



21世纪普通高等教育规划教材

徐德淦
主编

电机学



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育规划教材

电 机 学

主 编 徐德淦
参 编 陈志刚
主 审 刘迪吉



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,不同于面向专业某个方向的专业基础课教材。

本书共分总论、直流电机、变压器、感应电机、同步电机和微特电机六章。其特点是抓住每种电机的五个基本(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);微特电机独立成章;思考题、例题、习题占本书总篇幅约 20%,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/徐德淦主编. —北京:机械工业出版社,
2004.7

21 世纪普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-14593-3

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(2004)第 052300 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:张世琴 责任校对:王 欣

封面设计:解 辰 责任印制:李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·17 印张·420 千字

定价:28.00 元(含 1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

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,电机学在电气工程专业内被日益削弱,科技人员对电机理论研究的兴趣亦渐趋淡薄,以致于有些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,编者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。即抓住每种电机的五个基本: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。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。

编者上述观点曾撰文发表于 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,在机械工业出版社高等教育分社的支持下,按上述观点编写本教材,应该说这是一个尝试,肯定有缺点,望有关专家、师生匡正。

本教材着重介绍电机的基本概念、基本原理和基本分析方法,属一本面向整个电气工程及其自动化专业的技术基础课教材。不同于面向专业的某个方向的专业基础课教材。全书共分六章。微特电机独立成章,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,通过该章的学习可起到对电机理论的巩固和拓宽的作用。全书例题、习题和思考题共占总篇幅的 20% 左右,有利于提高学生学习兴趣和便于自学。

本教材由徐德淦教授主编、陈志刚副教授参编,南京师范大学王彤副教授马春梅、窦一平老师提供了课件光盘。全书由南京航空航天大学刘迪吉教授主审,他对全书进行了认真仔细的评阅,提出了许多极其宝贵的意见,对此编者表示衷心感谢。

本书的编写得到了东南大学胡敏强教授、程明教授、林明耀教授、西华大学何建平教授、湖北工学院廖家平教授等的关心和支持。刘迪吉教授、上海电器科学研究所季杏法教授、江苏科技大学王德明教授、刘维亭副教授、南京工业大学张九根教授、南京师范大学王恩荣教授、南京工程学院李祖明副教授、扬州大学莫岳平副教授、上海工程技术大学何松康副教授、机械工业出版社贡克勤高级编辑等出席了本教材的审稿会,提出了许多宝贵意见,在此再次表示感谢。

