直流电机绕组	304
第三节	直流电机的磁场和电枢反应	309
第四节	电枢绕组的感应电动势和电压、功率平衡方程式	313
第五节	电枢绕组的电磁转矩和转矩平衡方程式	317
小 结	.....	319
思考题	.....	320

习 题	320
第十七章 直流发电机和直流电动机	324
第一节 自励发电机的电压建起	324
第二节 直流发电机的运行特性	325
第三节 直流电动机的机械特性和工作特性	330
第四节 直流电动机的启动、调速和制动	337
第五节 直流电机的换向	343
小 结	346
思考题	347
习 题	348
参考文献	350

第一章 绪 论

第一节 概 述

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，它适宜于大量生产、集中管理、远距离传输和自动控制。故电能可在工农业及人类生活中获得广泛的应用。作为与电能生产、输送和应用有关的能量转换装置——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。

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，各种工作母机、轧钢机、压缩机、运输传送、吊车起动、抽水鼓风、粉碎搅拌；在交通运输中，城市电车、铁道列车牵引；在农业中，电力排灌、农产品加工；在日常生活中，各种电器；以及国防、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的深化和更新。

电机的用途广泛，种类很多，按照电机在应用中的职能来分，电机可以分为下列各类。

- (1) 将机械功率转换为电功率——发电机。
- (2) 将电功率转换为机械功率——电动机。
- (3) 将电功率转换为另一种形式的电功率，又可分为：① 输出和输入有不同的电压——变压器；② 输出与输入有不同的波形，如将交流变为直流——变流机；③ 输出与输入有不同的频率——变频器；④ 输出与输入有不同的相位——移相机。
- (4) 不以功率传递为主要职能，而在电气机械系统中起调节、放大和控制作用的各种微型控制电机。

按照所应用的电流种类，电机可以分为直流电机和交流电机。

电机还可以按同步速度来分，同步速度决定于该电机的极数和频率，同步速度的确切意义将在后文说明。电机按速度分类如下。

- (1) 没有固定的同步速度——直流电机。
- (2) 静止设备——变压器。
- (3) 作为电动机运行时，速度永远较同步速度为小；作为发电机运行时，速度永远较同步速度为大——异步电机。
- (4) 速度等于同步速度——同步电机。
- (5) 速度可以在宽广范围内随意调节，可以从同步速度以下调至同步速度以上——交

流换向器电机。

各种控制电机可分别归入以上各类中。

第二节 电机的电磁基本理论

电机是通过电磁感应原理来实现能量变换的机械，因此，电和磁是构成电机的两大要素，缺一不可。电在电机中主要是以路的形式出现，即由电机内的线圈（或绕组）构成电机的电路。有关电机电路的理论知识，在先修课“电路”中已进行了详细的讲授，这里就不再重复了。磁在电机中是以场的形式存在的，一般工程分析计算时，常把磁场简化为磁路来处理，而其准确度也已满足要求。与电路相比，磁路方面的理论知识有必要进行总结和补充。

一、磁场、磁感应强度

运动电荷（电流）的周围空间存在着一种特殊形态的物质，人们称之为磁场。磁场可由位于该空间的载流导体所受到的一种力——洛伦兹力来确定它的存在及了解它的性质。当载流导体元 $d\mathbf{l}$ 与磁力线相垂直时，作用在该导体元上的洛伦兹力 $d\mathbf{F}$ 可表示为

$$d\mathbf{F} = I B d\mathbf{l} \quad (1-1)$$

式中： I 表示载流导体中的电流，A； $d\mathbf{l}$ 是导体微小单元长度，m； $d\mathbf{F}$ 为该微小导体单元上受到的电磁力，N；而 B 是我们定义来说明导体单元 $d\mathbf{l}$ 所在空间的磁场性质的一个基本物理量，称为磁感应强度，它是一个矢量，T。

二、磁感应线、磁通量

在给定的磁场中某一点的磁感应强度 B 的大小和方向都是确定的。若设想用假想存在的曲线来表示磁场的分布，则应规定曲线上的每一点的切线方向就是该点的磁感应强度 B 的方向。这样的曲线叫做磁感应线或磁力线、 B 线，磁感应线具有以下特征。

