



普通高等教育“十五”国家级规划教材

电机学

胡虔生 胡敏强 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十五”国家级规划教材

《电力系统分析》
《电力系统分析》
《电机学》
《电力系统继电保护》

夏道止主编
陈怡等编著
胡虔生等编著
张保会等主编



普通高等教育“十五”规划教材

《数字电子技术基础》
《模拟电子技术基础》
《信号与系统分析》
《电磁场导论》
《自动控制理论（第三版）》
《微型机继电保护基础（第二版）》
《电机学》
《电力系统概论》
《发电厂电气部分（第三版）》

王树昆主编
赵世平主编
宗伟等主编
孟昭敦主编
孙扬声主编
杨奇逊主编
陈世元主编
杨淑英编
熊信银主编（第三版）
范锡普主编（第二版）

《电力系统自动化（第四版）》
《发电厂及变电站的二次回路（第二版）》
《电力系统分析（第二版）》
《电力系统自动化》
《电力系统自动装置原理（第三版）》
《电能质量分析与控制》
《高电压技术（第二版）》
《电力系统远动》
《电网监控与调度自动化》
《PLC应用技术》
《电气控制与PLC应用》
《可编程序控制器原理及应用》
《电能计量技术》
《电力市场》
《电力市场营销管理》
《电力市场运营系统》
《运筹学》

李先彬主编
何永华主编
于永源等编
孙莹等编著
杨冠城主编
肖湘宁主编
周泽存等编
柳永智等编著
张永健主编
弭洪涛编著
范永胜等编
郁汉琪等主编
黄伟主编
杜松怀主编
刘秋华编著
刘继春主编
施泉生编

ISBN 7-5083-3454-X



9 787508 334547 >

定价：35.00 元

TM3
60



普通高等教育“十五”国家级规划教材

电 机 学

编著 胡虔生 胡敏强
主审 刘承榆

RBR44/13

北方工业大学图书馆



00594766



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是普通高等学校“十五”国家级规划教材,是在“九五”国家级重点教材“电机学”基础上编写的。本书仍以变压器、异步电机、同步电机和直流电机为研究对象,使读者掌握电机的基本概念、基本原理和基本分析方法,重点是各类电机的稳态性能分析。结合重点内容书内附有例题、思考题和习题以及相关的实验加以说明。本书内容丰富,重点突出,主次分明,叙述清楚,便于自学。

本书是高等学校电气工程及其自动化专业主干课电机学的教材,也可供其他相关专业本科生、研究生学习以及从事电机运行和制造的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/胡虔生,胡敏强编著. —北京:中国电力出版社,2005

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-5083-3454-X

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 075473 号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005年8月第一版 2005年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 23.25印张 536千字

印数 0001—4000册 定价 35.00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

本书是普通高等学校“十五”国家级规划教材。

本书主要内容为电机原理与运行,是电气工程类专业的基本理论和分析方法。本书在内容的选取、编排和论述方式方面进行改革,以适应教学改革的需要。本书的编写思路和特点为:

(1) 以变压器、异步电机、同步电机和直流电机四类典型通用电机为研究对象,以此叙述它们的工作原理和运行特性,着重于稳态性能的分析。本书内容丰富,叙述详实,采用类比方法,前后呼应,循序渐进,不断加深。通过了解本教材涵盖的内容,增加对电机电磁基本理论的理解,掌握电机分析的方法。

(2) 本书编写突出重点,主次分明,减少章节和层次,压缩篇幅。精简的主要方面有:电机的结构和交流、直流绕组的构成;特种电机;直流电机的换向以及同步电机中的一些专题性内容等。本书中的内容做了精心组织,使用中可以比较方便的根据实际情况挑选合适内容讲解,有的内容可供学生自学或查询。

(3) 电机学本科教材中一些难点问题,如谐波问题、不对称问题和暂态过程等,本书中均有叙述,但是对于初学者要求应该得当,本书着重讲清楚物理概念和基本分析方法,以定性分析为主。

(4) 本书对电机领域的新技术和生产实践中热点问题给予关注,丰富教材内容,如交流和直流调速方法;变压器和异步电动机的经济运行;同步电机的进相运行;磁性材料和永磁电机等。

(5) 本书的例题和习题作了调整和充实,每章有小结起总结和提高的作用,使学生掌握物理概念,提高解题能力,取得好的学习效果。本书编写中还书对重要内容和关键字句加了黑体字,突出要点,还适当增加了插图,简化文字说明。

