

普通高等教育“十一五”规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANJI YU TUODONG

电机与拖动

(第二版)

王广惠 王铁光 李树元 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



DIANJI YU TUODONG
电机与拖动
(第二版)

主 编 王广惠 王铁光 李树元
编 写 刘国昌 郭 健
主 审 张爱玲



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”规划教材（高职高专教育）。

全书分为五篇共十八章，主要内容包括直流电机的基本工作原理和结构、基本理论、运行特性、电力拖动基础、电力拖动；变压器的基本原理和构造、运行原理及特性，三相变压器，其他类型的变压器；交流电机理论的共同问题，三相异步电动机的基本原理和结构，异步电动机的运行原理、电力拖动；同步电机，控制电机；电机的发热及冷却，电动机的选择，变压器和电动机的经济运行与维护。每章未附有小结和习题。本书在编写时注意从高职高专的教学实际出发，贯彻少而精、论述准确、利于教学和自学的原则。

本书主要作为高职高专供用电技术、电气技术、工业电气自动化、楼宇自动化等电气类专业的教材，也可作为函授、自考辅导教材和电力行业技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动/王广惠等主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5083-5950-2

I. 电... II. 王... III. ①电机-高等学校: 技术学校-教材②电力传动-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 112394 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

*

2004 年 8 月第一版

2007 年 8 月第二版 2007 年 8 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.25 印张 563 千字

印数 6001—9000 册 定价 36.00 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

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

《电机与拖动》第一版于2004年8月出版,作为高职高专“十五”规划教材,2006年2月第二次印刷。根据教材建设的需要和教学实践中的体会,为了提高教材质量,应及时对教材的内容进行修改和完善。本书修订后亦可作为工科电气工程及其自动化专业、自动化专业的教学参考书。

本次修订力求遵循精选内容、论述更为准确、利于教学和自学的原则,保留了原教材的内容体系,对部分章节的文字叙述、公式推导作了必要的调整,增加了一些例题和习题;并在部分章节前标注了“*”号,以便讲课和自学时选择。

本书第一篇(第1~5章)由北华大学王铁光编写;第二篇(第6~9章)由太原电力高等专科学校刘国昌编写;第三篇(第10~13章)由邢台职业技术学院李树元、郭健编写,绪论以及第四篇(第14~15章)、第五篇(第16~18章)由太原电力高等专科学校王广惠编写。全书由王广惠统稿。

本书由太原理工大学张爱玲教授主审,由王广惠、王铁光、李树元主编。在编写过程中,参考了部分相关教材及技术文献,在此对相关作者表示衷心的感谢。

对于书中的不足之处,恳请广大读者给与批评指正。

编者

2007年6月

主要物理量单位符号

主要物理量单位符号

T——特斯拉
 Wb——韦伯
 Mx——麦克斯韦
 Gs——高斯
 °C——摄氏度
 Ω ——欧姆
 H——亨利
 Hz——赫兹
 A——安培
 V——伏特
 kV——千伏

W——瓦特
 kW——千瓦
 kVA——千伏·安
 kvar——千乏
 rad/s——弧度/秒
 r/s——转/秒
 r/min——转/分
 kg——公斤
 N——牛顿
 N·m——牛顿·米
 m——米

主要符号表

α ——角度
 β ——角度；负荷系数
 γ ——角度；电导率
 δ ——气隙长度
 η ——效率
 θ ——功率角；温度
 λ_m ——磁导
 μ ——磁导率
 ν ——谐波次数
 τ ——极距
 Φ ——磁通
 Φ_0 ——同步机、直流机励磁磁通
 Φ_a ——电枢反应磁通
 Φ_m ——变压器磁通最大值
 Φ_σ ——漏磁通
 ϕ ——功率因数角
 Ψ ——磁链、内功率因数角
 Ω ——机械角速度
 ω ——角频率

A——面积；电负荷
 a ——交流绕组并联支路数；直流绕组并联支路对数；120°复量算子
 B——磁通密度
 B_{av} ——平均磁通密度
 B_δ ——气隙磁通密度
 B_r ——剩磁磁通密度
 b——电纳
 C_e ——电动势常数
 C_M ——转矩常数
 D——直径
 E——电动势有效值
 e——电动势瞬时值
 $E_{\sigma 1}$ 、 $E_{\sigma 2}$ ——变压器一、二次漏磁电动势；异步机定、转子漏磁电动势
 F——磁动势
 F_0 ——空载磁动势
 F_m ——变压器、异步机励磁磁动势
 F_a ——电枢反应磁动势