- (1) 磁感应线的回转方向和电流方向之间的关系遵守右手螺旋法则。
- (2) 磁场中的磁感应线不会相交，因为磁场中每点的磁感应强度的方向是确定的、唯一的。
- (3) 载流导线周围的磁感应线都是围绕电流的闭合曲线，没有起点，也没有终点。

为了使磁感应线不但能表示磁场的方向，而且能描述磁场各处的强弱，人们以磁感应线的疏密程度来表示该处磁感应强度 B 的大小，对磁感应线的密度规定如下：通过磁场

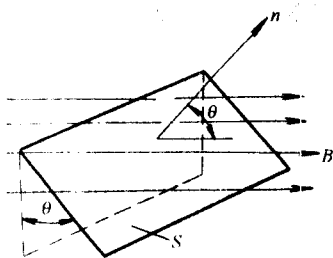


图 1-1 磁通量

中某点处垂直于 B 矢量的单位面积上的磁感应线数目（磁感应线密度）等于该点 B 的数值。因此，磁场强的地方， B 大，磁感应线密；磁场弱的地方， B 小，磁感应线稀。对均匀磁场来说，磁场中的磁感应线相互平行，各处的磁感应线密度相等；对非均匀磁场来说，各条磁感应线相互不平行，各处的磁感应线密度不相等。

通过磁场中某一面积的磁感应线数称为通过该面积的磁通量，简称磁通，用符号 Φ 表示，单位是 Wb。根据上

述磁感应强度，磁感应线和磁通量的定义，由图 1-1 可见，穿过面积 S 的磁通量为

$$\phi = BS \cos \theta \quad (1-2)$$

式中： θ 为面积 S 的法线 n 和 B 之间的夹角。可见当磁感应线与平面正交时通过平面的磁通量为最大；当两者平行时，通过平面的磁通量为零。

通过任意曲面的磁通量为

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S B \cos \theta dS \quad (1-3)$$

式中： dS 为曲面的单元面积，其面积分即为通过该曲面的磁通量。根据矢量标积的定义，上式可写成

$$\Phi = \int_S B dS \quad (1-4)$$

由于磁感应线是闭合的，因此对任意封闭曲面来说，进入该闭合曲面的磁感应线，一定等于穿出该闭合曲面的磁感应线。如规定磁感应线从曲面穿出为正，穿入为负，则通过任意封闭曲面的磁通量总和必等于零，即有

$$\oint_S B \cos \theta dS = 0 \quad (1-5)$$

这个结论叫做磁场的高斯定理，也称为磁通连续性定理，说明磁感应线既无始端，亦无终端，而是连续的。

由式 (1-3) 可见，如果取面积单元 dS 垂直于该点处的磁感应强度 B ，则 $\cos \theta = 1$ ， $d\Phi = B dS$ 或 $B = d\Phi/dS$ ，说明某点的磁感应强度就是该点的磁通密度，所以在工程中常称磁感应强度为磁通密度。于是磁感应强度的单位亦可写成 Wb/m^2 。若某一面积 S 上磁通密度分布均匀，且与该面积相垂直时，有

$$\Phi = BS \quad (1-6)$$

三、磁场强度、磁导率

表征磁场性质的另一个基本物理量是磁场强度，它也是一个矢量，用符号 H 表示，其单位为 A/m 。磁场的两个基本物理量之间存在着下列关系

$$B = \mu H \quad (1-7)$$

式中： μ 称为磁导率，由磁场该点处的介质性质所决定， H/m 。磁导率的数值随介质的性质而异，变化范围很大。真空磁导率 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。在电机中应用的介质，一般按其磁性能分为铁磁物质和非铁磁物质。后者如空气、铜、铝和绝缘材料等，它们的磁导率可认为等于真空磁导率 μ_0 ；前者如铁、镍、钴及其合金，其磁导率远大于真空磁导率数千甚至上万倍。通常以 μ_r 表示铁磁物质的磁导率 μ 比真空磁导率 μ_0 增大的倍数，称为相对磁导率，即

