

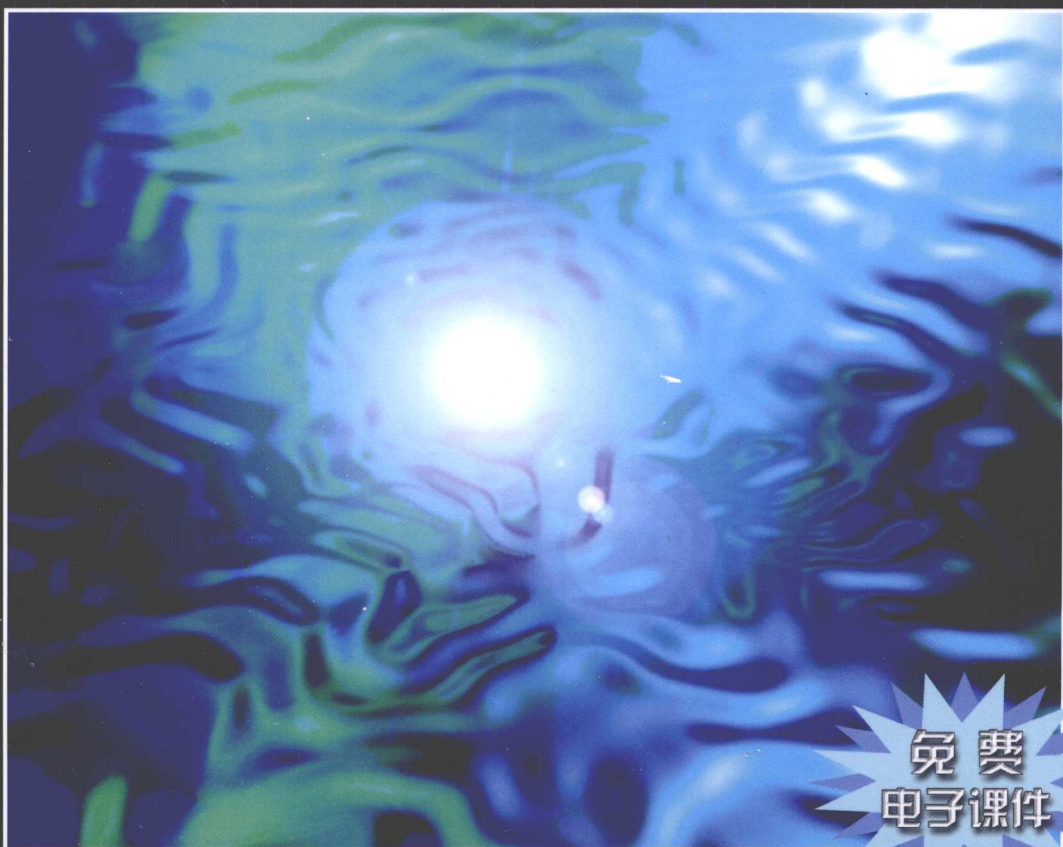


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电机学

第2版

徐德淦 李祖明 编著
林明耀 黄允凯



免费
电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电 机 学

第 2 版

徐德淦	李祖明	编 著
林明耀	黄允凯	
周克定	廖家平	主 审



机械工业出版社

本书是面向整个电气工程及其自动化专业的一门技术基础课教材，不同于面向专业的某个方向的专业基础课教材。

本书共分总论、动力电机和微特电机三篇共 11 章。其特点是突出每种电机的 5 个基本（基本功能和用途，基本作用原理，基本结构，基本分析方法，基本特性）；强干削枝，力求内容少而精；思考题、例题、习题占本书总篇幅约 20%，并配有课件光盘，便于自学和引发学生的学习兴趣；内容安排灵活，讲授时可根据具体情况进行次序调整和内容增减。

本书可作为高校电气工程及其自动化专业及其他强弱电结合的专业和大专的教材，亦可供有关工程技术人员及电类专业硕士生作为参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

电机学/徐德淦等编著. —2 版. —北京：机械工业出版社，2009.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 26999 - 1

I. 电… II. 徐… 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 066862 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：贡克勤 版式设计：霍永明 责任校对：陈延翔

封面设计：张 静 责任印制：邓 博

北京机工印刷厂印刷（兴文装订厂装订）

2009 年 7 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18.25 印张 · 44.9 千字

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 26999 - 1

ISBN 978 - 7 - 89451 - 123 - 2（光盘）

定价：34.00 元（含 1CD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：（010）68326294