F_f ——直流机、同步机励磁磁动势

F_δ ——气隙磁动势；

f ——磁动势瞬时值；频率；力

f_v ——高次谐波频率

GD^2 ——飞轮矩

G ——重力

g ——重力加速度

H_c ——矫顽力

H ——磁场强度

h ——高度

I ——电流有效值

I_0 ——空载电流

I_m ——变压器、异步机励磁电流

I_a ——电枢电流

I_K ——短路电流

I_N ——额定电流

I_{st} ——起动电流

I_f ——直流机、同步机励磁电流

i ——电流瞬时值

J ——转动惯量

K ——转向片数

k ——变比

k_A ——自耦变压器变比

k_μ ——磁路饱和系数

k_{ql} ——绕组基波分布系数

k_{yl} ——绕组基波短距系数

k_l ——基波绕组系数

k_m ——过载能力

L ——铁心长度；自感系数

M ——互感系数

m ——相数；质量

N ——电枢总导体数

n ——转子转速

n_1 ——同步转速

n_N ——额定转速

P ——有功功率

P_M ——电磁功率

P_Ω ——机械功率

P_N ——额定功率

p_{Fe} ——铁损耗

p_{Cu} ——铜损耗

p_{ad} ——附加损耗

p_m ——机械损耗

p_f ——励磁损耗

p_0 ——空载损耗

p ——极对数

Q ——无功功率；流量；热量

q ——每极每相槽数

R_f ——励磁回路电阻

R_L ——负载电阻

R_a ——直流机电枢回路电阻

R_m ——磁阻

r_m ——变压器、异步机励磁回路电阻

r_1 、 r_2 ——变压器一、二次电阻；异步机定、转子电阻

r_k ——短路电阻

R_{st} ——起动电阻

r_a ——同步机电枢绕组电阻

S ——视在功率；元件数

S_N ——额定容量

s ——转差率

s_N ——额定转差率

s_m ——临界转差率

T ——时间常数；周期

T_M ——电磁转矩

T_N ——额定转矩

T_L ——负载转矩

T_0 ——空载转矩

T_{max} ——最大转矩

T_{st} ——起动转矩

t ——时间；温度

U ——电压有效值

U_N ——额定电压

ΔU ——电压调整率

u ——电压瞬时值

u_k ——短路电压

u_{ka} 、 u_{kr} ——短路电压有功分量、无功分量

V ——体积

v ——线速度

W ——能量

W_1 、 W_2 ——相绕组串联匝数

W_y ——线圈匝数

x_1 、 x_2 ——变压器、异步机漏电抗

x_m ——励磁电抗

x_a ——电枢反应电抗

x_t ——同步电抗

x_d ——直轴同步电抗

x_q ——交轴同步电抗

y_k ——换向器节距

y ——线圈节距

Z ——阻抗；电机槽数

Z_u ——虚槽数

Z_m ——励磁阻抗

Z_L ——负载阻抗

Z_k ——短路阻抗

目 录

前言

主要物理量单位符号

绪论	1
第一节 电机及电力拖动的作用	1
第二节 电机中铁磁材料的特性	2
第三节 研究电机时常用的基本电磁定律	4

第一篇 直 流 电 机

第一章 直流电机基本工作原理和结构	7
第一节 直流电机的工作原理	7
第二节 直流电机的基本结构	9
第三节 直流电机的铭牌和主要系列	11
第四节 直流电机的电枢绕组	13
小结	19
习题	19
第二章 直流电机的基本理论	21
第一节 直流电机的磁场和电枢反应	21
第二节 直流电机的电枢电动势和电磁转矩	26
* 第三节 直流电机的换向	28
小结	33
习题	33
第三章 直流电机运行特性	35
第一节 直流电机的基本方程	35
第二节 直流发电机特性	39
第三节 直流电动机工作特性	42
小结	48
习题	48
第四章 直流电机电力拖动基础	51
第一节 拖动系统的运动方程	51
第二节 工作机构转矩和飞轮转矩的折算	53
第三节 生产机械的负载特性	56
第四节 他励直流电动机的机械特性	58
第五节 电力拖动系统稳定运行	63