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1-8)$$

众所周知，导体和非导体的电导率之比，其数量级可达 10^6 之巨大。所以一般电流是沿着导体流通，而称非导体为电绝缘体，电主要以路的形式出现。导磁体与非导

磁体或铁磁物质与非铁磁物质的磁导率之比，其数量级仅为 $10^3 \sim 10^5$ 。所以磁感应线（磁力线）不只顺着导磁体，而是向各个方向散播的，即有相当一部分磁力线流经非导磁材料。因此，除超导体外不存在磁绝缘的概念，亦不存在磁绝缘体物质。实际上，磁是以场的形态存在的。

四、安培环路定律（或称全电流定律）

在磁场中，磁场强度矢量 H 沿任一闭合路径的线积分等于穿过该闭合路径的限定面积中流过电流的代数和。其数学表达式为

$$\oint_l H dl = \sum_{k=1}^n I_k = NI \quad (1-9)$$

式中： N 为闭合路径链着的线圈匝数； I 为线圈中的电流。式（1-9）积分回路的绕行方向和产生该磁场的电流方向符合右手螺旋定则。磁场强度沿一条路径 l 的线积分定义为该路径上的磁位差（又称磁压），以符号 U_M 表示，其单位为 A。即有

$$U_M = \int_l H dl \quad (1-10)$$

由于磁场是由电流所激发，故式（1-9）中磁场中回路所匝链的电流称为磁动势，通常以符号 F 表示，其单位和磁压一样均为 A。这样，说明电流和它所产生的磁场之间的关系，就可以定义为：沿着磁场中任一闭合回路，其总磁压等于总磁动势，有

$$\sum U_M = \sum I_k = \sum F \quad (1-11)$$

这与在闭合的电路中，其总的电压降等于总的电动势相似。有时候，我们亦常称某磁路段的磁压为某磁路段所需的磁动势，式（1-11）可理解为闭合磁路各段所需的磁动势由磁动势源（励磁总电流值 $\sum I$ ）来提供。这样，就隐去了磁压这一名称。

五、磁路欧姆定律

在一般工程计算中，电机中的磁场常简化为磁路来处理。磁路的基本组成部分是磁动势源和导磁体。磁动势源可以是带电的线圈，亦可以是永久磁铁。导磁体一般是电工钢片

（硅钢片）、铸钢或合金构成，其作用是提供建立较大的磁通的条件。如前所述，虽然没有什么磁绝缘，可是磁通的绝大部分是循着磁导率大的导磁体内流通的。

图 1-2 (a) 表示出了单相壳式变压器的磁路，中间通以电流的初级绕组为磁动势源，为简单起见设变压器次级绕组开路，所以图中未予画出。由电工钢片叠成的铁芯为导磁体，可以认为磁通完全在导磁体中通过。

由式（1-11）可知，对磁路中任一段磁路，例如，截面积为 S_c 、长为 l_c 的变压器中间芯柱，假设在芯柱截面上磁通密度为均匀分布，则该段磁路的磁通和磁压为

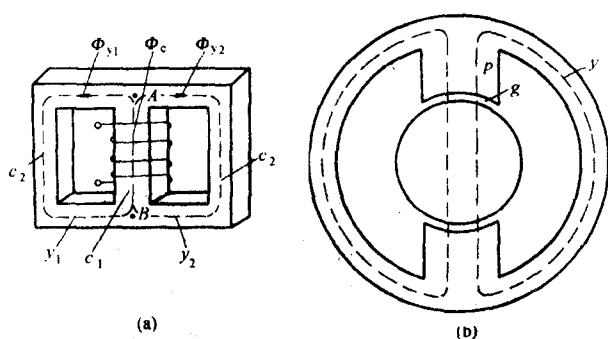


图 1-2 单相壳式变压器与直流电机的磁路

(a) 单相壳式变压器；(b) 直流电机

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{cl} &= B_{cl} S_{cl} \\ U_{Mcl} &= H_{cl} l_{cl} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

与电路中电流和电压降的关系相似，定义

$$R_{mcl} = \frac{U_{cl}}{\Phi_{cl}} \quad (1-13)$$

为该芯柱段的磁阻。式 (1-13) 指出了在一个磁路段上的磁通与磁压间的关系，称为磁路的欧姆定律。

设 μ 为该段磁路导磁体的磁导率，即该段的磁感应强度与磁场强度之间的关系为 $B_{cl} = \mu H_{cl}$ ，则广义来说，式 (1-13) 表示的磁路段的磁阻为