本书由东南大学胡虔生教授、胡敏强教授合作编写。其中,第一篇和第四篇由胡敏强老师编写;第一章、第二篇、第三篇和第五篇由胡虔生老师编写。由胡虔生老师对全书进行统稿。全书由天津大学刘承榆教授担任主审,刘承榆教授对本书初稿作了仔细审阅,并提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

本书是在总结东南大学长期教学和教材建设经验基础上,参考吴大榕教授、周鹗教授、徐德淦教授、濮开贵教授等编著和修改的电机学教材,吸取了近年来国外和国内教材的长处。编写得到了东南大学和兄弟院校老师的大力支持,成文过程中杜炎森教授给予了很大帮助,余莉博士生、王曼和陈慧硕士生等在文字录入和稿件整理中付出了辛勤劳动,在此一并表示真诚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2005年3月于东南大学



目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 电机的磁路和磁路定律	2
第三节 电机的电磁基本理论	10
第四节 电机的制造材料	14
小结	16
思考题	18
习题	18

第一篇 变 压 器

第二章 变压器的基本作用原理与理论分析	20
第一节 电力变压器的基本结构和额定值	20
第二节 变压器空载运行	23
第三节 变压器负载运行	29
第四节 标么值	34
第五节 参数测定方法	35
第六节 变压器的运行性能	40
小结	42
思考题	43
习题	44
第三章 三相变压器及运行	47
第一节 三相变压器的磁路	47
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	50
第四节 变压器的并联运行	52
小结	55
思考题	56
习题	56
第四章 三相变压器的不对称运行及瞬态过程	58

第一节	对称分量法	58
第二节	三相变压器的各序阻抗及其等效电路	60
第三节	三相变压器 Y_{yn} 连接单相运行	63
第四节	变压器二次侧突然短路时的瞬态过程	66
第五节	变压器空载合闸时的瞬态过程	69
小结	.....	71
思考题	.....	72
习题	.....	72
第五章	电力系统中的特种变压器	74
第一节	三绕组变压器	74
第二节	自耦变压器	80
第三节	互感器	83
小结	.....	86
思考题	.....	86
习题	.....	86

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	89
第一节	旋转电机的基本作用原理	89
第二节	交流绕组	91
第三节	绕组的感应电动势	98
第四节	谐波电动势及其消弱方法	102
小结	.....	105
思考题	.....	106
习题	.....	106
第七章	交流绕组的磁动势	111
第一节	概述	111
第二节	单相绕组的磁动势	111
第三节	对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势	116
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	121
小结	.....	124
思考题	.....	124
习题	.....	125
第八章	电机的发热和冷却	129
第一节	电机的额定容量	129
第二节	电机的发热	129
第三节	电机的散热	132

小结	135
思考题	135

第三篇 异步电机

第九章 异步电机的理论分析与运行特性	136
第一节 异步电机的基本结构	136
第二节 异步电机的运行状态和磁场	140
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	148
第五节 异步电动机的功率平衡式和转矩平衡式	152
第六节 异步电动机的机械特性及稳定运行条件	155
第七节 异步电动机的工作特性	162
小结	164
思考题	165
习题	166
第十章 三相异步电动机的起动和调速	169
第一节 起动电流和起动转矩	169
第二节 谐波转矩及其对起动的影响	170
第三节 笼型异步电动机的起动	175
第四节 笼型异步电动机的调速	182
第五节 绕线转子异步电动机的起动和调速	186
小结	190
思考题	190
习题	191
第十一章 单相异步电动机及异步电机的其他运行方式	193
第一节 三相异步电动机在不对称电压下运行	193
第二节 单相异步电动机	197
第三节 异步发电机	202
第四节 异步电机的制动运行	204
小结	206
思考题	206
习题	207

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	210
第一节 同步电机的结构	210
第二节 同步电机的励磁系统	214