购书热线电话：（010）88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：（010）88379725

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书自 2004 年出版以来,深受广大师生好评,本书 2008 年被评选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

“电机学”是一门历史悠久、理论相对较为成熟的学科,20 世纪 80 年代前它一直是强电类专业的一门主课,并往往分成若干门课程进行教学,学时达三四百小时之多。随着科技发展,一方面电机理论研究日臻完善,同时由于新兴学科丛生,以及电机的部分功能被电子技术所替代,导致电机学在电气工程专业内被日益削弱,以致于有些院校电专业将电机与其他课程合并,甚至将电机课干脆取消。国外有些高校的电气工程系甚至已没有电机学科组(类似我们的教研室)。

科技发展的另一方面,随着现代化的进程,电机的应用却越来越广泛,电机达到了无所不在的境界。而今,电气工程技术人员不懂、不会使用电机是不可思议的,必将寸步难行。为解决上述矛盾,我们以电气工程专业教学改革指导思想——加强基础、淡化专业、着重培养学生的自学能力,来改革电机学科的教学。把电机学作为电气工程及其自动化专业的一门技术基础课,而不同于面向专业的某个方向的专业基础课。

本书着重介绍电机的基本原理和分析方法,具体是抓住每种电机的 5 个基本:基本功能和用途;基本作用原理;基本结构;基本分析方法和基本特性。

本书删减各种电机工程应用的分析研究。工程应用问题面广量大,并与相关的其他学科密切相关,放在电机课内学习很难收效,且有无的放矢之嫌。当学生工作中遇到电机工程应用问题时,可以凭借学到的基本知识,通过自学去解决问题。

上述观点,编者曾撰文发表于 2002 年的电气工程高等教育国际研讨会,受到有关同志的重视和关注,并在机械工业出版社高等教育分社的鼓励和支持下,按上述观点编写了本书。

全书共分三篇 11 章。微特电机独立成篇。控制电机的原理虽然同动力电机,但对它们的要求和分析的着眼点不同,通过该篇的学习可起到对电机理论的巩固和拓宽作用。

全书例题、习题和思考题共占总篇幅的 20% 左右,并配有课件光盘。

我们在选择思考题、习题和例题时,考虑了启发学生学习兴趣、补充知识、提高自学能力、拓宽视野等因素。其难易程度亦有较大差异。应用本书时,任课教师可依据专业要求、学时数多少、学生具体情况等酌情筛选。

本书此次修订是根据各兄弟院校在应用本书的实践中提出的意见和建议而进行的。修订的原则是保持本书的原有特色,总体结构基本不变。重点在充实和改进某些内容,并进一步提高课件的质量,以更好地与书相配合,更有利于“教”与“学”。

此次修订由徐德淦、李祖明、林明耀、黄允凯主持。具体是:第一篇由徐德淦执笔,第二篇由李祖明执笔,第三篇除第十章由林明耀撰写外,其余由黄允凯执笔,全书由徐德淦统稿。课件光盘由黄允凯制作。在本书编写过程中,东南大学电机与控制学科的研究生张磊、顾娟、周谷庆、王燕萍、师敬涛、季振亚和王彬彬等录入了书稿的部分章节,在此表示衷心



的感谢。

本书由湖北工业大学周克定、廖家平两位教授主审。主审、兄弟院校任课教师以及南京航空航天大学刘迪吉教授、西华大学何建平教授、江苏科技大学刘维亭教授、南京工业大学王德明教授、张九根教授、南京师范大学王恩荣教授、扬州大学莫岳平教授、上海电器科学研究所季杏法教授、东南大学胡敏强教授、程明教授都对本书提出了许多宝贵的意见和建议，在此对他们表示衷心的感谢。

编 者

2009 年 3 月于宁

主要符号表

角标的含义:

- “'” 归算值; 瞬态值
- “ $''$ ” 超瞬态值
- “ $*$ ” 标么值

下标的含义:

- a 电枢值
- ad 附加
- av 平均值
- c 临界值; 控制
- e 有效; 电动势
- em 电磁
- f 励磁
- i 电流
- k 短路
- m 励磁
- N 额定
- 0 空载
- R 转子; 接收机
- S 定子; 绕组元件总数
- s 同步
- T 变压器
- ν 谐波次数
- δ 气隙
- σ 漏磁