小结	65
习题	65
第五章 直流电动机的电力拖动	68
第一节 他励直流电动机的起动	68
第二节 他励直流电动机的制动	71
第三节 他励直流电动机的调速	78
* 第四节 直流电动机电力拖动的过渡过程	84
小结	90
习题	90

第二篇 变 压 器

第六章 变压器的基本原理和构造	94
第一节 变压器的工作原理及分类	94
第二节 变压器的基本结构	96
第三节 变压器的额定值	101
小结	102
习题	102
第七章 变压器的运行原理及特性	103
第一节 变压器的空载运行	103
第二节 变压器的负载运行	111
第三节 变压器参数的测定	120
第四节 标么值	123
第五节 变压器的运行特性	125
小结	129
习题	130
第八章 三相变压器	132
第一节 三相变压器的磁路系统	132
第二节 三相变压器绕组的连接及连接组标号	133
第三节 三相变压器的空载电动势波形	139
* 第四节 三相变压器的不对称运行	142
第五节 变压器的并联运行	150
* 第六节 变压器的瞬变过程	154
小结	160
习题	160
第九章 其他类型的变压器	162
第一节 自耦变压器	162
第二节 三绕组变压器	165
* 第三节 整流变压器	171

小结.....	173
习题.....	173

第三篇 异步电机

第十章 交流电机理论的共同问题.....	174
第一节 交流绕组的基本知识.....	174
第二节 三相单层绕组.....	178
第三节 三相双层绕组.....	180
第四节 交流绕组的感应电动势.....	184
第五节 单相绕组的磁动势.....	190
第六节 三相绕组的磁动势.....	197
小结.....	204
习题.....	205
第十一章 三相异步电动机基本原理和结构.....	207
第一节 三相异步电动机的工作原理和运行状态.....	207
第二节 三相异步电动机的基本结构.....	208
第三节 三相异步电动机的额定值及主要系列.....	213
小结.....	214
习题.....	215
第十二章 异步电动机的运行原理.....	216
第一节 转子静止时的三相异步电动机.....	216
第二节 转子旋转时的三相异步电动机.....	220
第三节 三相异步电动机参数的测定.....	226
第四节 三相异步电动机的功率和转矩.....	230
第五节 三相异步电动机的工作特性.....	233
小结.....	234
习题.....	235
第十三章 异步电动机的电力拖动.....	237
第一节 三相异步电动机的机械特性方程.....	237
第二节 三相异步电动机的固有特性和人为特性.....	240
第三节 三相鼠笼式异步电动机的起动.....	244
第四节 三相绕线式异步电动机的起动.....	251
第五节 三相异步电动机的调速.....	254
第六节 三相异步电动机的制动.....	263
* 第七节 单相异步电动机.....	269
小结.....	274
习题.....	275

第四篇 同步电机和控制电机

第十四章 同步电机	278
第一节 同步电机的基本工作原理	278
第二节 同步电机的基本结构	280
第三节 同步发电机	282
第四节 同步发电机有功功率的调节	287
第五节 同步电动机	291
第六节 同步电机无功功率的调节及 V 形曲线	294
第七节 同步电动机的起动	298
小结	299
习题	300
第十五章 控制电机	301
* 第一节 测速发电机	301
* 第二节 伺服电动机	305
* 第三节 自整角机	310
* 第四节 步进电动机	315
* 第五节 小功率同步电动机	318
小结	321
习题	322

第五篇 电动机的选择及经济运行

第十六章 电机的发热及冷却	323
第一节 电机的温升及温升限度	323
第二节 变压器的发热及冷却	324
第三节 旋转电机的发热及冷却	327
小结	328
习题	328
第十七章 电动机的选择	329
第一节 电动机的定额	329
第二节 连续定额电动机额定功率的选择	331
第三节 短时定额、断续周期定额电动机额定功率的选择	335
* 第四节 用统计法估算机床电动机的功率	338
第五节 电动机类型的选择	339
小结	341
习题	342
第十八章 变压器和电动机的经济运行与维护	343

* 第一节	变压器的经济运行.....	343
第二节	变压器经济运行的措施.....	348
* 第三节	电动机的经济运行.....	349
第四节	电动机的维护.....	353
小结		355
习题		356
参考文献		357

