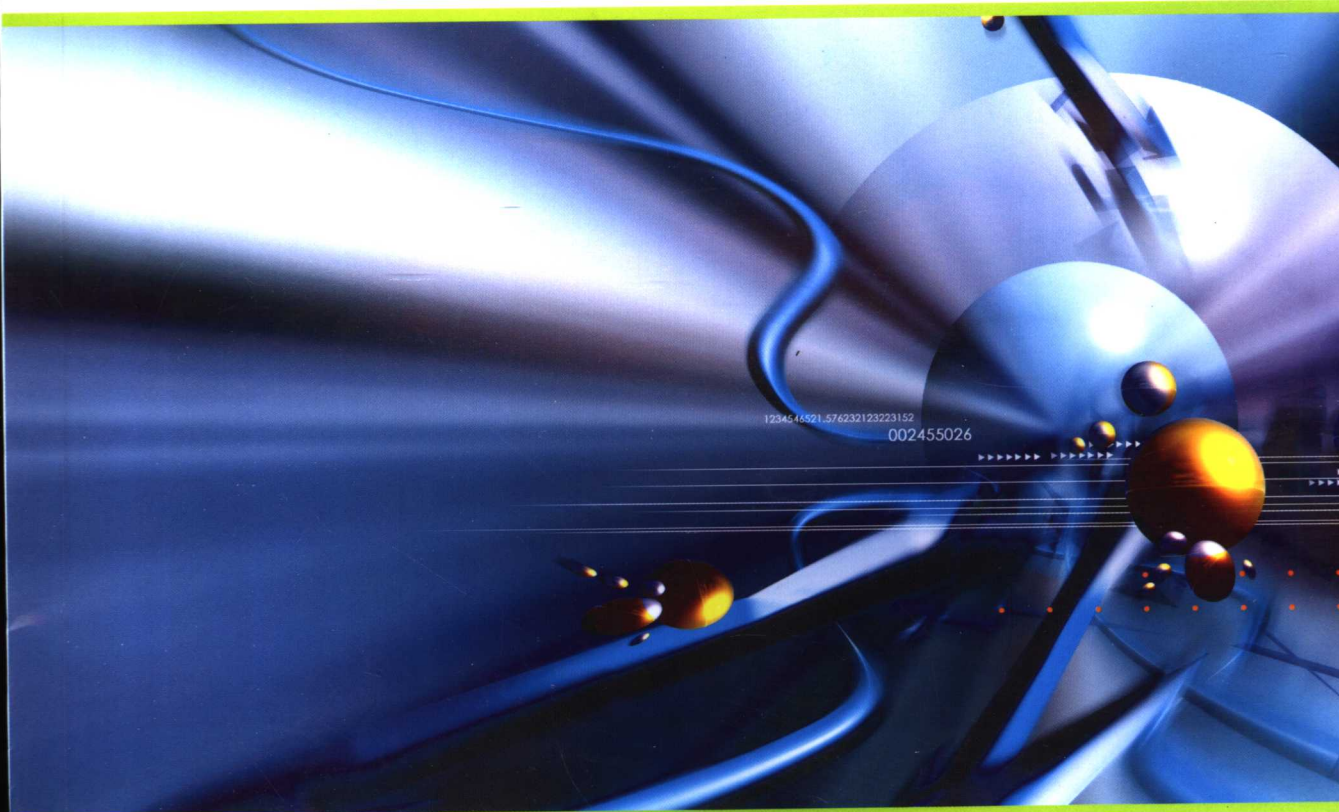


21世纪高等院校规划教材

电机与电力拖动

DIANJI YU DIANLI TUODONG

赵影 主编



国防工业出版社
National Defense Industry Press

21 世纪高等院校规划教材

电机与电力拖动

赵影 主编

吴凤英 李季 李超 信建国 郭长勇 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动 / 赵影主编. —北京: 国防工业出版社, 2006. 7

21 世纪高等院校规划教材

ISBN 7-118-04500-4

I. 电... II. 赵... III. ①电机—高等学校—教材
②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 032539 号

※

国防工业出版社 出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 21¼ 字数 483 千字
2006 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

