

高 等 学 校 教 材

电 机 学

汤蕴璆 史 乃 姚守猷 合编
胡颂尧 励鹤鸣 王侠的

西安交通大学出版社

高等學校教材

电 机 学

汤蕴璆 史 乃 姚守猷 合编
胡颂尧 励鹤鸣 王侠的

西安交通大学出版社

1993年

内 容 简 介

本书是一本采用机电能量转换体系编写的新电机学教材，全书共12章。前8章主要阐述磁路、机电能量转换的基本原理以及变压器、直流电机、感应电机和同步电机的稳态分析，后4章阐述电机的一般分析方法和旋转电机的动态分析。每章后面附有思考题和习题，书末编入分数槽绕组、变分法和三相同步电机的自感和互感等三个附录。全书的编写方针是：结合国情，博采众长；削枝强干；深入浅出；承上启下，推陈出新。本书可作为高等学校电机及其控制专业和其他强电类专业的教材，亦可供有关科技人员作为参考用书。

(陕)新登字007号

电 机 学

汤蕴璆 史乃 姚守猷 合编
胡颂尧 励鹤鸣 王侠的

西安交通大学出版社出版

(西安市康宁路28号 邮政编码710049)

哈尔滨电工学院印刷厂印装

各地新华书店经销

开本 787 × 1092 1/16 印张13.375 插页 字数：600千字

1993年7月第1版 1993年7月第1次印刷

印数：1—2000

ISBN7-5605-0587-2/TM·26 定价：13.50元

前 言

本书是在1986年出版的高等学校试用教材《电机学—机电能量转换》的基础上,根据1992年10月高等学校电机专业教学指导委员会制订的电机学教材编写大纲重新编写的。

本书是采用机电能量转换体系编写的一本新电机学教材,全书共12章。前8章主要阐述磁路、机电能量转换的基本原理以及变压器、直流电机、感应电机和同步电机的稳态分析,后4章阐述电机的一般分析方法和旋转电机的动态分析。对于一些较为次要的问题,节或小节前打有*号,作为选学内容。每章后面附有思考题和习题,书末编入分数槽绕组、变分法和三相同步电机的自感和互感等三个附录。本书可作为高等学校电机及其控制专业和其他强电类专业的教材,亦可供有关科技人员作为参考用书。

本书的特点是:(1)阐明了机电能量转换的机制和条件,并据此对各种电机的能量转换进行统一的分析和讨论;(2)为跟上近20年来电机理论和有关相邻学科的巨大发展和生产、科研上的实际需要,除稳态分析外,同时阐明旋转电机的一般分析方法,并对直流、同步和感应电机的几个典型动态问题进行了仔细的分析;(3)把磁路作为一章单独列出;(4)对直流电机和其他陈旧内容进行了较多的删减;(5)各章具有相对的独立性,具体讲授时次序可以改变。全书的编写方针是:结合国情,博采众长;削枝强干,深入浅出;承上启下,推陈出新。

本书由哈尔滨电工学院汤蕴璆教授、史乃教授、合肥工业大学姚守猷教授、山东工业大学胡颂尧教授、西安交通大学励鹤鸣教授、沈阳工业大学王侠的副教授等参加编写,汤蕴璆教授担任主编。

本书由上海交通大学李仁定教授主审。李仁定教授对本书中许多问题的写法提出宝贵意见,对此编写者表示衷心感谢。

本书的编写得到了西安交通大学汪国梁教授、哈尔滨大电机研究所徐怡高级工程师、天津大学吉崇庆教授、哈尔滨工业大学陆永平教授、沈阳工业大学唐任远教授,上海工业大学谢国栋教授、南京航空学院蒋忠玮教授、南昌大学何友观教授、河北工学院陈子痛教授、太原工业大学张春镐教授的关心和支持;佳木斯电机厂、佳木斯防爆电机研究所、哈尔滨变压器厂、博山电机厂、山东牵引电机总公司、山东电机股份有限公司、淄博潜水电泵厂、沈阳电机厂、沈阳大中型电机研究所、沈阳实业电机厂、沈阳市电机研究所、黑龙江省电力局、济南生建电机厂、济宁电机厂、合肥变压器厂、哈尔滨电工学院等单位为本书的出版提供了赞助;哈尔滨电机厂、上海电机厂、东方电机厂、沈阳变压器厂和大连电机厂等单位为本书提供了产品照片和资料,在此一并表示谢意。