主要符号

- A 面积; A 相
- a 绕组并联支路对数; 复数算子
- B B 相; 磁通密度
- b 宽度; 磁通密度瞬时值
- C C 相; 绕组每槽并列圈边数
- C_T 转矩常数
- D 直轴; 直径; 差动式
- E 电动势, 对交流表示有效值
- E_q q 个线圈合成电动势
- E_Q 虚拟电动势
- e 电动势瞬时值
- F 磁动势; 励磁绕组

- F_{q1} q 个线圈的基波合成磁动势
- f 频率
- H 磁场强度
- I 电流; 对交流表示有效值
- I_μ 励磁电流中的无功分量
- i 电流瞬时值
- J 转动惯量
- K_m 过载能力
- N 绕组总匝数: 每相绕组串联匝数
- N_c 每元件匝数; 每圈边导体数
- n 转速
- P 功率
- P_{mech} 机械功率
- p 极对数; 损耗功率
- p_{Cu} 铜耗
- p_{Fe} 铁耗
- p_{mech} 机械损耗
- Q 槽数; 交轴
- Q_e 虚槽数
- q 每极每相槽数
- r 交流电阻
- R 直流电阻
- S 视在功率; 容量; 绕组元件数
- s 转差率
- T 转矩; 时间常数
- T_c 换向周期
- t 时间, 时间常数
- T_{a3} 三相突然短路非同期分量电流衰减时间常数
- T''_{d3} 超瞬变电流分量衰减时间常数
- T'_{d3} 瞬变电流分量衰减时间常数
- T_{d0} 定子开路时励磁绕组电流自由分量衰减时间常数
- U 电压, 对交流为有效值
- u 电压瞬时值
- Δu 电压变化率



$2\Delta U$	电刷接触电压降	θ	位置角; 失调角
W	功; 能; 绕组	Λ	磁导
W_m	磁场储能	μ	磁导率
x	电抗	τ	极距; 时间常数
Y	导纳	Φ	磁通量
y	绕组合成节距	Φ_m	主磁通; 每极磁通量
Z	阻抗, $Z = r + jx$; 电枢总导体数	φ	功率因数角
α	角度; 槽与槽间的夹角	Ψ	磁链
β	夹角; 绕组短距角	ψ	内功率因数角
δ	气隙; 功率角	Ω	机械角速度
η	效率	ω	角频率; 电气角速度