第三节	同步电机的空载运行	217
第四节	对称负载时的电枢反应	220
第五节	隐极同步发电机的分析方法	226
第六节	凸极同步发电机的分析方法	230
第七节	电枢绕组的漏抗	235
第八节	同步发电机的空载、短路和负载特性	235
第九节	同步发电机的参数及测定	240
第十节	同步发电机的稳态运行特性	244
小结	.....	249
思考题	.....	251
习题	.....	251
第十三章	同步发电机在大电网上运行	254
第一节	同步发电机的并联运行	254
第二节	隐极同步发电机的功角特性	256
第三节	凸极同步发电机的功角特性	260
第四节	同步发电机的有功功率调节	263
第五节	无功功率的调节和 V 形曲线	266
第六节	同步电动机与同步补偿机	269
第七节	同步发电机的进相运行	273
小结	.....	278
思考题	.....	279
习题	.....	280
第十四章	同步发电机的不对称运行	282
第一节	同步电机各序阻抗与等效电路	282
第二节	同步发电机的单相稳定短路	286
第三节	同步发电机的两相稳定短路	288
小结	.....	292
思考题	.....	292
习题	.....	293
第十五章	同步电机的突然短路与振荡	294
第一节	同步发电机突然短路的物理过程	294
第二节	同步电机的瞬态电抗和超瞬态电抗	296
第三节	三相突然短路电流	300
第四节	同步电机振荡的物理概念	304
小结	.....	306
思考题	.....	307
习题	.....	307

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	309
-------------	-----------------------------	------------

第一节	直流电机的基本结构	309
第二节	直流电枢绕组	312
第三节	直流电机的磁场和电枢反应	316
第四节	电枢绕组的感应电动势和电压、功率平衡方程式	321
第五节	电枢绕组的电磁转矩和转矩平衡方程式	325
小结	.....	326
思考题	.....	327
习题	.....	328
第十七章	直流发电机和直流电动机	332
第一节	自励发电机的电压建起	332
第二节	直流发电机的运行特性	334
第三节	直流电动机的机械特性和工作特性	339
第四节	直流电动机的起动、调速和制动	345
第五节	直流电机的换向和改善换向的方法	351
小结	.....	355
思考题	.....	356
习题	.....	357
参考文献	.....	361



第一章 绪 论

第一节 概 述

电能是能量的一种形式。与其他形式的能源相比,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_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、压缩机、起重机、水泵、风机;交通运输中的汽车电器、电力机车;农业中的电力排灌、农产品加工;日常生活中的各种电器;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能量转换职能来分,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——变频机;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。

电机还可以按原理和运动方式来分,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。电机可分类如下。

(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,速度较同步速度为小;作为发电机运行时,速度较同步速度为大——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。

本书按原理分类, 主要学习变压器、异步电机、同步电机和直流电机四大类电机。

第二节 电机的磁路和磁路定律

电和磁是构成电机的两大要素, 相互关联, 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。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。本节主要介绍磁路的基本概念和分析方法。

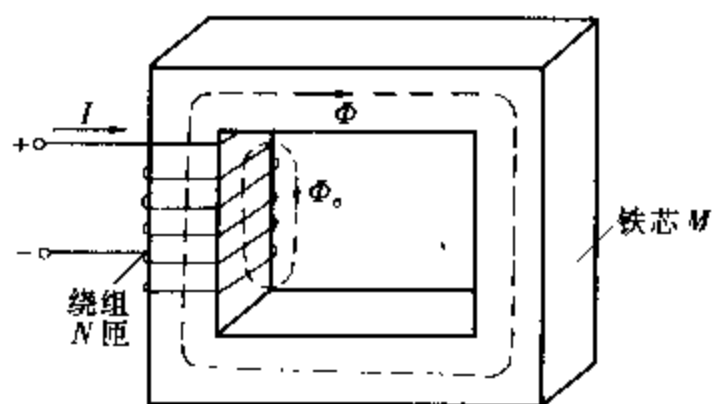


图 1-1 简单铁芯磁路

一、磁场、磁路

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。在电机和变压器里, 常把线圈套装在铁芯上, 当线圈中流过电流, 在线圈周围的空间就会形成磁场, 如图 1-1 所示, 其中铁芯由铁磁材料构成, 导磁性能比空气好得多, 磁通几乎全部在铁芯中流通, 而在空气中只存在少量分散的磁通。所以在一般工程计算中, 电机中的磁场常简化为

磁路来处理。

二、磁感应强度(磁通密度) B 、磁通量 Φ

磁场的大小和方向可用基本物理量磁感应强度来描述, 用符号 B 表示, 单位是 T (特斯拉), 是一个矢量。

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, 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。如图 1-1 所示, 四指指向电流的方向, 则拇指将指向磁场的方向。