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (1-14)$$

磁阻的表示式与导体电阻表示式相似。同样，称磁阻的倒数为磁导，用符号 Λ 表示。上述磁路段的磁导为

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\Phi}{U} \quad (1-15)$$

或

$$\Lambda = \mu \frac{S}{l} \quad (1-16)$$

磁阻和磁导的单位均可由磁通和磁压的单位导出，在 SI 制中磁导的单位是 H 或 Wb/A，磁阻的单位是 H^{-1} 或 A/Wb。

和电路相似，磁路也可由磁动势、磁阻或磁导和磁通等参数构成一个等效磁路。根据实际磁路作等效磁路时，用与电源相仿的磁动势源符号代替通有电流的励磁线圈。顺着磁通路径用相应的磁阻代替各磁路段。凡磁路段的截面不同或材料不同、通过的磁通量不同时，则需用不同的磁阻来表示。各段的磁通则和电流一样可用箭头表示。图 1-3 表示了图

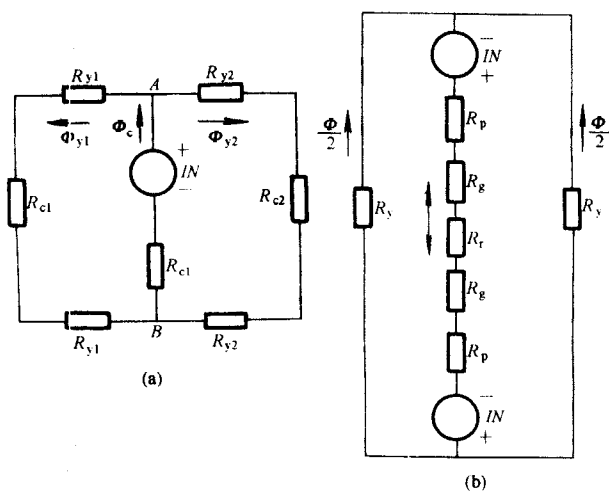


图 1-3 图 1-2 中变压器与直流机的等效磁路

(a) 变压器；(b) 直流机

1-2 中变压器磁路和直流电机磁路的等效磁路。

根据每段磁路的几何尺寸及材料特性,便可按式(1-14)来计算磁路中的各个磁阻值。根据前述磁通的连续性原理,流入磁路节点的磁通的代数和应等于零。如图1-3(a)中的节点A,有

$$\Phi_c - \Phi_{y1} - \Phi_{y2} = 0 \quad (1-17)$$

式(1-17)亦称为磁路的基尔霍夫第一定律。式(1-11)实际上亦就是磁路的基尔霍夫第二定律。这样,就可以像求解电路那样,利用磁路的基尔霍夫定律来求解等效磁路了。

必须指出,磁路虽然形式上与电路相似,但它们之间却存在着本质上的不同,如电流是真实的带电粒子的运动,而磁通仅仅是人们对磁现象的一种描述方法和手段;又如直流电流通过电阻时会引起能量损失,而恒定磁通通过磁阻不会产生任何形式的能量损耗,却表示了有能量存储在该磁阻表示的磁路段中。

六、磁性材料的 $B-H$ 曲线

磁性材料的 B 与 H 间的关系曲线,称为 $B-H$ 曲线。它是磁性材料最基本的特征,它亦称为材料的磁化曲线。

未被磁化的磁性材料放在磁场中,增大磁场强度 H 时,材料中的磁通密度 B 将随之增大,典型的磁化曲线如图1-4所示。

图中区域I为起始段,这时候材料的磁导率较小,称为起始磁导率。继续增大 H ,到达区域II,此时磁导率迅速增大至保持基本不变, $B-H$ 关系便是直线,称为线性区。如果电机的磁性材料工作在这个区域,便可应用线性理论来分析。区域III中材料的磁导率又变得很小,其时 H 增大, B 的变化甚微,该区称为饱和区。由此可见,不但不同的磁性材料有不同的磁导率,同一材料当其磁通密度不同时,亦有不同的磁导率。