编 者

2004 年 4 月于镇江市碧榆园

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

$T_{\Delta 3}$ 三相突然短路非同期分量电流
衰减时间常数

$T_{\Delta 3}''$ 超瞬变电流分量衰减时间常数

$T_{\Delta 3}'$ 瞬变电流分量衰减时间常数

$T_{\Delta 0}$ 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

W 功;能

W_m 磁场储能

x 电抗

Y 导纳

y 绕组合成节距

Z 阻抗, $Z = r + jx$; 电枢总导体数

α 角度;槽与槽间的夹角

β 夹角;绕组短距角

δ 气隙;功率角

η 效率

θ 位置角;失调角

Λ 磁导

μ 磁导率

τ 极距;时间常数

Φ 磁通量

Φ_m 主磁通;每极磁通量

φ 功率因数角

Ψ 磁链

ψ 内功率因数角

Ω 机械角速度

ω 角频率;电气角速度

目 录

前言

主要符号表

第一章 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 1

一、磁场、磁感应强度、磁通 2

二、磁场强度、磁导率 3

三、安培环路定律(全电流定律) 4

四、磁路、磁路参数 4

五、磁性材料的 $B-H$ 曲线 5

六、铁心损耗 7

七、磁场储能 8

八、电感 8

九、电磁感应定律 10

十、电磁力、电磁转矩 11

十一、能量守恒原理 11

十二、电机的可逆性原理 12

第三节 电机的基本结构 12

一、定子 12

二、转子 13

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 15

三、相量图 15

四、旋转磁场 15

五、功率平衡 16

六、对称分量法 16

七、傅里叶级数 16

第五节 电机的基本特性 16

一、外特性 16

二、效率特性 16

三、电动机的起动特性 16

四、电机的调节特性 17

思考题 17

习 题 17

第二章 直流电机 21

第一节 直流电机的基本功能与用途 21

第二节 直流电机的基本作用原理 21

第三节 直流电机的基本结构 23

一、主磁极与励磁线圈 23

二、电枢铁心 24

三、电枢绕组及绕组术语 25

四、直流电机电枢绕组的特点 26

五、单叠绕组 27

六、单波绕组 28

七、换向器和电刷装置 28

八、换向极 29

九、气隙 29

十、机座 30

第四节 直流电机的基本分析方法 30

一、气隙磁场 30

二、电刷间的感应电动势 E_a 32

三、直流电机的电磁转矩 T_{em} 33

四、电磁功率 P_{em} 33

五、电压方程式 34

六、功率平衡方程式 35

第五节 直流电机的基本特性 36

一、直流发电机的基本特性 36

二、直流电动机的基本特性 39

三、电动机稳定运行的条件 42

四、直流电动机的起动 43

五、直流电动机的调速 43

六、直流电动机制动的概念	45	原理	96
七、火花、换向	45	第三节 感应电机的基本结构	97
八、铭牌数据	47	一、定子铁心	97
思考题	47	二、交流绕组	97
习 题	49	三、转子铁心	100
第三章 变压器	56	四、绕线转子绕组	100
第一节 变压器的基本功能与用		五、笼型绕组	101
途	56	六、气隙	101
第二节 变压器的基本作用原理	56	七、铭牌数据和额定值	101
第三节 变压器的基本结构	59	第四节 基本分析方法	102
第四节 变压器的基本分析方法	60	一、旋转磁场理论	102
一、变压器的基本方程式	61	二、感应电动机与变压器的比较	112
二、归算	62	三、转子卡住不动时的绕线转子感应	
三、变压器的等效电路	63	电机	113
四、关于三相变压器	64	四、转子转动后的绕线转子感应电动	
五、变压器的相量图	64	机	115
六、标幺制	65	五、感应电动机的基本方程式和等效	
七、变压器参数的测定	66	电路	117
第五节 变压器的基本特性	68	六、笼型感应电动机	118
一、电压	68	七、感应电机等效电路参数的测定	119
二、波形与频率	69	第五节 基本特性	120
三、相位角	70	一、功率关系	120
第六节 变压器的几种运行方式	73	二、转矩方程式	121
一、并联运行	73	三、感应电动机的工作特性	124
二、三相变压器的不对称运行	74	四、感应电动机的起动	125
三、变压器的瞬态过程	77	五、感应电动机的调速	128
四、整流装置中的变压器	79	第六节 单相感应电动机	132
第七节 几种特殊结构的变压器	80	思考题	136
一、自耦变压器	80	习 题	141
二、三绕组变压器	81	第五章 同步电机	153
三、互感器	83	第一节 同步电机的基本功能及	
思考题	84	用途	153
习 题	85	第二节 同步电机的基本作用原	
第四章 感应电机	96	理	153
第一节 感应电机的基本功能与用		第三节 同步电机的基本构造	155
途	96	一、转子	155
第二节 感应电机的基本作用		二、定子	157
		三、机座	158

四、气隙	158	二、交流伺服电动机的对称分量	
五、冷却系统	158	分析	222
六、励磁系统	161	三、各序的等效电路	223
七、铭牌数据	162	四、伺服电动机的电压方程和电磁	
第四节 同步电机的基本分析方		功率	223
法	162	五、伺服电动机获得圆形旋转磁场的	
一、两种旋转磁场	162	条件	224
二、电枢反应	163	六、交流伺服电动机的特性	225
三、隐极同步发电机的分析方法	166	七、力矩电动机	226
四、凸极同步发电机的分析方法	168	第四节 步进电动机	227
五、铁心饱和的影响	170	一、概述	227
六、同步电机稳态参数的测定	172	二、基本工作原理	227
第五节 同步电机的基本特性	177	三、基本构造	228
一、同步发电机正常运行时的特性	177	四、基本特性	232
二、同步发电机与电网并联运行	179	五、开关磁阻调速电动机	235
三、同步电动机	185	第五节 测速发电机	236
四、同步补偿机	189	一、概述	236
第六节 同步电机几种不正常运		二、直流测速发电机	236
行	189	三、同步测速发电机和脉冲测速发	
一、同步发电机的不对称运行	189	电机	238
二、各序阻抗及对应的等效电路	189	四、交流异步测速发电机	238
三、不对称短路(稳态)举例	191	第六节 旋转变压器	241
四、同步电机的突然短路	194	一、概述	241
思考题	200	二、正弦和余弦旋转变压器	241
习 题	202	三、旋转变压器的补偿问题	242
第六章 微特电机	213	四、线性旋转变压器	243
第一节 概述	213	五、应用举例	244
第二节 直流伺服电动机	214	第七节 自整角机	245
一、电枢控制的工作原理	215	一、概述	245
二、电枢控制直流伺服电动机的静态		二、基本结构	246
特性	215	三、自整角机的指示式运行	246
三、动态特性简介	216	四、差动式自整角机	248
四、几种低惯量直流伺服电动机	217	五、自整角机的变压器式运行	249
五、无刷直流电动机	218	第八节 直线电动机简介	250
第三节 交流伺服电动机	220	思考题	255
一、概述	220	习 题	261
		参考文献	263