(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、惟一的。

(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。在国际单位制中它的单位是 Wb (韦伯),它是一个标量。根据上述磁感应强度,磁感应线和磁通量的定义,由图 1-2 可见,对于均匀磁场,穿过面积 S 的磁通量 Φ 为

$$\Phi = BS \cos \theta \quad (1-1)$$

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

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S B \cos \theta dS \quad (1-2)$$

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,式 (1-2) 可写成

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

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

$$\oint B \cos \theta dS = 0 \quad (1-4)$$

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 (1-2) 可见,如果我们取面积单元 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

$$\Phi = BS \quad (1-5)$$

三、磁场强度 H 、磁导率 μ

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 (安/米)。磁场的两个基本物理量之间存在着下列关系,

$$B = \mu H \quad (1-6)$$

式中: μ 称为磁导率,由磁场该点处的介质性质所决定,单位为 H/m (亨/米)。磁导率的数值随介质的性质而异,变化范围很大。在电机中应用的材料,一般按其导磁性能分为非铁磁材料和铁磁材料。

(1) 非铁磁材料如空气、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 , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H}/\text{m}$ 。

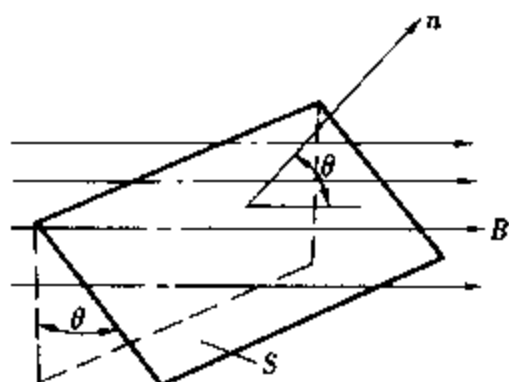


图 1-2 磁通量

(2) 铁磁材料如铁、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

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1-7)$$

众所周知，导体和非导体的电导率之比，其数量级可达 10^{16} 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，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。

此外，铁磁材料的磁导率 μ 不是一个常数， B 与 H 呈非线性关系，而电路中导体的电导率通常是常数，电路大多是线性电路。因此，磁路计算比电路计算复杂。

四、铁磁材料的 $B-H$ 曲线

铁磁材料（也称导磁材料或磁性材料）的磁化，是由于它内部存在很小磁畴，无外磁场时，这些磁畴无序排列，对外不显磁性，若将铁磁材料放在外磁场中，磁畴的轴线将逐渐趋于一致，由此形成一个附加磁场，叠加于外磁场，使合成磁场大大加强，而非铁磁材料无此附加磁场，在同样条件下，所激励的磁场要小的多，导磁率也小，接近于真空导磁率 μ_0 。非铁磁材料的磁通密度 B 和磁场强度 H 之间呈直线关系，其斜率就是 μ 。铁磁材料增大磁

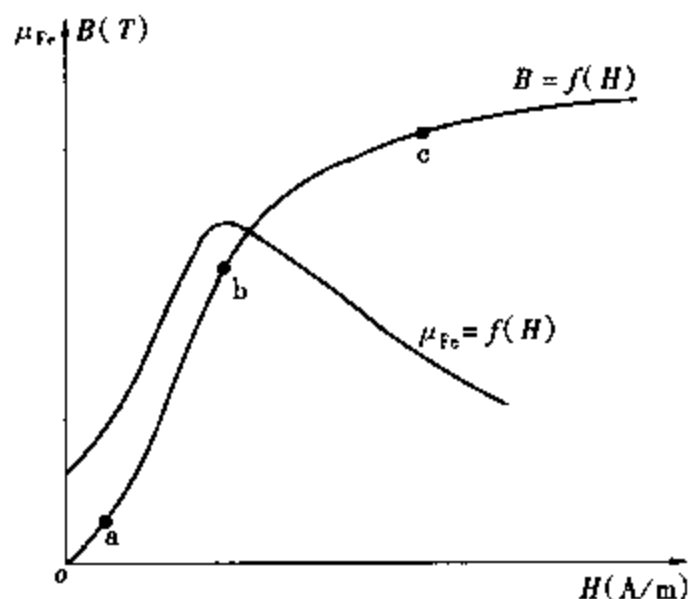


图 1-3 典型的磁化曲线

场强度 H 时，材料中的磁通密度 B 将随之迅速增大，其导磁率很大且不是一个常数， B 与 H 之间的关系曲线称为磁化曲线，也称为 $B-H$ 曲线。它是磁性材料最基本的特征。典型的磁化曲线如图 1-3 所示。