如果 H 从某一数值减小,则发现曲线不沿原来的曲线变化。当 H 降到零, B 并不为零。 H 的返回点不同,如图1-5所示,这现象称为磁滞现象。如果磁场强度 H 缓慢地循环变化, $B-H$ 曲线便是一封闭曲线,称为磁滞回线。返回点 H 不同,回线的宽度和高度亦不相同,当 H 和 B 充分饱和后,回线不再增大,此最大的回线称为极限磁滞回线。极限磁滞回线与纵坐标的交点 B_r 称为剩余磁感应强度或剩余磁通密度。回线与横坐标的交点 H_c 称为矫顽磁力。 B_r 与 H_c 是磁性材料的重要参数。根据矫顽磁力 H_c 的大小磁性材料分为软磁材料和硬磁材料。 H_c 小的为软磁材料,它容易被磁化,在较低的外磁场作

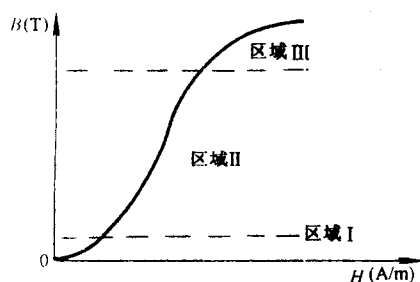


图1-4 典型的磁化曲线

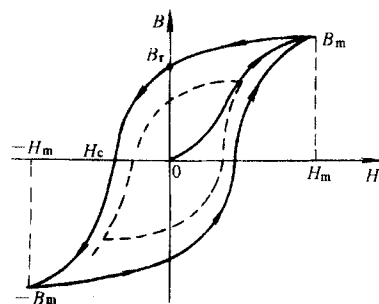


图1-5 磁滞回线

用下就能产生较高的磁通密度，一旦外磁场消失，其磁性亦基本上消失。电机中应用的导磁体，如铸钢、铸铁、电工钢片等均系软磁材料。 H_c 大的为硬磁材料，它不容易磁化，也不容易去磁，当外磁场消失后，它们能保持相当强且稳定的磁性。硬磁材料如铁氧体、铝镍钴及稀土钕铁硼等，可在电机中用做永久磁铁，以便在没有线圈电流产生磁动势的情况下为电机提供一个恒定磁场。近来发展很快的各类永磁电机就采用此类材料。

硬磁材料的性能可由极限磁滞回线在第二象限内的部分——去磁曲线来阐明。永久磁铁所产生的外磁场将由去磁曲线和外磁路的状况而定。

对于电机中应用最广的软磁材料，工程上都采用连接各磁滞回线顶点的曲线来表征该材料的 $B-H$ 曲线关系，这种 $B-H$ 曲线称为基本磁化曲线。各种手册包括本书中所列出的 $B-H$ 曲线均是这种基本磁化曲线。

【例 1-1】 图 1-6 (a) 所示为硅钢片叠成的磁路，图 1-6 (b) 所示为硅钢片的磁化曲线。图中尺寸的单位是 mm，励磁线圈有 1000 匝。试求当铁芯中磁通为 $1 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 时，励磁线圈的电流应是多少。

解 设铁芯的叠片因数（叠片净厚度与总厚度之比）为 0.94，则铁芯的净面积为

$$A_i = 20 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^{-3} \times 0.94 = 0.752 \times 10^{-3} (\text{m}^2)$$

铁芯磁路的平均长度为

$$l_i = 2(100 + 80) - 6 = 354 (\text{mm}) = 0.354 (\text{m})$$

铁芯中的平均磁通密度为

$$B_i = \frac{\Phi}{A_i} = \frac{1 \times 10^{-3}}{0.752 \times 10^{-3}} = 1.33 (\text{T})$$