科学技术的发展,要求人们掌握的知识和具备的能力与素质不断提高。为适应这种发展的需要,多年来,高等教育课程体系进行了整体优化,科学协调,知识结构的重新组合和分配,这样使得原有的内容也要进行调整,在保证功能基本不变的情况下精选和提炼。

电机与电力拖动是一门重要的专业基础课,也是学生专业素质形成的关键性课程,具有对象具体、理论性强又较为抽象,同时与工程实际密切相关的特点。在目前教改带来的课程教学课时大为减少,但又要保证其基本教学内容不变的情况下,我们根据培养 21 世纪工程应用型人才的需要,总结多年来从事本课程教学的工作,结合其课程变化和教学改革的经验,从加强能力培养,注重基础知识,面向实际应用进行了本书的编写工作。在本书的编写工作中,我们力求从应用角度出发,着重分析各种电机的工作原理和运行特性,以及电机稳态运行的基本电磁规律和能量转换规律,着重讲述电力拖动中电动机为满足不同工艺要求在起动、调速、制动等状态下的工作情况,以培养学生的工程观点和处理一些实际问题的工程分析方法。为使学生较好地掌握电机的运行特性,以便今后更好地控制电机,我们对各种电机的结构也作了一定深度的介绍,而对电机设计和制造工艺涉及不多,本书分为 11 章内容,以直流电机、异步电机、同步电机、变压器 4 种通用电机和交流、直流电机的电力拖动为主体,力求体现深入浅出,既便于教学也便于学生理解。本书还介绍了电机与电力拖动的一些基本实验。

参加本书编写的有赵影(主编)、吴凤英(第 1 章、第 2 章、第 11 章)、赵影(第 3 章、第 4 章、第 8 章并统稿)、李季(第 5 章、第 10 章)、李超(第 6 章、第 7 章)、信建国(第 9 章)、郭长勇(实验部分)。

本书经黄孙伟仔细审阅,并提出了宝贵的修改意见;夏彬进行了部分章节的绘图和计算机处理;李季与信建国最后进行了文字和图形的整理。

由于编者学识有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2005 年 12 月

符号表

A ——电动机的散热系数	F ——励磁磁动势、拖动力
B ——磁感应强度	FC ——电动机负荷持续率
B_1 ——气隙磁场的幅值	F_0 ——空载磁动势
B_{av} ——平均磁通密度	F_1 ——磁动势最大值
B_r ——剩磁感应强度	F_a ——电枢磁动势
B_δ ——气隙磁感应强度	F_{ad} ——直轴磁动势
$\cos\varphi_N$ ——额定功率因数	F_{aq} ——交轴磁动势
C ——电动机的热容量	F_f ——励磁磁动势
C_e ——涡流损耗系数	F_m ——磁动势最大值
C_h ——磁滞损耗系数	F_{qm} ——整距分布线圈组磁动势最大值
C_{Fe} ——铁损耗系数	F_{pm} ——相绕组磁动势最大值
D ——皮带轮直径	F_L ——阻力
e ——感应电动势	F_U, F_V, F_W ——三相绕阻磁动式
E ——导体感应电动势的有效值	GD^2 ——飞轮矩
E_+, E_-, E_0 ——正序、负序和零序电动势	G_m ——磁导
E_0 ——空载电势	H ——磁场强度
E_{2s} ——转子旋转时的转子绕组感应电动势	H_c ——矫顽磁力
E_1 ——变压器一次侧电动势	H_δ ——气隙磁场强度
E_2 ——变压器二次侧电动势	i_0 ——空载电流
$\dot{E}_a$ ——电枢反应电动势	I_1 ——变压器的一次电流
E_{ad}, E_{aq} ——直轴、交轴电枢电动势	I_2 ——变压器的二次电流
$\dot{E}_\sigma$ ——漏磁电动势	I_a ——电枢电流
E_ϕ ——相电动势	I_d ——直轴电枢电流
$\sum E$ ——线圈组电动势	I_f ——励磁电流
f ——电网的频率	I_{fN} ——额定励磁电流
f_1 ——定子感应电动势频率	I_q ——交轴电枢电流
f_2 ——转子感应电动势频率	I_N ——额定电流
f_N ——额定频率	j ——转速比
	J ——转动惯量
	k_p ——分布系数
	k_u ——电压下降系数