图 1-3 中区域 oa 段为起始段，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 ab 段，此时磁导率迅速增大至保持基本不变， $B-H$ 关系近似为直线，称为线性区。如果电机的磁性材料工作在这个区域，便可近似应用线性理论来分析。区域 bc 段中材料的磁导率又变得很小，其时 H 增大， B 的增长率减慢，

到达 c 点后， B 增加更缓慢， c 点称饱和点，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。如图 1-3 中曲线 $\mu_{Fe} = f(H)$ 。电机设计时，通常把铁芯中磁通密度选在曲线拐弯处，即 b 点附近。

如果将铁磁材料进行周期性磁化，外磁场增加的上升磁化曲线与相应外磁场减少的下降磁化曲线不会重合，如图 1-4 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。表示当外施磁场减小到零 ($H=0$) 时，所剩余的磁通密度 B_r 。要使磁通密度减小至零，必须加上反向磁场，其数值为

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 的大小和磁滞回线的形状，磁性材料分为软磁材料和硬磁材料（也称永磁材料）。

(1) 软磁材料，其 H_c 小，磁滞回线较狭窄，如图 1-4 (a) 所示，而磁导率很大，容易被磁化，在较低的外磁场作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。工程上对这些软磁材料都采用连接各磁滞回线顶点的曲线表征该材料的 $B-H$ 曲线，这种曲线称基本磁化曲线，也就是一般手册和书中软磁材料的磁化曲线。

(2) 硬磁材料，其 H_c 大，磁滞回线宽阔，如图 1-4 (b) 所示，而磁导率较小，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。