编 者

1993年6月

主 要 符 号 表

A	面积, A 相	F_{ϕ}	单相绕组所生的 ν 次谐波磁动势
a	交流绕组并联支路数, a 相, 120° 复量算子	F_q	q 个线圈所生磁动势
a_m	直流电机并联支路对数	F_o	换向极绕组磁动势
B	磁通密度 (磁密), B 相	f	频率, 力, 磁动势的瞬时值
B_o	气隙磁密	f_1	定子频率
B_{ad}	直轴电枢磁场磁密	f_2	转子频率
B_{aj}	交轴电枢磁场磁密	f_N	额定频率
B_o	漏磁磁密	f_ν	ν 次谐波频率
b	宽度, b 相, 磁通密度瞬时值	H	磁场强度
b_s	槽宽	h	高度
C	C 相	I	电流 (交流表示有效值), 同步电机 的电枢电流, 直流电机的线路电流
C_T	转矩常数	I_o	直流电机的电枢电流
C_e	电动势常数	I_m	交流激磁电流
c	比热	I_f	直流励磁电流
D_1	定子直径	I_μ	I_m 中的磁化分量
D_s	电枢外径	I_N	额定电流
E	电动势 (交流表示有效值)	I_o	空载电流
E_ϕ	相电动势	I_k	短路电流, 堵转电流
E_o	空载电动势	I_{st}	起动电流
E_1	变压器一次绕组 (电机定子绕组) 由主磁通感应的电动势有效值	I_1	变压器一次 (感应电机定子) 电流
E_2	变压器二次绕组 (电机转子绕组) 由主磁通感应的电动势有效值	I_2	变压器二次 (感应电机转子) 电流
E_2'	E_2 的归算值	I_2'	I_2 的归算值
E_q	q 个线圈的合成电动势	I_{1+}	感应电机定子电流的正序分量
e	电动势瞬时值	I_{1-}	感应电机定子电流的负序分量
e_o	换向电动势	i	电流的瞬时值
e_r	电抗电动势	J	转动惯量
F	磁动势, 力	j	电流密度, 虚数符号
F_o	电枢磁动势	K	换向片片数
F_m	感应电机的激磁磁动势	k	常数, 变压器电压比
F_{ad}	直轴电枢磁动势	k_s	电流比
F_{aq}	交轴电枢磁动势	k_e	电动势比
$F_{\phi 1}$	单相绕组所生的基波磁动势	k_{d1}	基波分布因数
		k_{p1}	基波节距因数

k_{w1}	基波绕组因数	Q	热量, 每极下的槽数
k_{dv}	ν 次谐波的分布因数	q	每极每相槽数
k_{pv}	ν 次谐波的节距因数	R	电阻
k_{wv}	ν 次谐波的绕组因数	R_m	磁阻, 激磁电阻
K_s	短路比	R_1	变压器一次侧(感应电机定子)电阻
L	自感	R_2	变压器二次侧(感应电机转子)电阻
$L_{1\sigma}$	变压器一次侧(感应电机定子)漏感	R_2'	R_2 的归算值
$L_{2\sigma}$	变压器二次侧(感应电机转子)漏感	R_f	励磁绕组电阻
l	长度	R_a	电枢电阻
M	互感	R_R	端环电阻
m	相数	R_B	导条电阻
m_1	交流电机定子相数	R_k	变压器或感应电机的短路电阻
m_2	感应电机转子相数	R_Ω	旋转阻力系数
N	每相串联匝数	S	视在功率
N_c	每个线圈的匝数	S_N	额定视在功率
n	转子转速	s	转差率
n_N	额定转速	s_N	额定转差率
n_0	空载转速	s_m	最大转矩时的转差率
n_s	同步转速	s_+	转子对正序磁场的转差率
n_v	ν 次谐波旋转磁场的转速	s_-	转子对负序磁场的转差率
n_2	转子基波旋转磁场相对于转子的转速	T	转矩, 时间常数, 周期
Δn	转速调整率	T_c	换向周期
P	功率	T_d'	直轴瞬态时间常数
P_N	额定功率	T_e	电枢时间常数
P_e	电磁功率	T_f	励磁绕组时间常数
P_Ω	感应电动机的转换功率	T_N	额定转矩
P_k	堵转功率, 短路功率	T_0	空载转矩
P_1	输入功率	T_e	电磁转矩
P_2	输出功率	T_{max}	最大转矩
P_0	空载功率	T_{pi}	同步电动机的牵入转矩
p	损耗, 极对数, 时间的微分算子	T_{st}	起动转矩
p_{Cu}	铜耗	T_L	负载转矩
p_{Fe}	铁耗	t	时间
p_d	杂散损耗	U	电压(交流表示有效值)
p_Ω	机械损耗	U_N	额定电压
		U_ϕ	相电压
		U_1	电源电压, 定子端电压
		U_{1+}	定子端的正序电压