k_y ——短距系数
 k_w ——绕组系数
 m ——绕组相数
 n ——电机转速
 n_1 ——同步转速
 n_N ——额定转速
 N ——线圈匝数
 N_1 ——变压器一次侧绕组的匝数
 N_2 ——变压器二次侧绕组的匝数
 p ——电机的极对数
 p_0 ——变压器空载损耗
 P_{Mmax} ——电磁功率最大值
 p_h ——磁滞损耗
 p_m ——机械损耗
 p_s ——附加损耗
 p_{Cu} ——变压器铜损
 p_{Fe} ——变压器铁损
 P_1 ——输入功率
 P_2 ——输出功率
 P_{all} ——平均功率
 P_L ——负载功率
 P_M ——电磁功率
 P_N ——额定功率
 q ——每极每相槽数
 Q ——单位时间产生的热量
 r_1 ——一次绕组的电阻
 r_2 ——二次绕组的电阻
 r_k ——变压器短路电阻
 r_m ——变压器励磁电阻
 R_a ——电枢电阻
 R_m ——磁路磁阻
 s ——转差率
 S ——电动机工作制
 S_N ——额定容量
 t_s ——电动机停机时间
 t_w ——电动机运行时间
 T_s ——起动转矩

T_{sys} ——比整步转矩
 T_L ——负载转矩
 T_N ——额定转矩
 U ——端电压
 U_+, U_-, U_0 ——正序、负序和零序电压
 U_1 ——变压器一次侧电压
 U_2 ——变压器二次侧电压
 U_{20} ——变压器二次侧空载电压
 U_{fN} ——额定励磁电压
 U_N ——额定电压
 x_{o1} ——一次绕组的漏电抗
 x_{o2} ——二次绕组的漏电抗
 x_d ——直轴同步电抗
 x_q ——电枢反应电抗
 x_q ——交轴同步电抗
 x_s ——同步电抗
 y ——线圈节距
 z ——齿轮齿数
 Z ——定子槽数
 Z_+, Z_-, Z_0 ——正序、负序和零序阻抗
 Z_0 ——空载阻抗
 Z_1 ——变压器一次侧漏阻抗
 Z_2 ——变压器二次侧漏阻抗
 Z_k ——短路阻抗
 Z_m ——励磁阻抗
 Z_L ——负载电阻
 α ——槽距角
 η_m ——生产机械效率
 η_t ——传动机构效率
 η_N ——额定效率
 θ ——功率角
 θ_i ——电动机初始温升
 θ_s ——电动机稳定温升
 θ_M ——电动机最高温升
 λ_m ——电动机过载倍数
 μ ——磁导率
 μ_0 ——真空磁导率