第一章 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与分析方法与旋转电机密切相关,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(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,即 $n_s = \frac{60f}{p}$ (单位为 r/min) 分类,凡电机转速等于 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,尤以异步电动机最为常见。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 300MW、600MW(汽轮发电机,其转子直径达 1m,轴长近 10m) 700MW(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,其重量以克来计算,最小的微型电动机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,本教材只择其基本型、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)、带有旋转的转动部分(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 1-1 所示。其中图 1-1a 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 1-1b 为**换向片电刷结构**,由图

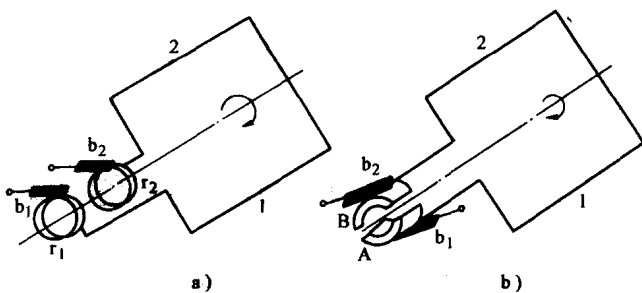


图 1-1 滑动接触示意图

a) 滑环与电刷结构 b) 换向片与电刷结构

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。

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

$$dF = IdlB \quad (1-1)$$

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 为我们定义来说明导体单元 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(T)。

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 1-2 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:

- 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惟一的。
- 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。

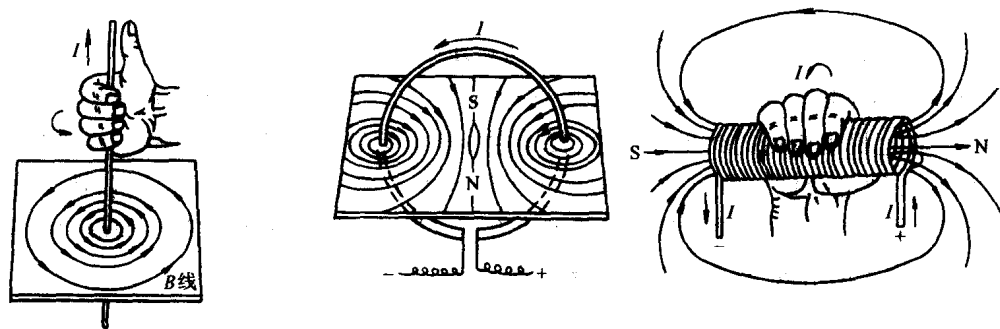


图 1-2 载流长导线、环形导线螺线管的磁感应线

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 。

根据上述磁感应强度和磁通的定义,由图 1-3 可见,在均匀磁场中,穿过面积 S 的磁通为

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

式中, θ 为面积 S 的法线 n 与磁感应强度 B 之间的夹角。

由式(1-2)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

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

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,进入该封闭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封闭曲面的磁感应线,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

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

这个结论叫做**磁场的高斯定理**,也称为**磁通连续性定理**。

由式(1-3)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 $d\Phi = B dS$ 或成 $B = \frac{\Phi}{S}$,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**,简称**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,磁通与磁密关系便简化为

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

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

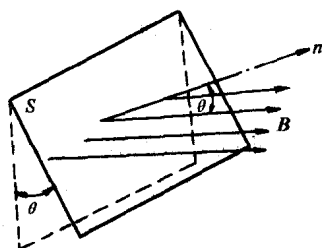


图 1-3 磁感应强度

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

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

磁导率的数值随介质的性质而异, 变化范围很大。我们熟知的真空磁导率 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7}$ 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