绪 论

第一节 电机及电力拖动的作用

电能是世界上应用最为广泛的二次能源,它具有便于生产、传输、变换、控制以及对环境无污染等优点。利用电机实现电力拖动是工业企业完成加工工艺和生产过程的关键手段。

一、电机的主要用途及分类

电机是根据电磁感应原理实现机电能量转换的电力机械设备。在发电厂,由原动机带动发电机旋转,发电机可以输出交流电功率;在输配电系统中,为了节省材料并减少输电线损耗,必须采用变压器,使交流发电机出口端的电压等级升高,将电能进行远距离传输后,再降低电压等级,供用户使用;在用户端,电动机将电能转换成机械能,为生产机械提供动力。在电气传动控制系统中,广泛采用各种控制电机实现指示、随动、反馈等控制。根据电机的用途及结构特点,电机可分成以下各类:

- (1) 变压器(静止的电机)。
- (2) 交流电机:包括同步电机、异步电机。
- (3) 直流电机:包括直流发电机、直流电动机。
- (4) 控制电机:包括测速发电机、伺服电动机、自整角机、步进电机等。

二、电力拖动的主要作用

随着工业现代化的发展和自动化水平的提高,工业生产过程中,主要采用电动机拖动生产机械。与其他形式的原动机相比较,电动机有许多优点。例如:①不同类型的电动机可提供各种不同的机械特性,满足各类生产机械的需要;②电动机操作简单,便于进行起动、调速、反转、制动等控制;③异步电动机结构简单、规格齐全、价格低、效率高、便于维护。此外,由电动机拖动的生产机械可以采用集中传动、单独传动、多电动机传动等方式。

利用电动机把从电网吸取的电功率转换为轴上输出的机械功率,从而带动生产机械工作的这一过程,称为电力拖动或电气传动。采用电气传动,是合理利用能源,促进生产过程向机械化、自动化迈进的有效手段;采用电气传动,改善了劳动条件,有助于批量化生产,提高产品质量、降低成本;此外,电气传动还广泛渗入社会生活的各个方面,包括社会的信息化和家庭的电气化,有助于改善人们的生活质量。

完成电气传动功能的一整套设备总称电力拖动装置,大体由以下三部分组成:

- (1) 电动机 包括异步电动机、直流电动机、同步电动机。
- (2) 生产机械 包括传动机构和工作机构。
- (3) 控制系统 包括电气控制设备、控制电机。

电力拖动装置中的生产机械作为电动机的负载,靠传动机构将电动机轴上输出的机械功率传递给工作机构。常见的传动机构有齿轮传动、皮带传动、联轴器传动、卷筒—钢绳传动等,不同的传动方式,其使用场合不同、传动效率不同、工作原理不同。工作机构是实现电气传动的主体,例如泵与风机的叶轮、机床的主轴、轧钢机的轧辊、卷扬机、电力机车等。

控制系统的主要作用是,应用电力电子技术和计算机控制技术,从对电动机的控制入手,实现对生产机械运行特性的控制。控制系统的设计直接关系到电力拖动装置运行的可靠性和生产过程的自动化水平。

第二节 电机中铁磁材料的特性

电机是依据电磁感应原理实现能量转换的,其内部要构成完整的磁路,独立的电路,带电导体之间要相互绝缘,还要有构成电机整体的结构部分。因此,制造电机要用到以下四种材料:①电阻率低的导电材料;②导磁性能高的铁磁材料;③介电强度高、耐热性好的绝缘材料;④机械强度高的结构材料。本节仅讨论铁磁材料的特性。

一、磁导率及磁场强度

将一个通电线圈置于不同的介质中,可以发现其磁感应强度不同,说明不同的介质其导磁性能不同。表征物质导磁性能的物理量用符号 μ 表示,称为磁导率。磁导率的单位是 H/m 。物质按导磁性能强弱可分为三类:顺磁性物质,如空气、铝、铬等,其磁导率略大于真空磁导率 μ_0 , $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}\text{H/m}$;逆磁性物质,如铜、氢、铅等,其磁导率略小于真空磁导率 μ_0 ;铁磁性物质,如铁、钴、镍、钢等,其磁导率 μ_{Fe} 比真空磁导率 μ_0 大得多,并且不为常数。

磁场强度用符号 H 表示,其定义为 $H=\frac{B}{\mu}$ (0-1)