μ_r ——相对磁导率

ρ ——回转半径

τ ——极距

Φ ——主磁通

Φ_m ——每极磁通量

Φ_0 ——主磁极磁通

Φ_δ ——漏磁通

Φ_{ad}, Φ_{aq} ——直轴、交轴电枢磁通

φ ——外功率因数角

ψ ——内功率因数角

Ω ——角速度

目 录

第 1 章 磁路	1
1.1 磁场的基本物理量	1
1.1.1 磁感应强度	1
1.1.2 磁通	1
1.1.3 磁场强度与磁导率	2
1.2 铁磁物质的磁性能	2
1.2.1 铁磁材料的高导磁性	2
1.2.2 铁磁材料的磁饱和性	3
1.2.3 铁磁材料的磁滞性	4
1.2.4 交变磁通下的铁芯损耗	6
1.3 磁路和磁路定律	7
1.3.1 磁路的基本概念	7
1.3.2 磁路的基本定律	7
1.4 磁路计算	10
1.4.1 直流磁路的计算	10
1.4.2 交流磁路的特点	14
思考题与习题	14
第 2 章 电力拖动系统的动力学基础	17
2.1 概述	17
2.2 电力拖动系统的运动方程式	17
2.2.1 单轴拖动系统的运动方程式	17
2.2.2 多轴旋转拖动系统的折算	21
2.2.3 平移运动系统的折算	23
2.2.4 升降运动系统的折算	24
2.3 电力拖动系统的暂态过程	28
2.3.1 转速变化规律 $n=f(t)$	28
2.3.2 电磁转矩的变化规律 $T=f(t)$	29
2.3.3 电枢电流的变化规律 $I_a=f(t)$	30
2.4 生产机械的负载转矩特性	30

2.4.1 恒转矩负载特性	30
2.4.2 通风机负载特性	31
2.4.3 功率负载特性	31
思考题与习题	32
第3章 直流电机基本理论	35
3.1 直流电机的工作原理	35
3.1.1 直流发电机的工作原理	35
3.1.2 直流电动机的工作原理	36
3.2 直流电机的基本结构和额定值	37
3.2.1 直流电机的基本结构	37
3.2.2 直流电机的额定值	40
3.3 直流电机的电枢绕组	41
3.3.1 有关技术名词	41
3.3.2 单叠绕组连接示例	42
3.4 直流电机的磁场	44
3.4.1 直流电机的励磁方式	45
3.4.2 直流电机的空载磁场	45
3.4.3 直流电机负载时的磁场和电枢反应	47
3.5 直流电机的感应电动势和电磁转矩	49
3.5.1 电枢绕组的感应电动势	49
3.5.2 电枢绕组的电磁转矩	50
3.6 直流电动机稳态运行时的基本方程式和工作特性	51
3.6.1 直流电动机稳态运行时的基本方程式	51
3.6.2 直流电动机的工作特性	54
3.7 他励直流电动机的机械特性方程	57
3.8 直流发电机稳态运行时的基本方程式和运行特性	58
3.8.1 直流发电机稳态运行时的基本方程式	58
3.8.2 直流发电机的运行分析	61
3.9 直流电机的换向	64
3.9.1 直流电机的换向过程	64
3.9.2 直流电机的直线换向、延迟换向、超越换向	65
3.9.3 改善换向的方法	66
3.9.4 环火与补偿绕组	67
思考题与习题	67
第4章 直流电动机的电力拖动	71
4.1 他励直流电动机的机械特性	71

4.1.1	固有机械特性	71
4.1.2	人为机械特性	72
4.1.3	电力拖动系统稳定运行的条件	74
4.2	他励直流电动机的起动和反转	76
4.2.1	他励直流电动机的起动	76
4.2.2	他励直流电动机的反转	80
4.3	他励直流电动机的调速	80
4.3.1	电枢串电阻调速	80
4.3.2	弱磁调速	81
4.3.3	改变电枢端电压调速	81
4.3.4	调速的性能指标	82
4.4	他励直流电动机的制动	85
4.4.1	能耗制动	86
4.4.2	反接制动	88
4.4.3	回馈制动	90
4.5	串励直流电动机的电力拖动	92
4.5.1	串励直流电动机的机械特性	92
4.5.2	串励直流电动机的起动与调速	94
4.5.3	串励直流电动机的电气制动	94
	思考题与习题	95
第5章	变压器	99
5.1	变压器的工作原理和结构	99
5.1.1	变压器的工作原理	99
5.1.2	变压器的分类	100
5.1.3	变压器的基本结构	100
5.1.4	变压器的额定值	103
5.2	变压器的空载运行	104
5.2.1	空载时的电磁物理现象	104
5.2.2	正方向规定	105
5.2.3	空载时的电磁关系	105
5.2.4	励磁电流	107
5.2.5	相量图、等效电路	108
5.3	变压器的负载运行	109
5.3.1	负载时的电磁物理现象	109
5.3.2	基本方程式	110
5.3.3	折算	111