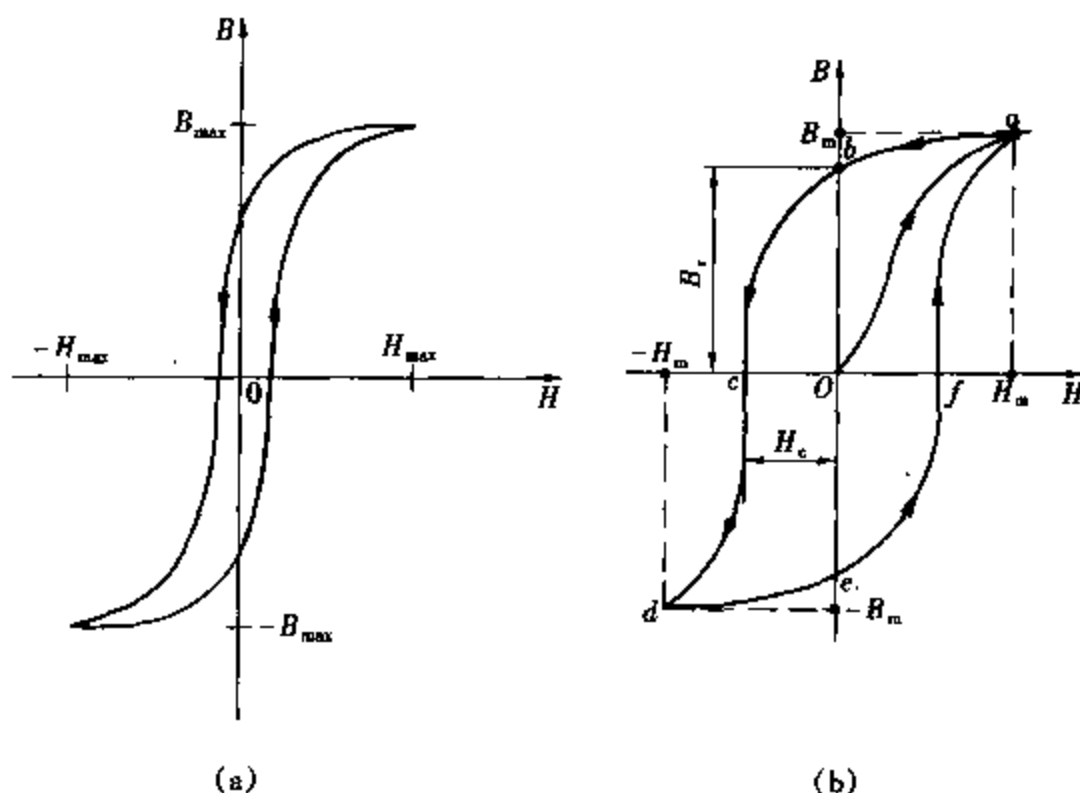


图 1-4 磁滞回线曲线

(a) 软磁材料；(b) 硬磁材料

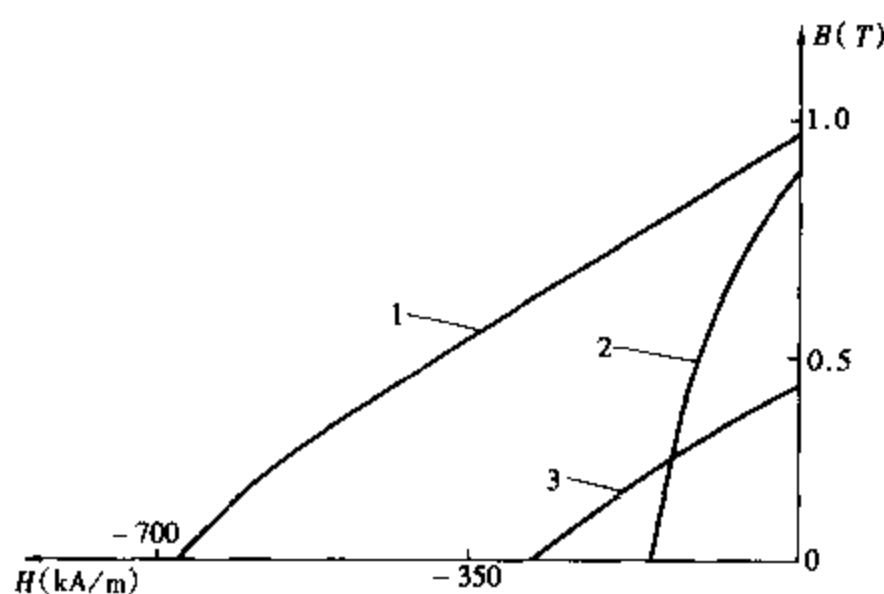


图 1-5 常用永磁材料的磁性能

1—钕铁硼；2—铝镍钴；3—铁氧体

当前，常用的永磁材料有以下三种，从图 1-5 可以看出：①铁氧体，它是铁和其他一种或多种金属元素（如镍、钨等）的复合化合物，此类材料 H_c 较大，而 B_r 不大，温度对磁性能影响较大，因其价格低廉，故在电机中应用较广。②铝镍钴，它是铁和镍、铝和钴的合金， B_r 较大，而 H_c 不大。③稀土永磁材料，这是 20 世纪 60 年代以来发展的新型永磁材料，其中钕铁硼材料比钐钴磁性能更好，该材料综合磁性能好， B_r 、 H_c 和最大磁能积 $(BH)_{max}$ 均大，不足之处是允许

工作温度较低，且价格较高，对于性能要求较高的永磁电机使用较多。通常永磁材料的磁性能主要用 B_r 、 H_c 和 $(BH)_{max}$ 三项指标来表征，一般这些指标越大表示磁性能越好。

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。永磁电机的工作点将由去磁曲线和外磁路的状况而定。

【例 1-1】 图 1-6 (a) 所示磁路由硅钢片叠成, 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。