目 录

前言

主要符号表

第一篇 总论 1

第一节 电机的基本功能与分类 1

第二节 电机的基本作用原理 2

一、磁场、磁感应强度、磁通 2

二、磁场强度、磁导率 4

三、安培环路定律（全电流定律） 4

四、磁路、磁路参数 5

五、磁性材料的 $B-H$ 曲线 6

六、铁心损耗 7

七、磁场储能 8

八、电感 9

九、电磁感应定律 10

十、电磁力、电磁转矩 12

十一、能量守恒原理 12

十二、电机的可逆性原理 12

第三节 电机的基本结构 13

一、定子 13

二、转子 14

三、主要材料 14

第四节 电机的基本分析方法 15

一、电路方程式 15

二、等效电路 16

三、相量图 16

四、旋转磁场 16

五、功率平衡 16

六、对称分量法 17

七、傅里叶级数 17

第五节 电机的基本特性 17

一、外特性 17

二、效率特性 17

三、电机的起动特性 17

四、电机的调节特性 17

思考题 17

习 题 18

第二篇 动力电机 22

第一章 直流电机 22

第一节 直流电机的基本功能与用途 22

第二节 直流电机的基本作用原理 23

第三节 直流电机的基本结构 25

一、主磁极与励磁线圈 25

二、电枢铁心 26

三、电枢绕组及绕组术语 26

四、直流电机电枢绕组的特点 27

五、单叠绕组 28

六、单波绕组 29

七、换向器和电刷装置 30

八、换向极 31

九、气隙 31

十、机座 31

第四节 直流电机的基本分析方法 31

一、气隙磁场 32

二、电刷间的感应电动势 E_a 34

三、直流电机的电磁转矩 T_{em} 35

四、电磁功率 P_{em} 35

五、电压方程式 36

六、功率平衡方程式 37

第五节 直流电机的基本特性 37

一、直流发电机的基本特性 37

二、直流电动机的基本特性 42

三、电动机稳定运行的条件 44

四、直流电动机的起动 45

五、直流电动机的调速 46

六、直流电动机制动的概念 47

七、火花、换向 48

八、铭牌数据 49



思考题	50	三、转子铁心	102
习 题	51	四、绕线转子绕组	102
第二章 变压器	58	五、笼型绕组	103
第一节 变压器的基本功能与用途	58	六、气隙	103
第二节 变压器的基本作用原理	58	七、铭牌数据和额定值	103
第三节 变压器的基本结构	61	第四节 基本分析方法	104
第四节 变压器的基本分析方法	62	一、旋转磁场理论	104
一、变压器的基本方程式	63	二、感应电动机与变压器的比较	114
二、归算	64	三、转子卡住不动时的绕线转子感应电动机	115
三、变压器的等效电路	65	四、转子转动后的绕线转子感应电动机	117
四、关于三相变压器	66	五、感应电动机的基本方程式和等效电路	119
五、变压器的相量图	67	六、笼型感应电动机	120
六、标幺制	67	七、感应电动机等效电路参数的测定	121
七、变压器参数的测定	68	第五节 基本特性	122
第五节 变压器的基本特性	70	一、功率关系	122
一、电压	71	二、转矩方程式	123
二、波形与频率	71	三、感应电动机的工作特性	126
三、相位角	72	四、感应电动机的起动	127
四、变压器的工作特性	74	五、感应电动机的调速	130
第六节 变压器的几种运行方式	75	第六节 单相感应电动机	134
一、并联运行	75	思考题	138
二、三相变压器的不对称运行	76	习 题	142
三、变压器的瞬态过程	79	第四章 同步电机	155
四、整流装置中的变压器	81	第一节 同步电机的基本功能及用途	155
第七节 几种特殊结构的变压器	82	第二节 同步电机的基本作用原理	155
一、自耦变压器	82	第三节 同步电机的基本构造	157
二、三绕组变压器	83	一、转子	157
三、互感器	85	二、定子	159
思考题	86	三、机座	160
习 题	87	四、气隙	160
第三章 感应电机	98	五、冷却系统	161
第一节 感应电机的基本功能与用途	98	六、励磁系统	163
第二节 感应电机的基本作用原理	98	七、铭牌数据	164
第三节 感应电机的基本结构	99	第四节 同步电机的基本分析方法	164
一、定子铁心	99		
二、交流绕组	99		



一、两种旋转磁场	164	思考题	230
二、电枢反应	165	习 题	231
三、隐极同步发电机的分析方法	168		
四、凸极同步发电机的分析方法	170	第六章 步进电动机	232
五、铁心饱和的影响	173	第一节 概述	232
六、同步电机稳态参数的测定	175	第二节 基本工作原理	232
第五节 同步电机的基本特性	179	第三节 基本构造	233
一、同步发电机正常运行时的		第四节 基本特性	237
特性	179	第五节 开关磁阻调速电动机	240
二、同步发电机与电网并联运行	181	思考题	241
三、同步电动机	187	习 题	243
四、同步补偿机	191		
第六节 同步电机几种不正常运		第七章 测速发电机	244
行	191	第一节 概述	244
一、同步发电机的不对称运行	191	第二节 直流测速发电机	244
二、各序阻抗及对应的等效电路	191	第三节 同步测速发电机和脉冲测	
三、不对称短路(稳态)举例	194	速发电机	246
四、同步电机的突然短路	197	第四节 交流异步测速发电机	246
思考题	203	思考题	248
习 题	204	习 题	248
第三篇 微特电机	215	第八章 旋转变压器	249
第五章 伺服电动机	218	第一节 概述	249
第一节 直流伺服电动机	218	第二节 正弦和余弦旋转变压器	249
一、概述	218	第三节 旋转变压器的补偿问题	251
二、电枢控制的工作原理	218	第四节 线性旋转变压器	251
三、电枢控制直流伺服电动机的静态		第五节 应用举例	252
特性	218	思考题	253
四、动态特性简介	220	习 题	254
五、几种低惯量直流伺服电动机	221		
六、无刷直流电动机	222	第九章 自整角机	255
第二节 交流伺服电动机	223	第一节 概述	255
一、概述	223	第二节 基本结构	256
二、交流伺服电动机的对称分量		第三节 自整角机的指示式运行	256
分析	225	第四节 差动式自整角机	258
三、各序的等效电路	226	第五节 自整角机的变压器式	
四、伺服电动机的电压方程和电磁		运行	259
功率	227	思考题	260
五、伺服电动机获得圆形旋转磁场的		习 题	261
条件	227		
六、交流伺服电动机的特性	228	第十章 单相交流串励电动机	262
第三节 力矩电动机	229		