5.3.4	折算后的基本方程式、等效电路和相量图	113
5.3.5	Γ形等效电路和简化等效电路	113
5.4	变压器参数的试验测定	115
5.4.1	空载试验	115
5.4.2	短路试验	116
5.5	变压器的运行特性	118
5.5.1	外特性和电压调整率	118
5.5.2	损耗与效率特性	120
5.6	三相变压器	121
5.6.1	三相变压器的磁路系统	122
5.6.2	三相变压器的电路系统	123
5.6.3	三相变压器绕组联结法和磁路系统对电势波形的影响	126
5.6.4	变压器的并联运行	128
5.7	特殊变压器	131
5.7.1	三绕组变压器	131
5.7.2	自耦变压器	133
5.7.3	仪用互感器	134
	思考题与习题	136
第6章	交流电机基础	139
6.1	交流电机	139
6.1.1	交流电机的主要形式	139
6.1.2	三相同步发电机	139
6.1.3	三相异步电动机	140
6.2	交流电机的绕组	140
6.2.1	交流电机绕组的基本要求和概念	140
6.2.2	三相单层绕组	142
6.2.3	三相双层绕组	145
6.3	正弦磁场下交流绕组的电动势	146
6.3.1	一根导体的电动势 E_c	146
6.3.2	整距线圈的电动势	148
6.3.3	短距线圈的电动势	149
6.3.4	线圈组电动势	149
6.3.5	相电动势和线电动势	150
6.4	交流绕组中的谐波电势	151
6.4.1	谐波电势的影响	151
6.4.2	削弱谐波电势不良影响的方法	152

6.5 单相绕组的磁动势——脉振磁动势	153
6.5.1 整距集中线圈的基波磁动势	153
6.5.2 整距分布线圈组的磁动势	155
6.5.3 一组双层短距分布绕组的基波磁动势	155
6.5.4 相绕组的磁动势	156
6.6 三相绕组的磁动势——旋转磁动势	157
思考题与习题	159
第7章 异步电动机	162
7.1 三相异步电动机的基本结构及工作原理	162
7.1.1 三相异步电动机的基本结构	162
7.1.2 三相异步电动机的工作原理	164
7.1.3 三相异步电动机的铭牌和主要系列	165
7.2 三相异步电动机的空载运行	167
7.2.1 空载运行时的电磁关系	167
7.2.2 空载运行时定子电压平衡关系	168
7.3 三相异步电动机的负载运行	170
7.3.1 负载运行时的电磁关系	170
7.3.2 转子绕组各电磁量	170
7.3.3 磁动势平衡方程	173
7.3.4 电动势平衡方程	174
7.4 三相异步电动机的等效电路和相量图	174
7.4.1 折算	174
7.4.2 等效电路	176
7.5 三相异步电动机的功率和电磁转矩	178
7.5.1 功率平衡	178
7.5.2 转矩平衡	179
7.6 三相异步电动机的参数测定	181
7.6.1 空载试验	181
7.6.2 短路试验	183
7.7 单相异步电动机	184
7.7.1 单相异步电动机的工作原理	184
7.7.2 单相异步电动机的主要类型	185
思考题与习题	187
第8章 三相异步电动机的电力拖动	189
8.1 三相异步电动机的机械特性	189