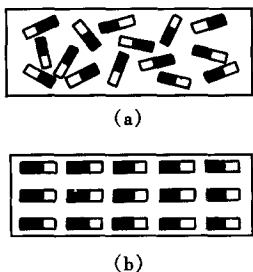


图 0-1 铁磁物质的磁畴
(a) 未被磁化; (b) 完全磁化

其中,磁通密度 B 的单位是 T , $1\text{T}=10^4\text{Gs}$;磁场强度 H 表示单位长度磁路上作用的磁动势,磁动势的单位是 A ,磁场强度的单位是 A/m 。当磁通密度一定时,磁导率越大,所需的磁动势越小。为此,电机中采用了导磁性能好的铁磁材料构成主磁路,如硅钢片、钢板、铸钢,其磁导率 $\mu_{\text{Fe}}\approx(2000\sim 6000)\mu_0$ 。

二、磁化曲线

铁磁物质的磁导率之所以很大,是由于铁磁物质内部存在着许多天然磁畴,未被磁化时,各磁畴杂乱无章地排列着,对外不显磁性,如图 0-1 (a) 所示。当铁磁物质放入磁场后,在外界磁场的作用下,各磁畴逐渐转向,形成附加磁场,与外磁场方向一致,使外磁场增强,如图 0-1 (b) 所示。这种现象称为磁化。

在磁化过程中,磁通密度 B 随磁场强度 H 变化的关系曲线称为磁化曲线。铁磁材料的磁化曲线 $B=f(H)$ 为非线性关系,如图 0-2 所示。曲线大致分为两段:第一段 oa 为线性段,磁通密度较低,当外磁场由零开始增加时,能引起相应数量的磁畴开始转向与外磁场方向一致,使磁场增强,因此磁通密度随磁场强度几乎成正比上升,即: $B=\mu H$, $\mu=\text{常数}$;第二段 ab 为饱和段,磁通密度较高,由于大部分磁畴已与外磁场方向渐趋一致,当外磁场继续增加时,可转向的磁畴越来越少,因此磁通密度已不再随磁场强度成正比增加,这种现象称为磁饱和。此时,磁化曲线的斜率逐渐变得平缓,磁导率 μ 逐渐减小。 b 点称为饱和点。 b

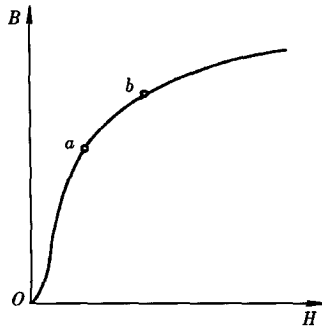


图 0-2 铁磁材料的磁化曲线

点以后,所有的磁畴几乎都已与外磁场方向一致, B 随 H 的增加变得非常缓慢,铁磁材料的磁导率 μ 进一步减小。

在设计电机时,为了充分利用铁磁材料,磁通密度不能选得太低,而为了减小励磁安匝数,应使磁导率较高,磁通密度又不能选得太高,综合考虑,通常把磁通密度 B 值选择在 a 点(称为膝点)附近。

三、磁滞回线

由试验可以证明,对铁磁材料进行交变磁化时,其内部的磁畴在随外磁场转向、排列的过程中,相互之间要产生摩擦,因此,磁通密度 B 的变化总是滞后于磁场强度 H 的变化,称之为磁滞现象。如图0-3所示。由图可见:

(1) 当增加励磁电流,使磁场强度 H 由零上升到最大值 $+H_m$ 时,磁通密度 B 沿 oa 曲线变化, a 点为 (H_m, B_m) 。

(2) 当励磁电流逐渐减小到零并反方向增加时,磁场强度由 $+H_m$ 向 $-H_m$ 变化,磁化曲线的轨迹为 $\overline{abcd}$ 。 b 点为 $(0, B_r)$,磁场强度已减小到零,但磁通密度 $B_r > 0$, B_r 称为剩磁。虽然外磁场消失,但磁畴未能全部恢复原状,顺外磁场排列的部分磁畴被保留下来,使 $B_r = \overline{ob}$ 。 c 点为 $(-H_c, 0)$,磁场强度变化到 $-H_c$ 时,磁通密度才减小到零,显然 H_c 是消除剩磁所需的反向磁场强度,称为矫顽力。 $H_c = \overline{oc}$ 。