第一节 概述	262	三、串电阻调速	270
第二节 基本结构和工作原理	262	第五节 单相串励电动机产生的干扰 及其抑制措施	270
一、基本结构	262	一、噪声及其抑制措施	270
二、工作原理	263	二、无线电干扰的抑制	271
第三节 单相串励电动机的工作 特性	264	第六节 主要应用范围	271
一、磁通	265	思考题	271
二、感应电动势	265	习 题	271
三、电压平衡方程及相量图	266	第十一章 直线电动机简介	272
四、电磁转矩	267	思考题	276
五、工作特性	267	习 题	278
第四节 单相串励电动机的调速	269	参考文献	280
一、改变电源电压调速	269		
二、改变励磁磁通调速	269		

第一篇

总 论

第一节 电机的基本功能与分类

任何机器都是能量转换装置，电机是以磁场为媒介进行机械能和电能相互转换的电磁装置。其中除变压器外，均为机、电能量的转换，涉及的机械能主要是旋转机械功率。把机械能转换为电能的称发电机，其逆运行为电动机。变压器的功能是将某个电压的交流电能转换成同频率但不同电压的交流电能，它是静止不动的，故应称为器，不是机。只因为它的工作原理和分析方法与旋转电机密切关联，故无例外地将它列入电机范畴。

电机分类方法众多，常用的方法是：按电能的性质分为直流、交流电机；按同步转速 $n_s = 60f/p$ （单位为 r/min ）分类，它是取决于电频率 f （单位为 Hz ）和电机磁极对数 p 的一个常数。凡是电机转速等于 n_s 的称同步电机，不等于 n_s 的称异步电机或感应电机，没有固定 n_s 的为直流电机。

同步发电机是当前人类获取电能最重要的装置，无论火电厂、核电厂、水电站，它们只是获得机械能的方法不同，由热能、核能、水的势能转换为机械能，最后都是通过同步发电机将机械能转换为电能。电动机是当今获取机械能最方便、灵活、可靠的装置，尤以异步电机最为常见。无论工、商、交通运输、办公民用，处处可见各种各样、大小不一、功能不同的电动机。电能传输宜用高电压（220 ~ 500kV），用电端电压较低（380V，220V）。为此，电力系统中必须把交流电压进行升降变换，无例外地均由变压器来完成。

从电机的容量、体积来看，其间差异极为悬殊。交流同步发电机的容量大达 600MW、1000MW（汽轮发电机，其转子直径达 1.25m，轴长近 10m）。容量为 700MW 的长江三峡电站水轮发电机，转子直径近 20m 之巨，相应的配套变压器的容量为 360MV · A、840MV · A。它们的重量竟达数千吨。反之，有些控制用微电机，外径不到 10mm，转轴直径不到 1mm，其



重量以克来计算,最小的微型电动机转子直径仅为 $100\mu\text{m}$,可以在人体的血管中移动工作。不同电机的转速亦有极大差异,从一分钟数转到几十万转。

可见,电机的种类繁多,性能各异,本书只择其基本型、常见型、有代表性的电机分述于后。

第二节 电机的基本作用原理

电机是通过电磁感应原理来实现能量转换的,因此,电和磁是构成电机的两大要素。

电在电机中主要是以路的形式出现,即由导体、线圈、绕组构成电机的电路。可以是直流电路,单相、两相或对称三相交流电路。这些电路的理论和分析方法未超出先修课“电路”的内容,这里就不再重复了。但有一点值得一提,电机是旋转机械,必然有固定不动的部分(称它为定子)、能旋转的转动部分(称为转子),二者之间必须有空气隙才能正常工作。因此,定子上的电路属于普通的静止电路,转子上的电路是和转子一起旋转的旋转电路。外界的静止电路如何与转子电路连通,是电机电路的一个特殊问题,它可通过滑动接触来解决。其基本结构原理如图 0-1 所示。其中图 0-1a 称为集电环与电刷结构,由石墨-碳导电材料制成的固定电刷与静止的外电路相连接,转子上的导体与由导电材料制成的环状集电环随转轴旋转,受有适当压力的电刷 b_1 始终通过滑动接触与集电环 r_1 (导体 1) 联通。同理, b_2 与 r_2 (导体 2) 联通。此种结构只解决旋转电路(导体)与静止电路(电刷)的电气连接问题。图 0-1b 为换向片电刷结构,由图可见,导电材料制成的瓦状换向片与导体随转轴一起旋转,固定的电刷 b_1 在半周中与换向片 A(导体 1) 联通,在另外半周内改为与换向片 B(导体 2) 联通。此类结构除了解决旋转和静止电路的联通外,还起着改换连接关系的作用,称为换向。上述结构中,前者常见于交流电机,后者主要用在直流电机中。