8.1.1	三相异步电动机机械特性的表达式	189
8.1.2	机械特性	191
8.2	三相异步电动机的起动	195
8.2.1	三相异步电动机对起动的要求	195
8.2.2	笼型异步电动机的降压起动	195
8.2.3	起动性能改善的笼型异步电动机	200
8.2.4	绕线转子异步电动机的起动	201
8.3	三相异步电动机的调速	207
8.3.1	三相异步电动机的变极调速	207
8.3.2	三相异步电动机的变频调速	210
8.3.3	改变转差率调速	212
8.4	三相异步电动机的制动	215
8.4.1	三相异步电动机的反接制动	215
8.4.2	三相异步电动机的回馈制动	216
8.4.3	三相异步电动机的能耗制动原理	218
	思考题与习题	220
第9章	同步电机	224
9.1	同步电机的基本工作原理和结构	224
9.1.1	同步电机的工作原理	224
9.1.2	同步电机的基本结构	225
9.1.3	同步电机的励磁方式	226
9.1.4	额定值	227
9.2	同步电机的电枢反应	227
9.2.1	同步电机的空载磁场	227
9.2.2	对称三相负载时同步电机的电枢反应	227
9.3	同步电动机的运行分析	231
9.3.1	隐极同步电动机的电动势平衡方程式和相量图	231
9.3.2	凸极同步电动机的电动势平衡方程式和相量图	233
9.4	同步电动机的功率、转矩和功(矩)角特性	236
9.4.1	同步电动机的功率、转矩平衡方程式	236
9.4.2	同步电动机的功(矩)角特性	236
9.5	同步电动机的功率因数调节	239
9.6	同步电动机的起动	241
9.6.1	起动方法	242
9.6.2	异步起动过程	242
9.7	同步发电机的运行分析	244

9.7.1	同步发电机的电动势平衡方程式和相量图	244
9.7.2	功率、转矩平衡方程式和功(矩)角特性	246
9.8	同步发电机的运行特性	247
9.8.1	外特性	247
9.8.2	调整特性	248
9.8.3	空载特性	248
9.8.4	短路特性	248
9.8.5	零功率因数负载特性	249
9.9	同步发电机与电网的并联运行	250
9.9.1	并联运行的条件	250
9.9.2	投入并联的方法	250
9.9.3	有功功率的调节	251
9.9.4	静态稳定	251
9.10	同步发电机的不对称运行	253
9.10.1	对称分量法	253
9.10.2	同步发电机的各相序阻抗和等效电路	255
9.10.3	同步发电机的单相短路	257
9.10.4	同步发电机的线间短路	259
	思考题与习题	260
第 10 章	控制电机	263
10.1	步进电动机	263
10.1.1	基本结构	263
10.1.2	基本工作原理	263
10.2	伺服电动机	266
10.2.1	直流伺服电动机	266
10.2.2	交流伺服电动机	267
10.3	测速发电机	269
10.3.1	直流测速发电机	269
10.3.2	交流测速发电机	270
10.4	自整角机	272
10.4.1	力矩式自整角机	272
10.4.2	控制式自整角机	272
10.5	旋转变压器	273
10.5.1	基本结构	274
10.5.2	基本工作原理	274
	思考题与习题	277

第 11 章 电力拖动系统中电动机的选择	278
11.1 电动机选择的基本要求与主要内容	278
11.1.1 基本要求	278
11.1.2 主要内容	278
11.2 电动机的发热和冷却过程	281
11.3 电动机的工作制	282
11.4 电动机的额定功率和实际功率	284
11.4.1 电动机的额定功率	284
11.4.2 电动机的实际功率	284
11.5 恒定负载电动机额定功率的选择	285
11.5.1 连续运行工作制电动机的选择	285
11.5.2 短时工作制(S_2)电动机额定功率的选择	286
11.5.3 断续周期工作制(S_3)电动机额定功率的选择	288
11.6 周期性变动负载电动机额定功率的选择	289
11.6.1 电动机额定功率的选择	289
11.6.2 须考虑起动、制动和停机过程时发热公式的修正	291
思考题与习题	293
实验一 直流并励电动机	295
实验二 直流发电机	298
实验三 单相变压器	302
实验四 三相变压器	307
实验五 绕线式三相异步电动机	309
实验六 鼠笼式三相异步电动机	311
实验七 三相同步电动机	315
实验八 三相同步发电机	318
部分习题答案	321
参考文献	325

第 1 章 磁 路

1.1 磁场的基本物理量

1.1.1 磁感应强度

电磁场是由电流产生的。描述磁场中某点的磁场强弱和方向的物理量称为磁感应强度 B ，它是一个向量。

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。若设想用假想的曲线来表示磁场的分布，则规定曲线上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。