(3) 当磁场强度由 $-H_m$ 向 H_m 变化时,磁化曲线的轨迹为 $\overline{defa}$ 。分析方法同(2),且 $\overline{oe} = \overline{ob}$; $\overline{oc} = \overline{of}$ 。

由于磁滞现象,磁化曲线的上升支和下降支不重合,二者围成对称于原点的闭合曲线 $\overline{abcdefa}$,称为磁滞回线。对同一种材料取不同的 H_m 值可测得若干磁滞回线,过原点将所有磁滞回线的顶点连接起来,就可得到一条工程上采用的基本磁化曲线。不同的铁磁材料,其磁滞回线形状各不相同,可大致分为两类。软磁材料,如铸铁、铸钢、硅钢片等,其磁滞回线的面积较窄, B_r 及 H_c 均较小, μ_{Fe} 较大,用来制造普通电机和变压器的铁心;硬磁材料,如铝、镍、钴、铁的合金和稀土和金等,其磁滞回线的面积较宽, B_r 及 H_c 均较大,用来制造永久磁铁、磁滞电机等。

四、磁滞损耗与涡流损耗

铁磁材料在交变磁化过程中,其内部磁畴在不停地转动、相互摩擦的同时,消耗一定的能量,这种能量损失称为磁滞损耗。可以证明,单位体积内的磁滞损耗正比于磁场交变的频率 f 和磁滞回线的面积。不同的铁磁材料,磁滞损耗不同。例如,软磁材料的磁滞回线面积较窄,磁滞损耗小。

当通过铁心的磁通交变时,根据电磁感应定律,铁心中将产生感应电动势并呈现涡流,如图0-4所示。

涡流在铁心中引起的损耗称为涡流损耗。为了减小涡流损耗,在钢中加入4%左右的硅以增大铁心的电阻率,将整块铁心

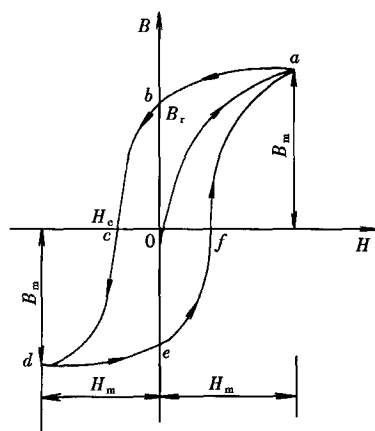


图0-3 铁磁材料的磁滞回线

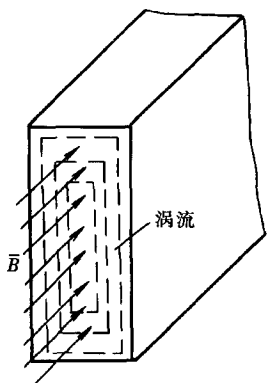


图0-4 铁心中的涡流

分割成相互绝缘的钢片以加长涡流的路径, 因此, 电机和变压器的铁心都用 0.35mm 或 0.5mm 厚的硅钢片叠制。

通常把磁滞损耗和涡流损耗合在一起, 统称为铁耗, 用 p_{Fe} 表示。对于某一种材料, 铁耗的大小与铁心中磁通交变频率 f 及磁通密度 B_m 有关, 即

$$p_{Fe} \propto f^\alpha B_m^2 \quad (0-2)$$

式中, $1 < \alpha < 2$, 对于硅钢片, $\alpha = 1.2 \sim 1.6$ 。

第三节 研究电机时常用的基本电磁定律

电机是通过电磁感应实现能量转换的机械设备。研究电机时, 为简便计, 用磁路和电路分别代替磁场和电场, 常用的基本电磁定律如下。

一、电路定律

1. 基尔霍夫第一定律

在电路的节点上, 电流瞬时值的代数和等于零, 即

$$\sum i = 0 \quad (0-3)$$

列电流方程时, 先确定电流的正方向, 对于正弦交流电路, 电流用复数 $\dot{I}$ 表示。

2. 基尔霍夫第二定律

在闭合电路中, 沿着回路的巡行方向, 电压降的代数和等于电动势的代数和, 即

$$\sum u = \sum e \quad (0-4)$$

如果把电压看成负的电动势, 则回路中的电动势的总和等于零。列回路方程时, 先规定电流、电压降、电动势的正方向, 再选定回路的巡行方向。凡电动势和电压降与巡行方向一致时取正号; 反之取负号。对于正弦交流电路, 其电流、电压降、电动势分别用复数 $\dot{I}$ 、 $\dot{U}$ 、 $\dot{E}$ 表示。