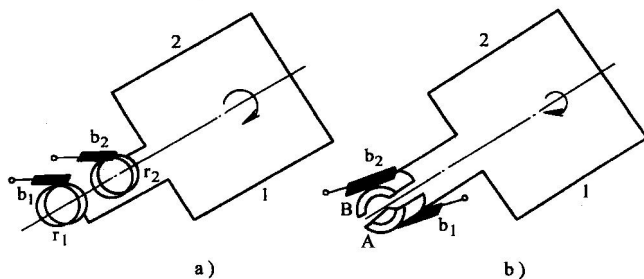


图 0-1 滑动接触示意图

a) 集电环与电刷结构 b) 换向片与电刷结构

磁在电机中是以场的形式存在的,一般工程分析计算时,为了方便,常将磁场简化为磁路来处理。与电路相比,无论是磁路或磁场,同学们相对接触较少,比较生疏。因此,有必要在先修课的基础上,对它作一简要回顾并给予适当的延伸。

一、磁场、磁感应强度、磁通

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。具体说来,上述洛伦兹力 dF 可表示为



$$dF = IdlB$$

(0-1)

式中, I 为载流导体中的电流 (A); dl 为导体微小单元长度 (m); dF 为该微小导体单元上受到的洛伦兹力 (N), 亦即称为**电磁力**; B 为导体单元 dl 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, 单位为 T (特斯拉)。

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磁感应强度 B 的方向。这样的曲线叫做**磁感应线**或**磁力线**。要注意, 磁力线是人为地设想出来用以描述磁场的, 并非磁场中真的有这种线存在。

图 0-2 中示出了长导线、环形导线和螺线管载流时的磁感应线的图形, 可见磁感应线具有以下特性:

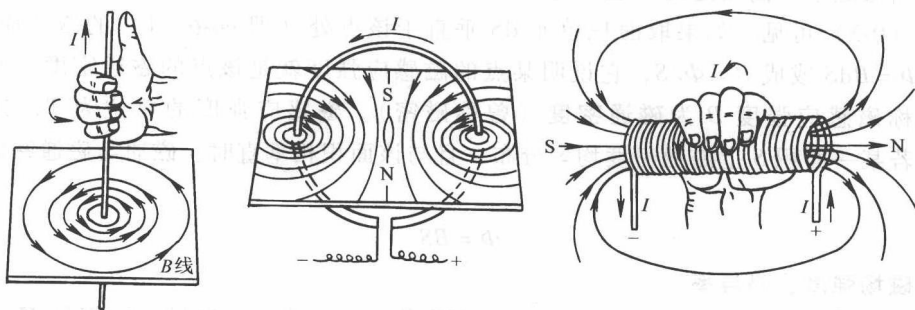


图 0-2 载流长导线、环形导线和螺线管载流时的磁感应线

- 1) 磁感应线的回转方向和导体中电流的方向之间的关系遵守右手螺旋法则。
- 2) 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唯一的。
- 3) 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, 而且能描述磁场各点的强弱, 人们以磁感应线的疏密程度来表示该点处的磁感应强度 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的密度定义为该点 B 的数值, 故亦称它为**磁感应线密度**。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, 各点的 B 相等; 对非均匀磁场来说, 各条磁感应线相互不平行, 各处的 B 大小不相等。

工程上常把通过磁场中某一面积的磁感线数称为通过该面积的**磁通量**, 简称**磁通**, 用符号 Φ 表示, 单位为 Wb (韦伯)。

根据上述磁感应强度和磁通的定义, 由图 0-3 可见, 在均匀磁场中, 穿过面积 S 的磁通为

$$\Phi = BS \cos \theta$$

(0-2)

式中, θ 为面积 S (m^2) 的法线 n 与磁感应强度 B 之间的夹角。

由式 (0-2) 可见, 当磁感应线与 S 平面正交时 ($\theta = 0^\circ$), 通过平面 S 的磁通量为最大; 当两者平行时 ($\theta = 90^\circ$), 通过平面 S 的磁通量为零。

通过任意曲面的磁通量为



$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S B \cos\theta dS \quad (0-3)$$