磁感应线总是闭合的，且围绕着产生它的电流，其方向则与产生它的电流的方向满足右手螺旋定则。

磁场中各点的磁感应强度的大小可以通过磁感应线的疏密来表示。磁场强的地方，磁感应强度大，磁感应线密；磁场弱的地方，磁感应强度小，磁感应线疏。

某点磁感应强度的大小可用该点磁场作用与长 1m，通过 1A 电流的导体上的力来衡量，该导体与磁场方向垂直，即

$$B = \frac{F}{LI} \quad (1-1)$$

若磁场内各点的磁感应强度大小相等，方向也相同，称该磁场为均匀磁场。

在国际单位制中，磁感应强度的单位为 T，即 Wb/m^2 。

1.1.2 磁通

穿过某一截面 S 的磁感应向量 B 的通量称为磁通，用 Φ 表示，它定义为

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

即磁感应向量 B 在某截面 S 上的面积分就是通过该截面的磁通。

均匀磁场中，若截面 S 与磁感应向量 B 垂直，如图 1-1(a) 所示，则式(1-2)变成

$$\Phi = BS$$

或

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-3)$$

由式(1-3)可知，磁感应强度的大小等于与磁场方向垂直的单位面积上的磁通，所以磁感应强度又称磁通密度。

如果截面 S 与磁感应向量 B 不垂直，它的法线与 B 的方向之间夹角为 α ，如图 1-1(b) 所示，则

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (1-4)$$

在国际单位中, Φ 的单位为 Wb。

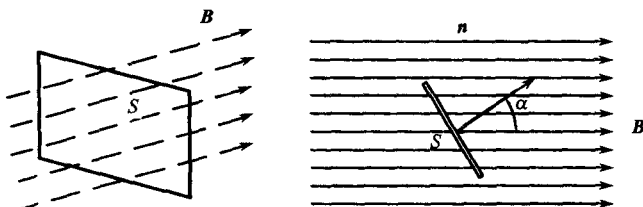


图 1-1 均匀磁场中通过某截面的磁通示意图
(a) 截面 S 与磁感应向量 B 垂直; (b) 截面 S 与磁感应向量 B 不垂直。

1.1.3 磁场强度与磁导率

在磁场计算中, 还引入了一个物理量——磁场强度 H , 它也是一个向量。它与磁感应强度 B 满足如下的关系式, 即

$$B = \mu H \quad (1-5)$$

式中: μ 是磁场中导磁物质的磁导率, 它是表征物质导磁能力的物理量。

真空磁导率为 μ_0 , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

导磁物质的磁导率 $\mu \gg \mu_0$ 。

某物质的磁导率 μ 与真空磁导率 μ_0 的比值, 称为该物质的相对磁导率 μ_r , 即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

国际单位制中, μ 的单位为 H/m 。 H 的单位为 A/m 。

1.2 铁磁物质的磁性能

物质按其磁导率的大小可分为磁性材料和非磁性材料两大类。磁性材料即铁磁材料, 它们具有高导磁性能, 可以强烈被磁化。而非磁性材料, 基本上不具有磁化特性, 它们的磁导率 $\mu \approx \mu_0$, 相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ 。

由于铁磁材料具有高导磁性能, 工程上往往利用它来使磁通尽量地约束在有限范围内, 提高电磁设备的效率, 所以变压器和电机的铁芯常用导磁率较高的铁磁材料制成。下面对常用铁磁材料及其特性作简要说明。

1.2.1 铁磁材料的高导磁性

铁磁材料具有很高的导磁性, 主要因为它们具有被强烈磁化的特性。铁磁材料之所以被强烈磁化是由于在它的内部存在着许多很小的被称为磁畴的天然磁化区。磁畴相当于小的磁铁。在没有外磁场作用下, 各个小磁畴排列混乱, 磁效应相互抵消, 对外不显磁性, 如图 1-2(a) 所示。在外磁场作用下, 磁畴就顺着外磁场的方向转向, 开始显示出磁性来。当外磁场逐渐增强时, 磁畴就逐渐转到与外磁场相同的方向, 产生一个与外磁场同方向的