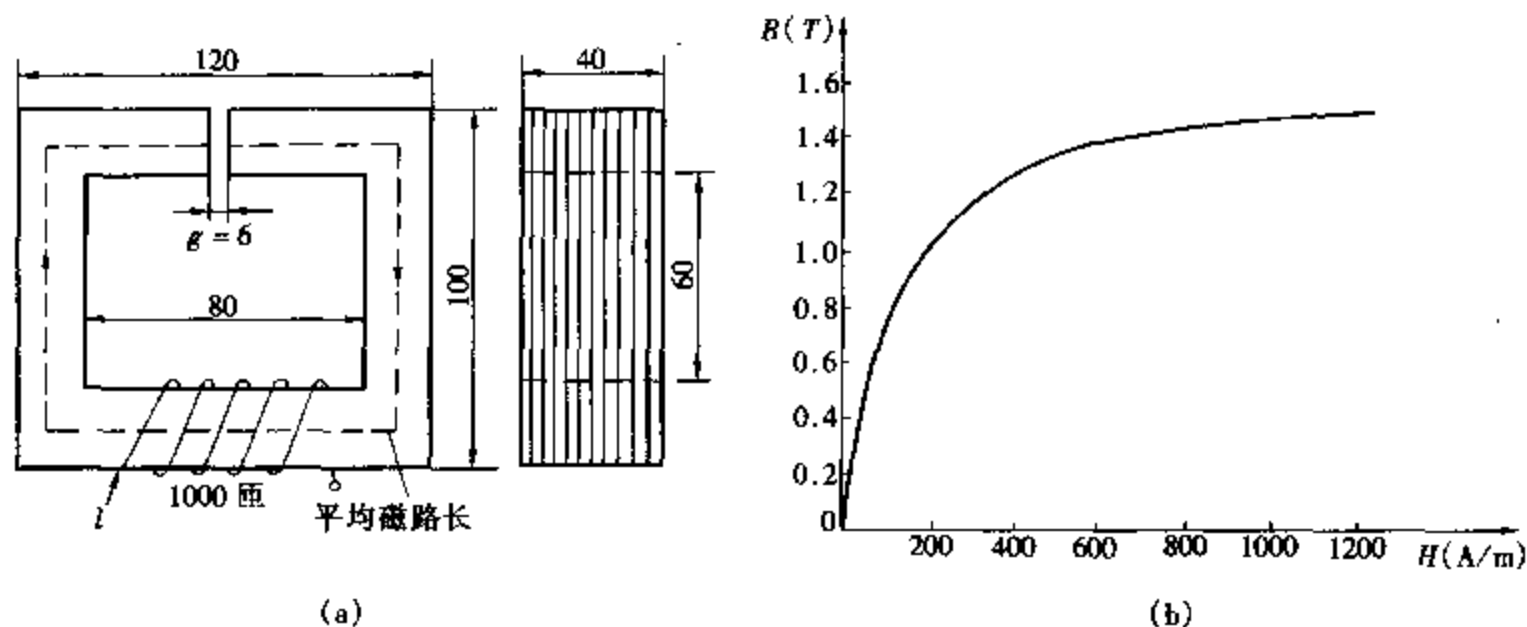


图 1-6 例 1-1 图

(a) 磁路; (b) 磁化曲线

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。

五、铁芯损耗 P_{Fe}

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。

(1) **磁滞损耗**。磁滞损耗是导磁体反复被磁化,其磁畴相互间不停地摩擦,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

$$P_{\text{hc}} = V \oint H dB \quad (1-8)$$

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

$$P_h = k_h V f B_m^n \quad (1-9)$$

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 $1.5 \sim 2.0$ 之间,作估算时可取 $n = 2.0$ 。

(2) **涡流损耗**。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。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,片间有绝缘层,叠片越薄,损耗越低,如图 1-7 所示,这样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变磁场中的铁芯涡流损耗 P_e 的经验公式为

$$P_e = k_e V f^2 \tau^2 B_m^2 \quad (1-10)$$

式中: k_e 为取决于铁芯材料性质的涡流损耗系数; τ 为叠片的厚度,在 50Hz 交变磁场中的叠片厚度一般在 $0.3 \sim 0.5 \text{mm}$ 之间,其余符号的含义同前。

铁芯损耗为磁滞损耗和涡流损耗之和, P_{Fe} 为

$$P_{\text{Fe}} = P_h + P_e = (k_h f B_m^n + k_e f^2 \tau^2 B_m^2) V \quad (1-11)$$

对于一般电工钢片, B_m 在 1.8T 以内,可以近似表示为

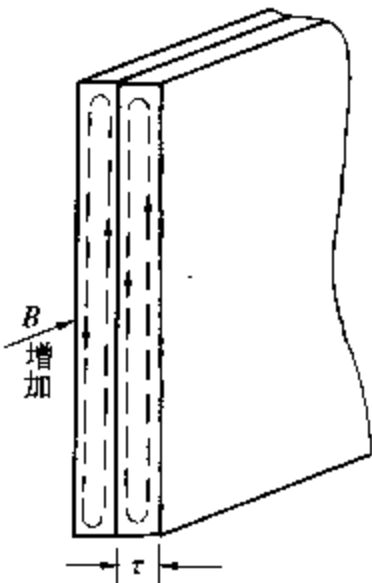


图 1-7 硅钢片中的涡流