



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANJIXUE

电机学

(第二版)

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“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANJIXUE
电机学
(第二版)

编 著 胡虔生 胡敏强
主 审 刘承榆 邱阿瑞



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书是在“九五”、“十五”国家级规划（重点）教材“电机学”基础上编写的。本书以变压器、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说明。本书体系完整，涉及面较宽，主次分明，教学内容灵活，便于教学和自学。

本书可作为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，还可作为从事电机运行和制造的工程技术人员参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

电机学/胡虔生，胡敏强编著. —2版. —北京：中国电力出版社，2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-8499-3

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（2009）第 022880 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>）

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 8 月第一版

2009 年 7 月第二版 2009 年 7 月北京第九次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.75 印张 547 千字

定价 35.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

第三版前言

本书第二版是在第一版的基础上,为了适应我国现代化建设和教学改革的需要,根据电气工程及其自动化专业新的教学大纲的要求,电机学教材内容需要整合和不断更新。为此,我们进行了第二版的修订工作。

第二版电机学教材继承原教材的体系和风格,仍以电机电磁基本理论为基础,突出重点,以稳态运行性能分析为主线,阐述变压器、异步电机、同步电机和直流电机等四类电机的基本原理和分析方法。微特电机涉及面宽,品种多,原理各异,将另设课程。

修订时,增删或改写了部分内容,更改了个别插图,梳理了部分习题和思考题。增加了电机节能内容,在有关章节中强调以下问题:如何提高交直流电机和变压器的效率,仔细分析电机各种损耗,使用新型导磁、导电材料,减少损耗提高效率;如何减少各种运行状态的能量消耗,改善运行环境,建立电机和变压器经济运行的理念,运用合理的运行方式,使用调速,调电压方法达到电机系统节能的效果。

由于各院校普遍压缩本课程学时(约100学时),原有内容偏多,本书将一些内容列为选学,有关章节前标有“*”,可以简单介绍,不作教学基本要求,具有灵活性。教材只是蓝本,提供本课程比较准确而丰富的素材,使读者能开卷受益。教学中各校情况不同,要求不一,供使用者参考选用。

本书的习题与思考题内容比较宽泛,初学者有一定难度,为此,与本书配套,编写出版了“电机学习题解析”一书,该书有大量思考题和计算题的解答,还包括应用MATLAB解题。

本书仍由东南大学胡度生教授,胡敏强教授合作编著。胡度生教授负责统稿。全书由清华大学邱阿端教授和天津大学刘承榆教授担任主审,两位教授对本书初稿进行了认真的审阅,提出许多非常宝贵的意见和建议,对此编者深表由衷感谢!

本书第一版出版四年,已印刷8次,印数2.5万册,其间评为电力行业精品教材,被多所高等学校选作教材,得到广大读者的欢迎和支持,东南大学电机学国家级精品课程组老师在使用和修改教材中给予大力支持和无私的帮助,修订过程中广泛听取各方面的意见,得到东南大学黄学良教授,周建华教授和黄允凯副教授等的大力协助,再次表示诚挚的谢意。

书中难免还会存在一些不妥和错误,殷切希望读者指正。

编者

2009年5月于南京

第一版前言

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。本书编写中还对书中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

主 要 符 号 表

A	A 相 (a 相); 线负荷	K_p	节距因数
a	并联支路数; 复数算子	K_N	绕组因数
B	B 相 (b 相); 磁通密度	K_m	过载能力
B_r	剩余磁通密度	k_v	电压波形正弦畸变率
b	宽度长	k	电压变比 (变压器)
b_m	电纳	k_k	短路比
C	C 相 (c 相); 并列圈边数; 电容; 比热	k_A	自耦变压器变比
C_e	电动势常数	L	电感
C_T	转矩常数	l	长度
C_1	修正系数 (异步电机)	M	互感
D	定子内径	m_1	定子相数
E	电动势 (交流表示有效值)	N	串联匝数
E_ϕ	相电动势	N_c	线圈的匝数
E_c	线圈电动势	n	转速
E_q	q 个线圈合成电动势	n_1	同步转速
e	电动势瞬时值	P	功率 (有功)
F	磁动势; 力	P_1	输入功率
F_e	电磁力	P_2	输出功率
F_{cl}	线圈磁动势的基波振幅	P_i	机械功率
F_{ql}	线圈组磁动势的基波振幅	P_M	电磁功率
F_{ml}	磁动势的基波振幅	p	损耗; 极对数
f	频率; 磁动势瞬时值	p_{Cu}	铜损耗
G	重量	p_{Fe}	铁损耗
g_m	电导	p_{nd}	附加损耗
H	磁场强度	p_{mec}	机械损耗
H_c	矫顽磁力	Q	无功功率; 热量
I	电流 (交流表示有效值)	q	每极每相槽数
I_μ	励磁电流中磁化电流	R	电阻 (r 电阻)
I_{Fe}	励磁电流中铁耗电流	R_m	磁阻; 励磁电阻
i	电流瞬时值	r_Δ	附加电阻
J	转动惯量	S	视在功率; 面积; 每槽导体数
j	电流密度	s	转差率; 秒
K	换向器片数	s_k	最大转矩时转差率
K_d	分布因数	T	转矩 (电磁转矩); 时间常数; 周期
		T_1	输入转矩