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

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 $10^3 \sim 10^5$ 。所以磁感性线(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, 相对于电, 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:

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

上式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 1-2。

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

$$U_M = \int_l H dl \quad (1-9)$$

由于磁场是由电流所激励, 故式(1-8)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为安(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, 其总磁压等于总磁动势, 为

$$\sum U_{Ml} = \sum I_k \quad (1-10)$$

这与在闭合电路中, 其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(1-10)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 1-4 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, 设变压器一次线圈开路, 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(1-10)可知, 对磁路中任何一段, 例如, 截面积为 S_a , 长度为

l_{cl} 的中间心柱 AB , 可认为磁通在截面 S_{cl} 为均匀分布, 其磁通密度为 B_{cl} , 则该段磁路的磁通和所需的磁动势(磁压)为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{cl} &= B_{cl} S_{cl} \\ U_{cl} &= H_{cl} l_{cl} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

与电路中的电流和电压降的关系相似, 我们定义

$$\Omega_{cl} = \frac{U_{cl}}{\Phi_{cl}} \quad (1-12)$$

为该心柱段的磁阻, 单位为 A/Wb , 上式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(1-6)、式(1-11)、式(1-12), 写出磁阻的广义表示式为

$$\Omega = \frac{l}{\mu S} \quad (1-13)$$

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

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

或

$$\Lambda = \mu \frac{S}{l} \quad (1-15)$$

其单位是 Wb/A 或 H 。

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、材料不同、通过的磁通不同时, 则需用不同的磁阻来表示。图 1-5 表示了图 1-4 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(1-13)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 1-5 中的节点 A , 有

$$\Phi_c - \Phi_{y1} - \Phi_{y2} = 0 \quad (1-16)$$

上式亦称为磁路的基尔霍夫第一定律。实际上式(1-10)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。

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

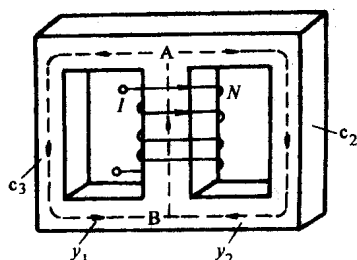


图 1-4 单相壳式变压器的磁路
 $\overline{AB}$ 为中心柱 c_1, c_2, c_3 为
 两侧心柱; y_1, y_2 为磁轭

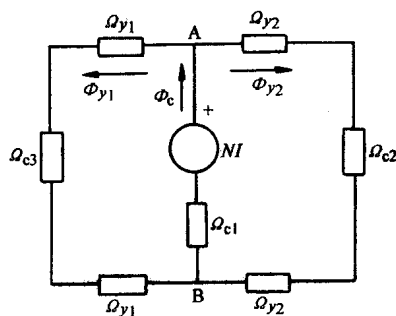


图 1-5 图 1-4 中变压器的等效磁路

当磁通密度不同时 μ 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 1-6 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,其时 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 1-7 所示,这现象称为磁滞现象。如果磁场强度在 $+H_m$ 到 $-H_m$ 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磁通密度。该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 H_c 的大小磁性材料分为软磁材料与硬磁材料。

H_c 小的为软磁材料,它容易被磁化,在较低的外磁场作用下就能产生较高的磁通密度,一旦外磁场消失,其磁性也基本上消失,电机中应用的导磁体,如电工钢片、铸钢、铸铁等均系软磁材料。

H_c 大的为硬磁材料,它不容易磁化,也不容易去磁。一经磁化,当外磁场消失后,它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,常在电机中用作永久磁铁,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(永磁)材料的性能由极限磁滞回线在第二象限内的部分来阐明,称该段曲线为去磁曲线,亦称退磁曲线。永久磁铁磁路和电激励磁路的本质不同在于:后者所提供的磁动势取决于励磁线圈的磁动势,一般说当线圈的电流一定时,磁路的磁动势也就一定;前者磁路的磁动势不是固定的,将视材料的去磁曲线和外磁路的状况而定。永磁电机基本磁路示意图如图 1-8a 所示,其中 PM 为永久磁铁,磁轭 Y 和转子 R 为软磁材料, g 为空气隙。已知软磁材料的磁导率 μ 大于空气磁导率达几千倍,因此永磁的外磁路主要是空气隙。气隙的 μ_0 是常数,其 $B-H$ 关系是一直线,气隙长度不同反映在它的 $B-H$ 直线的斜率不同。如图 1-8b 中气隙线 1 和 2,它和去磁曲线的交点 P_1 、 P_2 就是该永磁电机的工作点,可见同一永磁当外磁路不同时,它提供的磁场强度 H_1 、 H_2 亦是不同的。这是永磁磁路的一个特点。