式中, dS 为表面上的单元面积, 其面积分即为通过该曲面的磁通量。

由于磁感应线是闭合的, 无始端也无终端, 因此, 对任意封闭曲面来说, 进入该闭合曲面的假设为正的磁感应线, 它一定等于假设为负的穿出该闭合曲面的磁感应线, 即通过任意封闭曲面的磁通量总和必等于零, 用公式表示为

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

这个结论叫做磁场的高斯定理, 也称为磁通连续性定理。

由式 (0-3) 可见, 如果取面积单元 dS 垂直于该点处 (即 $\cos\theta = 1$) 的磁感应强度 B , 于是有 $d\Phi = BdS$ 或成 $B = \Phi/S$, 它说明某点的磁感应强度就是该点的磁通密度, 所以在工程中常常称磁感应强度 B 为磁通密度 (曾称磁密)。磁感应强度的单位为 T, 亦可写成 Wb/m^2 。若某一面积 S 上磁通密度均匀分布, 且与该面积相垂直时, 磁通与磁通密度关系便简化为

$$\Phi = BS \quad (0-5)$$

二、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

$$B = \mu H \quad (0-6)$$

式中, μ 称为磁导率, 由磁场该点处的介质性质所决定, 其单位是 H/m (亨/米)。

磁导率的数值随介质的性质而异, 变化范围很大。我们熟知的真空导磁率 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。在电机中应用的介质, 一般按其导磁性能分为铁磁物质和非铁磁物质。后者如空气、铜、铝和各种绝缘材料等, 它们的磁导率可认为等于真空磁导率; 前者如钢、铁、镍及其合金, 其磁导率远大于真空磁导率达数千甚至上万倍。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

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (0-7)$$

众所周知, 导体与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, 电主要以由导体构成的电路的形式出现。导磁体与非导磁体亦即铁磁物质与非铁磁物质的磁导率之比, 其数量级仅为 $10^3 \sim 10^5$ 。所以磁性线 (磁通) 不只顺着导磁体, 且同时向周围的非导磁体散播流通。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。

三、安培环路定律 (全电流定律)

该定律反映了由电流激励磁场的关系:

$$\oint_l H dl = \sum_{k=1}^n I_k \quad (0-8)$$

式 (0-8) 即该关系的数学表达式, 称为安培环流定律, 亦称为全电流定律。它说明在磁场中, 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

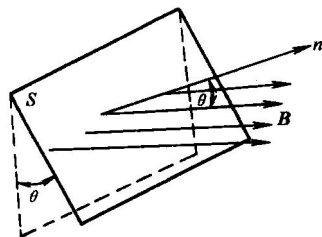


图 0-3 磁感应强度
n—平面 S 的法线



的代数和。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，参看图 0-2。

人们定义磁场强度沿一条路径 l 的线积分为该路径上的磁压，以符号 U_M 表示，其单位为 A，即有

$$U_M = \int_l H dl \quad (0-9)$$

由于磁场是由电流所激励，故式 (0-8) 中回路所匝链的电流称为**磁动势**。通常以符号 F 表示，显然其单位和磁压相同，也为 A。这样，说明电流和它所产生的磁场之间关系的安培环路定律，就可以定义为：沿着磁场中任一闭合回路，其 i 段的总磁压等于总磁动势，为

$$\sum U_{Mi} = \sum I_k \quad (0-10)$$

这与在闭合电路中，总的电压降等于总的电动势相似。

我们常常称某磁路段的磁压为某磁路段所需的磁动势，式 (0-10) 可理解为闭合磁路各段所需的磁动势由磁动势源（励磁安匝 $\sum I$ ）来提供。这样，就隐去了磁压这一名称。

四、磁路、磁路参数

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为磁动势源和导磁体。磁动势源可以是带电的线圈，亦可以是永久磁铁。导磁体一般是由电工钢片（硅钢片）、铸钢或合金材料构成，其作用是提供建立较大磁通的条件。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 0-4 表示了单相壳式变压器的磁路，中间柱上通以电流的线圈为磁动势源，为简单起见，设变压器二次线圈开路，所以图中未予画出。由电工钢片叠成的铁心为导磁体，可以认为磁通完全在导磁体中通过。由式 (0-10) 可知，对磁路中任何一段，例如，截面积为 S_{c1} ，长度为 l_{c1} 的中间心柱 AB ，可认为磁通在截面 S_{c1} 为均匀分布，其磁通密度为 B_{c1} ，则该段磁路的磁通和所需的磁动势（磁压）为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{c1} &= B_{c1} S_{c1} \\ U_{c1} &= H_{c1} l_{c1} \end{aligned} \right\} \quad (0-11)$$