T_2	输出转矩
T_1	加速转矩
T_{pi}	牵入转矩
T_{ns}	非周期电流衰减时间常数
T'_{dt}	瞬变电流衰减时间常数
T''_{dt}	超瞬变电流衰减时间常数
T_{d0}	定子开路时励磁绕组电流自由分量衰减时间常数
T_c	换向周期
t	时间
U	电压 (交流表示有效值)
U_ϕ	相电压
U_M	磁位差
u	电压瞬时值
ΔU	电压变化率; 电刷接触电压降
W	功; 能
W_m	磁场储能
X	电抗 (x 电抗)
X_s	同步电抗
x_p	保梯电抗
Y_m	导纳
y	绕组合成节距
y_1	第一节距
y_2	第二节距
Z	阻抗; 槽数
Z_L	负载阻抗
α	槽距角
β	短距角; 负载系数
δ	功率角; 气隙
θ	功率因数角; 温升
Ψ	磁链
ψ	内功率因数角
Λ	磁导
μ	磁导率
σ	电导率

η	效率
τ	极距
Φ	磁通量
Φ_m	主磁通
ϕ	磁通瞬时值
Ω	机械角速度
ω	电角频率

上角标的含义:

"/'"	归算值; 瞬态值
"//"	超瞬态值
"·"	相(矢)量值

下标 (右) 的含义:

1	定子侧; 一次侧 (变压器); 基波
2	转子侧; 二次侧 (变压器); 二次谐波 (3, 4...次谐波, 类推)
+	正序
-	负序
0	零序; 空载
*	标么值
a	电枢
d	直轴
q	交轴
f	励磁 (直流)
m	励磁 (交流)
k	短路; 换向极
N	额定
st	起动
av	平均 (值)
v	v 次谐波
σ	(泄) 漏
max	最大 (值)
min	最小 (值)

目 录

第二版前言

第一版前言

主要符号表

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	15
思考题	17
习题	17

第一篇 变 压 器

第二章 变压器的基本作用原理与理论分析	19
第一节 电力变压器的基本结构和额定值	19
第二节 变压器空载运行	22
第三节 变压器负载运行	27
第四节 标么值	32
第五节 参数测定方法	33
第六节 变压器的运行性能	37
小结	40
思考题	41
习题	42
第三章 三相变压器及运行	45
第一节 三相变压器的磁路	45
第二节 三相变压器的连接组	45
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	48
第四节 变压器的并联运行	50
小结	53
思考题	53
习题	54
第四章 三相变压器的不对称运行及瞬态过程	56
第一节 对称分量法	56
第二节 三相变压器的各序阻抗及其等效电路	58
第三节 三相变压器 Y_{yn} 连接单相运行	60

第四节 变压器二次侧突然短路时的瞬态过程	63
第五节 变压器空载合闸时的瞬态过程	66
小结	68
思考题	69
习题	69
第五章 电力系统中的特种变压器	71
第一节 三绕组变压器	71
第二节 自耦变压器	77
第三节 互感器	80
小结	82
思考题	82
习题	83

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	85
第一节 旋转电机的基本作用原理	85
第二节 交流绕组	87
第三节 绕组的感应电动势	93
第四节 谐波电动势及其削弱方法	98
小结	101
思考题	102
习题	102
第七章 交流绕组的磁动势	107
第一节 概述	107
第二节 单相绕组的磁动势	107
第三节 对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势	111
第四节 不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁动势	115
第五节 三相绕组磁动势的空间谐波分量和时间谐波分量	117
小结	119
思考题	120
习题	120
第八章 电机的发热和冷却	125
第一节 电机的额定容量	125
第二节 电机的发热	125
第三节 电机的散热	128
小结	130
思考题	130

第三篇 异步电机

第九章 异步电机的理论分析与运行特性	132
第一节 异步电机的基本结构	132

第二节 异步电机的运行状态和磁场	135
第三节 三相异步电机的等效电路	138
第四节 异步电机的参数	143
第五节 异步电动机的功率平衡式和转矩平衡式	146
第六节 异步电动机的机械特性及稳定运行条件	150
第七节 异步电动机的工作特性	156
小结	158
思考题	159
习题	160
第十章 三相异步电动机的起动和调速	164
第一节 起动电流和起动转矩	164
第二节 谐波转矩及其对起动的影响	165
第三节 笼型异步电动机的起动	169
第四节 笼型异步电动机的调速	176
第五节 绕线转子异步电动机的起动和调速	180
小结	184
思考题	184
习题	185
第十一章 单相异步电动机及异步电机的其他运行方式	187
第一节 三相异步电动机在不对称电压下运行	187
第二节 单相异步电动机	190
第三节 异步发电机	196
第四节 异步电机的制动运行	197
小结	199
思考题	200
习题	200