由图 1-6 (b) 的磁化曲线查得相应的铁芯磁场强度为 560 A/m。铁芯段磁路所需的磁动势为

$$F_i = H_i l_i = 560 \times 0.354 = 198 (\text{A})$$

不计气隙处磁通的扩散现象，则气隙磁通与铁芯中的磁通相同，因此气隙的磁场强度和气

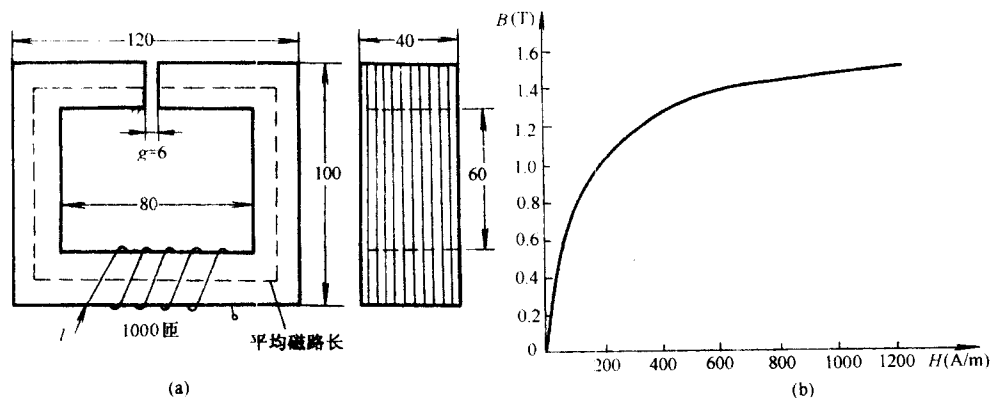


图 1-6 [例 1-1] 的图
(a) 磁路；(b) 磁化曲线

隙段磁路所需的磁动势为

$$B_g = \frac{\Phi}{A_g} = \frac{1 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-3} \times 4.0 \times 10^{-3}} = 1.25(\text{T})$$

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{1.25}{1.257 \times 10^{-6}} = 0.994 \times 10^6 (\text{A/m})$$

$$F_g = H_g l_g = 0.994 \times 10^6 \times 6 \times 10^{-3} = 5964(\text{A})$$

该磁路所需的总磁动势为

$$F_1 = F_i + F_g = 198 + 5964 = 6162(\text{A})$$

励磁线圈所需电流为

$$I = \frac{F_1}{N} = \frac{6162}{1000} = 6.162(\text{A})$$

由该题可见,铁芯段虽然长度较气隙长了近 60 倍,但其所需的磁动势却仅占总磁动势的 3.1%。因此,在估算时往往可以只计算气隙段所需磁动势,亦不会带来太大的误差。

实际上,气隙处磁力线有扩散现象,气隙所需磁动势比上面算的值为小。一般说来,这种磁通扩散现象可以由修正气隙截面的方法来处理。通常将气隙截面的长、宽均用增大一个气隙长度 g 来修正。于是气隙计算截面积为

$$A'_g = (20 + 6) \times 10^{-3} \times (40 + 6) \times 10^{-3} = 1.196 \times 10^{-3}(\text{m}^2)$$

经过修正后可算得 $F'_g = 3990\text{A}$, 线圈励磁电流仅为 4.2A。可见,由于不存在磁绝缘而呈现的磁通扩散现象的影响是相当大的。

七、铁芯损耗

当导磁材料位于交变磁场中被反复磁化,其中 $B-H$ 关系便是磁滞回线。此时导磁材料中将引起能量损耗,称为铁芯损耗。铁芯损耗分为两部分:磁滞损耗和涡流损耗。

磁滞损耗是导磁体反复被磁化,其分子运动所消耗的能量。磁滞回线所包含的面积表示了单位体积导磁材料在磁化一周的进程中所消耗的能量,即

$$p_{\text{hc}} = V \oint H dB \quad (1-18)$$

式中: p_{hc} 为每磁化一周引起的磁滞损耗, V 为导磁体的体积。工程上常用 p_h 表示每秒消耗的磁滞损耗能量,经验公式为

$$p_h = k_h f B_m^n \quad (1-19)$$

式中: k_h 为由导磁体材料决定的磁滞损耗系数; f 为磁场交变频率亦即导磁体被反复磁化的频率; B_m 为磁化过程中的最大磁通密度; 指数 n 亦与材料性质有关,其数值在 1.5 ~ 2.0 之间,作估算时可取 $n = 2.0$ 。

因为铁芯是导磁体亦是导体,交变磁场在铁芯内产生自行闭合的感应电流,即称为涡流,涡流在铁芯中产生焦耳损耗,即所谓涡流损耗。导磁体采用电工钢片叠成铁芯,就是为了增大涡流回路的电阻以减小涡流损耗。如不计饱和影响,由正弦波电流所激励的交