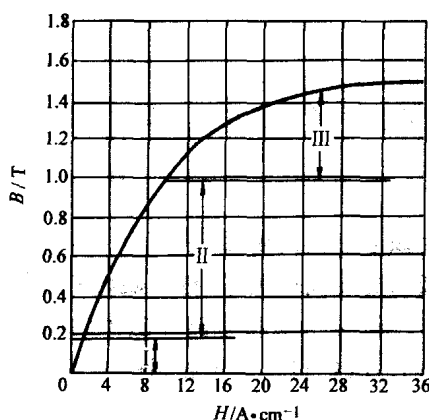


图 1-6 铁磁材料铸钢典型磁化曲线

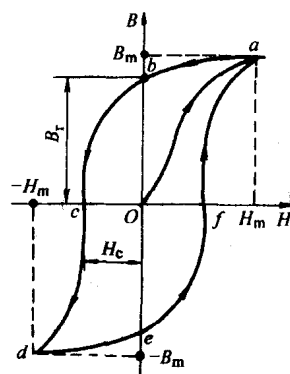


图 1-7 铁磁材料的磁滞回线

永磁材料工作点 P 的 H 、 B 值的乘积称为磁能积,用 (BH) 表示,单位为 J/m^3 。通常永磁材料的磁性能用剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 和最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 三项指标来表征,以大为好。

基本磁化曲线,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 $B-H$ 关系,这种 $B-H$ 曲线称为基本磁化曲线。各种手册及本书中所列出的 $B-H$ 曲线均是基本磁化曲线。

六、铁心损耗

当导磁材料位于交变磁场中被反复磁化时,材料内部的 B 、 H 关系便呈磁滞回线。此时,导磁材料中将引起能量损耗,称为铁心损耗。它分为两部分:磁滞损耗和涡流损耗。

磁滞损耗是导磁体反复被磁化,其分子运动摩擦所消耗的能量。磁滞回线所包含的面积表示了单位导磁材料在磁化一周的进程中所消耗的能量为 p_{hc} ,则有

$$p_{hc} = V \oint H dB \quad (1-17)$$

式中, V 为导磁体的体积。

工程上常用 p_h (单位为 W) 表示每秒消耗的磁滞损耗能量,经验计算公式为

$$p_h = k_h V f B_m^n \quad (1-18)$$

式中, k_h 为由导磁体材料所决定的磁滞损耗常数; f 为磁场交变频率亦即导磁体被反复磁化的频率 ($1/s$); B_m 为磁化过程中最大磁通密度 (T); 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 $n = 2.0$ 。

铁心本身既是导磁体亦是导体,交变磁场在铁心中要感应电动势,它将引起在铁心中流通的涡电流(涡流),涡流在铁心中产生焦耳损耗,即所谓涡流损耗。分析表明,频率越高,磁通密度越大,涡流损耗亦越大;铁心的电阻率越大,涡流流过的路径越长,涡流损耗就越小。为此,铁心常用含硅(增大电阻率)的电工钢片,且使磁通穿过狭细的钢片截面(增长路径)以减小涡流损耗。涡流损耗 p_e 的经验计算公式为

$$p_e = k_e V f^2 \tau^2 B_m^2 \quad (1-19)$$

式中, k_e 为取决于铁心材料的涡流损耗系数; τ 为电工钢片的厚度,电机所用钢片厚度为 $0.35 \sim 0.5mm$,其余符号含义同前。

工程估算时,当电机工作磁通密度在 $(1T < B_m < 1.8T)$ 时,有计算公式为

$$p_{Fe} = p_h + p_e = k_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G \quad (1-20)$$