与电路中的电流和电压降的关系相似，定义

$$\Omega_{c1} = \frac{U_{c1}}{\Phi_{c1}} \quad (0-12)$$

为该心柱段的**磁阻**，单位为 A/Wb，式 (0-12) 指出了在一个磁路段上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，则根据式 (0-6)、式 (0-11)、式 (0-12)，写出磁阻的广义表示式为

$$\Omega = \frac{l}{\mu S} \quad (0-13)$$

可见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。即有

$$\Lambda = \frac{1}{\Omega} = \frac{\Phi}{U} \quad (0-14)$$

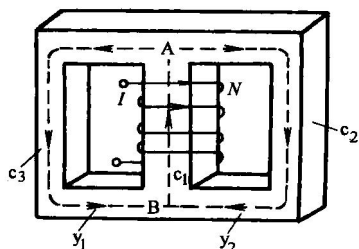


图 0-4 单相壳式变压器的磁路

$\overline{AB}$ 为中心柱 c_1 、 c_2 、 c_3

为两侧心柱； y_1 、 y_2 为轭



或

$$\Lambda = \mu \frac{S}{l} \quad (0-15)$$

其单位是 Wb/A 或 H (亨)。

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。凡磁路段的截面积不同、材料不同、通过的磁通不同时,则需用不同的磁阻来表示。图 0-5 表示了图 0-4 中变压器的等效磁路。

根据每段磁路的几何尺寸及材料特性,便可按式 (0-13) 来计算各磁路段的磁阻值。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 0-5 中的节点 A,有

$$\Phi_c - \Phi_{y1} - \Phi_{y2} = 0 \quad (0-16)$$

式 (0-16) 亦称为**磁路的基尔霍夫第一定律**。实际上式 (0-10) 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。

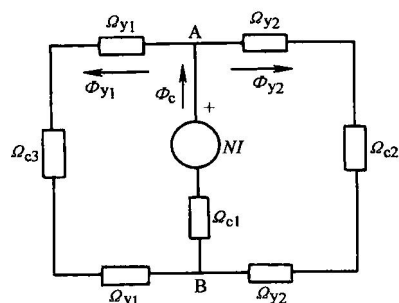


图 0-5 图 0-4 中变压器的等效磁路

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场物理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段中。

五、磁性材料的 $B-H$ 曲线

已知磁通密度和磁场强度的关系为 $B = \mu_r \mu_0 H$, 不同的磁性材料有不同的 μ_r , 同一材料当磁通密度不同时 μ_r 亦不相同。因此不同的磁性材料有不同的 $B-H$ 曲线。它是磁性材料最基本的特性,亦称为材料的**磁化曲线**。

未被磁化的磁性材料放在磁场中,当改变磁场强度 H 时,材料中的磁通密度 B 会发生相应的变化,典型的磁化曲线如图 0-6 所示。图中区域 I 称起始段,这时候材料的磁导率较小。继续增大 H , 达到区域 II, 此时磁导率迅速增大并基本上保持不变, $B-H$ 关系便是直线,称为线性区。达到区域 III 其磁导率又变得很小,此时 H 增大, B 的变化甚小,该区称为饱和区。

如果 H 从某一数值减小,则发现曲线不沿原来的曲线返回。当 H 降到零, B 并不为零, H 的返回点不同,相应的曲线亦不同,如图 0-7 所示,这现象称为**磁滞现象**。如果磁场强度在 $+H_m \sim -H_m$ 区域内循环变化时, $B-H$ 曲线便是一封闭曲线。返回点 H 不同,回线的宽度和高度亦不相同,当材料充分饱和即达到 H 值再增大而 B 几乎不再增大时,回线包含的面积不再增大,此最大的回线称为**极限磁滞回线**或**饱和磁滞回线**,亦简称为**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**

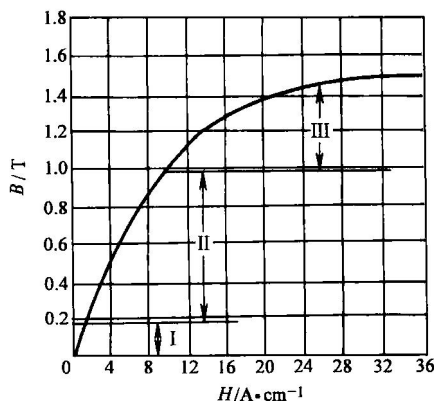


图 0-6 铁磁材料铸钢典型磁化曲线