二、磁路定律

1. 磁路欧姆定律

磁路的磁通 Φ 等于磁动势 F 与磁导 λ_m 的乘积, 磁导 λ_m 与磁阻 R_m 互为倒数, 即

$$\Phi = F \lambda_m = \frac{F}{R_m} \quad (0-5)$$

电机的主磁路为分段磁路, 由于各部分的材料、磁路长度不同, 因而磁导不同, 用 λ_{mk} 表示第 k 段磁路的磁导, 单位为 H, 磁导与磁导率成正比, 与磁路长度成反比, 式 (0-5) 还可以写成

$$\Phi = F \sum_{k=1}^n \lambda_{mk} \quad (0-6)$$

2. 磁路基尔霍夫第一定律

在磁路节点上, 磁通的代数和等于零, 即

$$\sum \Phi = 0 \quad (0-7)$$

式 (0-7) 表明, 进入闭合面的磁通等于离开闭合面的磁通。如果磁通均按正弦规律变化, 可用复数 $\dot{\Phi}$ 表示。

3. 安培环路定律

闭合磁路中, 磁场强度矢量的线积分等于该闭合回路所包围的各电流的代数和, 即

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad (0-8)$$

式中, 电流的方向与磁场强度的方向符合右手螺旋规律, 如图 0-5 所示, i_1 、 i_3 取正值, i_2 取负值。安培环路定律表明, 载流导体周围必然存在着磁场。

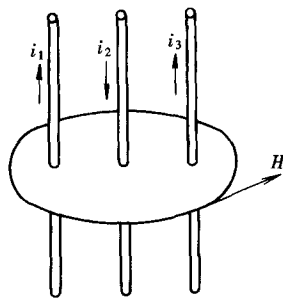


图 0-5 安培环路定律

三、电磁感应定律

当线圈的磁链发生变化时, 会在线圈中感生电动势, 单位为 V。线圈磁链的变化又分为两种情况。

(1) 线圈和磁场相对静止, 而线圈中的磁通本身随时间交变, 此时, 在线圈中感生变压器电动势 e , e 的大小正比于磁链随时间的变化率, 即

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d\phi}{dt} \quad (0-9)$$

式中, W 为线圈的匝数; ψ 为线圈的磁链, $\psi = W\phi$; 负号表明感应电动势的方向总是企图产生一个阻止磁链变化的电流, 当磁链增加时, $\frac{d\psi}{dt} > 0$, $e < 0$, 与指定正方向相反, 产生去磁电流; 当磁链减少时, $\frac{d\psi}{dt} < 0$, $e > 0$ 与指定正方向相同, 产生助磁电流, 如图 0-6 所示。

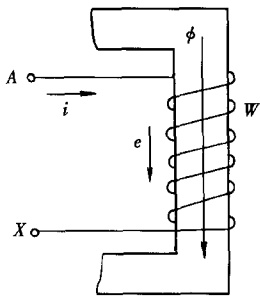


图 0-6 电磁感应
定律的规定正方向

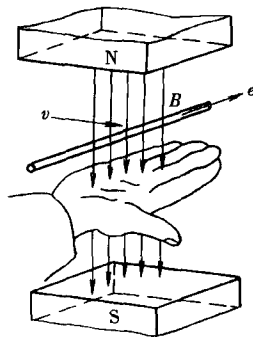


图 0-7 右手发电机定则

(2) 恒定的磁场在空间按一定规律分布, 导体以匀速运动切割磁力线时, 在导体中感生速率电动势 e , e 的大小正比于磁通密度和导体的切割速度, 即

$$e = Blv \quad (0-10)$$

式中, B 为导体所在处的磁通密度; l 为导体的有效长度; v 为导体相对磁场运动的线速度。

速率电动势的方向符合右手发电机定则, 如图 (0-7) 所示。伸开右手掌, 拇指与其余四指相互垂直, 掌心迎着磁力线, 拇指为导体运动方向, 四指所指的方向为速率电动势的方向。

四、安培力定律

当磁场与电流相互作用时, 必然产生电磁力 f , 单位为 N, 即