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	204
第一节 同步电机的结构	204
第二节 同步电机的励磁系统	208
第三节 同步电机的空载运行	210
第四节 对称负载时的电枢反应	213
第五节 隐极同步发电机的分析方法	219
第六节 凸极同步发电机的分析方法	223
第七节 电枢绕组的漏抗	227
第八节 同步发电机的空载、短路和负载特性	227
第九节 同步发电机的参数及测定	232
第十节 同步发电机的稳态运行特性	236
小结	241
思考题	242

习题	243
第十三章 同步发电机在大电网上运行	246
第一节 同步发电机的并联运行	246
第二节 隐极同步发电机的功角特性	248
第三节 凸极同步发电机的功角特性	252
第四节 同步发电机的有功功率调节	254
第五节 无功功率的调节和 V 形曲线	258
第六节 同步电动机与同步补偿机	260
第七节 同步发电机的进相运行	264
小结	269
思考题	270
习题	271
第十四章 同步发电机的不对称运行	273
第一节 同步电机各序阻抗与等效电路	273
第二节 同步发电机的单相稳定短路	277
第三节 同步发电机的两相稳定短路	278
小结	282
思考题	282
习题	283
第十五章 同步电机的突然短路与振荡	284
第一节 同步发电机突然短路的物理过程	284
第二节 同步电机的瞬态电抗和超瞬态电抗	286
第三节 三相突然短路电流	290
第四节 同步电机振荡的物理概念	294
小结	295
思考题	296
习题	296

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	298
第一节 直流电机的基本结构	298
第二节 直流电枢绕组	301
第三节 直流电机的磁场和电枢反应	304
第四节 电枢绕组的感应电动势和电压、功率平衡方程式	309
第五节 电枢绕组的电磁转矩和转矩平衡方程式	313
小结	314
思考题	315
习题	316
第十七章 直流发电机和直流电动机	320
第一节 自励发电机的电压建起	320
第二节 直流发电机的运行特性	321

第三节	直流电动机的机械特性和工作特性	326
第四节	直流电动机的起动和调速	333
第五节	直流电机的换向和改善换向的方法	338
小结		342
思考题		343
习题		344
参考文献		347

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。

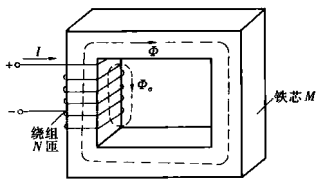


图 1-1 简单铁芯磁路

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

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

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 $\cos\theta=1$, $d\Phi=BdS$ 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 , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

(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百万倍。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^{18} 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。导体与非导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。

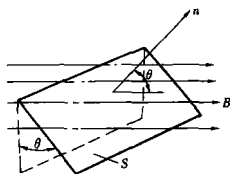


图 1-2 磁通量

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。

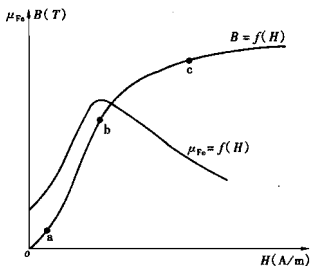


图 1-3 典型的磁化曲线

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 段中材料的磁导率逐渐变小, 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

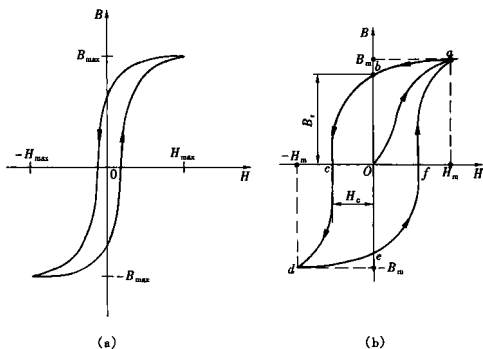


图 1-4 磁滞回线曲线
(a) 软磁材料; (b) 硬磁材料

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。

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、钡等) 的复化合物, 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。

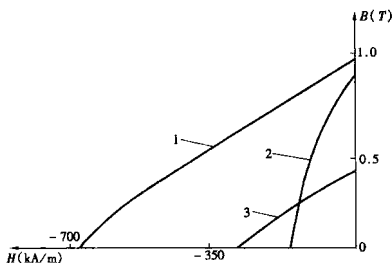


图 1-5 常用永磁材料的磁性能
1—钕铁硼; 2—铝镍钴; 3—铁氧体

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。

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

$$S_1 = 20 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^{-3} \times 0.94 = 0.752 \times 10^{-3} (\text{m}^2)$$

铁芯磁路的平均长度为

$$l_1 = 2(100 + 80) - 6 = 354 (\text{mm}) = 0.354 (\text{m})$$

铁芯中的平均磁通密度为

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{1 \times 10^{-3}}{0.752 \times 10^{-3}} = 1.33 (\text{T})$$