式中, k_{Fe} 为铁心材料的损耗系数; G 为铁心重量。

由式(1-20)可见,铁心损耗与频率(1.3次方)、磁通密度(平方)和铁心重量成正比。

铁心损耗均转化为热能,使铁心温度升高,为防止电机过热损坏,一方面用电工钢片以减小铁心损耗,另一方面则应采取散热措施来降低铁心温度。

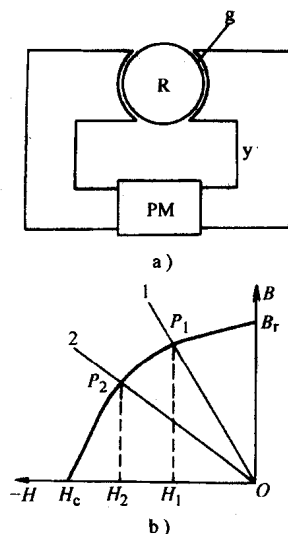


图 1-8 简单的永久磁铁磁路

a) 永磁电机基本磁路示意图

b) 工作图

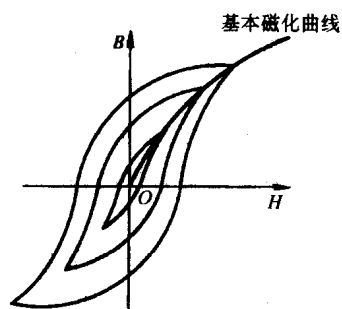


图 1-9 基本磁化曲线

要注意在恒定磁场中的静止导磁体内是不会引起上述能量损耗的。

七、磁场储能

已知磁场是一种特殊形式的物质,磁场中能够储存能量,这能量是在磁场建立过程中,由外部能源的能量转换而来的。电机就是通过这磁场储能来实现机、电能量转换的。

磁场中的体积能量密度 w_m 可由下式确定

$$w_m = \frac{1}{2}BH \quad (1-21)$$

式中, B 和 H 分别为磁场中某点的磁感应强度(T)和磁场强度(A/m); w_m 即为磁场中该点处的能量密度(J/m³)。

显然,磁场的总储能是磁能密度的体积分,即

$$W_m = \int_V w_m dV = \frac{1}{2} \int_V BH dV \quad (1-22)$$

考虑到导磁体的磁导率,式(1-21)可写成

$$w_m = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_r \mu_0} \quad (1-23)$$

旋转电机中定子和转子的磁路均系铁磁材料构成,其磁导率比电机气隙的磁导率要大数千倍。由式(1-22)、式(1-23)可见,虽然气隙的体积远小于定、转子上磁性材料的体积,但磁场的磁能却主要储存在空气隙中。例如电机气隙中的 B_g 为 1T 时,其单位体积的磁场储能将高达 $3.98 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ 。电机空气隙中磁场能量的数值,直接决定着电机可能转换功率的大小,也关系到电机性能的好坏。合理地确定电机各部分的尺寸及选择工作磁通密度,使气隙磁场具有足够的能量,是设计电机时的主要依据之一。

八、电感

电机中的导体都是绕制成各种各样的线圈,线圈中通过电流将建立磁场产生磁通 Φ , 如图 1-10 所示。磁通穿过线圈和线圈匝链形成所谓磁链,常用符号 Ψ 表示。设线圈有 N 匝,流过电流后产生匝链线圈的磁通为 Φ , 则磁链为

$$\Psi = N\Phi \quad (1-24)$$

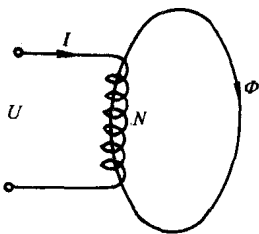


图 1-10 线圈的磁链

显然,磁链与流过线圈的电流 I 之间有正比关系,可表示为

$$\Psi = LI \quad (1-25)$$

或

$$L = \Psi/I \quad (1-26)$$

式中,比例系数 L 称为电感(H)。简言之,一个线圈流过单位电流所产生的磁链称为该线圈的电感。前文已阐明,线圈的磁动势 F 是线圈匝数与流过电流的乘积 NI ,磁通则等于磁动势乘以磁导 Λ ,于是式(1-26)可改写成

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N\Phi}{I} = \frac{N\Lambda F}{I} = \Lambda N^2 \quad (1-27)$$

由式(1-27)可见,电感与线圈的匝数平方成正比,和磁场介质的磁导率成正比,而和线圈所加的电压、电流或频率均无关。

电感有自感和互感之分,图 1-10 表示的为线圈的自感。若有两个或两个以上的线圈处在同一介质的磁场中(如图 1-11 所示),由回路 1 的电流 I_1 所产生而和回路 2 相匝链的磁链用