U_{1-}	定子端的负序电压	$Z_{2\sigma}$	变压器二次侧(感应电机转子)漏阻抗
U_0	空载电压	$Z_{2\sigma}'$	$Z_{2\sigma}$ 的归算值
U_k	短路电压,堵转电压	α	角度,相邻两槽间的电角度
u	电压的瞬时值	β	夹角, q 个线圈的总夹角
Δu	电压调整率	δ	气隙,功率角
$2\Delta U$	每对电刷的电压降	ε	小数,短距角
W	功,能	η	效率
W_m	磁场能量	η_N	额定效率
X	电抗	η_{max}	最大效率
X_σ	电枢反应电抗	θ	温度,角度
X_+	正序电抗	$\mathcal{A}$	磁导
X_-	负序电抗	$\mathcal{A}_\sigma$	漏磁导
X_0	零序电抗	λ	比漏磁导,导热系数
X_{ad}	直轴电枢反应电抗	μ	磁导率,转子谐波次数
X_{aq}	交轴电枢反应电抗	μ_0	空气磁导率
X_σ	定子漏抗	μ_{Fe}	铁心磁导率
X_s	同步电抗	ν	谐波次数
X_d	直轴同步电抗	ρ	电阻率
X_q	交轴同步电抗	τ	极距
X_m	激磁电抗	Φ	磁通量
X_k	短路电抗	Φ_0	空载磁通
$X_{1\sigma}$	变压器一次侧(感应电机定子)漏抗	Φ_σ	电枢反应磁通
$X_{2\sigma}$	变压器二次侧(感应电机转子)漏抗	Φ_m	变压器或感应电机的主磁通
$X_{2\sigma}'$	$X_{2\sigma}$ 的归算值	Φ_σ	漏磁通
X_d'	直轴瞬态电抗	Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通
X_d''	直轴超瞬态电抗	Φ_{aq}	交轴电枢反应磁通
y	绕组合成节距	Φ_ν	ν 次谐波磁通
y_1	第一节距	ϕ	磁通量的瞬时值
y_2	第二节距	φ	相角,功率因数角
y_σ	换向器节距	φ_0	空载功率因数角
Z	阻抗,电枢总导体数	φ_k	短路功率因数角
Z_m	激磁阻抗	ψ	磁链, $\dot{E}$ 和 $\dot{I}$ 间的夹角
Z_k	短路阻抗	ψ_0	内功率因数角
Z_+	正序阻抗	ψ_2	感应电机转子的内功率因数角
Z_-	负序阻抗	Ω	机械角速度
Z_0	零序阻抗	Ω_s	同步机械角速度
$Z_{1\sigma}$	变压器一次侧(感应电机定子)漏阻抗	ω	电角速度,角频率

目 录

第一部分 电机的基本原理和稳态分析

结 论	1
0-1 电机在国民经济中的作用	1
0-2 我国电机工业发展概况	1
0-3 本课程的任务	3
第一章 磁路	4
1-1 磁路的基本定律	4
1-2 常用铁磁材料及其特性	8
1-3 直流磁路	14
1-4 交流磁路	18
第二章 变压器	25
2-1 变压器的基本结构和额定值	25
2-2 变压器的空载运行	27
2-3 变压器的负载运行	29
2-4 变压器的基本方程、等效电路和相量图	31
2-5 变压器等效电路参数的测定	37
*2-6 变压器的耦合电路方程	40
2-7 三相变压器	41
2-8 标么值	47
2-9 变压器的运行特性	51
2-10 变压器的并联运行	54
2-11 三绕组变压器、自耦变压器和仪用互感器	58
*2-12 Y, yn 联结三相变压器的单相短路	65
第三章 机电能量转换的基本原理	71
3-1 机电能量转换过程中的能量关系	71
3-2 双边激励机电装置中的机电能量转换	77
3-3 机电能量转换的条件	83
3-4 旋转电机的构成	87
第四章 直流电机的稳态分析	90
4-1 直流电机的工作原理	90
4-2 直流电机的基本结构和励磁方式	93
4-3 直流电枢绕组	97
4-4 空载和负载时直流电机的磁动势和磁场	103
4-5 直流电机的感应电动势和电磁转矩	108

4-6	直流电机的基本方程	110
4-7	直流发电机的运行特性	115
4-8	直流电动机的运行特性	120
4-9	直流电动机的起动和调速	124
4-10	换向	128
第五章	交流绕组及其电动势和磁动势	135
5-1	交流绕组的构成和分类	135
5-2	三相双层绕组	135
5-3	三相单层绕组	141
5-4	正弦磁场下交流绕组的感应电动势	144
5-5	非正弦磁场下感应电动势中的高次谐波	151
5-6	正弦电流下单相绕组的磁动势	158
5-7	正弦电流下三相绕组的磁动势	162
*5-8	非正弦电流下交流绕组的磁动势	169
第六章	感应电机的稳态分析	172
6-1	感应电机的结构和运行状态	172
6-2	三相感应电动机的磁动势和磁场	175
6-3	三相感应电动机的磁动势、电动势方程和等效电路	180
6-4	感应电机的功率方程、转矩方程和能量转换	187
6-5	笼型转子参数的归算	191
6-6	三相感应电机参数的测定	193
6-7	感应电动机的转矩-转差率曲线	196
6-8	感应电动机的工作特性	200
6-9	感应电动机的起动	209
6-10	深槽和双笼感应电动机	212
6-11	感应电动机的调速	215
*6-12	谐波磁场对转矩-转差率曲线的影响	222
6-13	三相感应电动机的不对称运行	225
6-14	单相感应电动机	232
第七章	同步电机的稳态分析	241
7-1	同步电机的基本结构和运行状态	241
7-2	同步发电机的空载运行	248
7-3	对称负载时的电枢反应	249
7-4	隐极同步发电机的电压方程、相量图和等效电路	252
7-5	凸极同步发电机的电压方程和相量图	255
7-6	同步发电机的功率和转矩方程	259
7-7	同步电机参数的测定	260
7-8	同步发电机的运行特性	265

7-9 同步发电机与电网的并联运行	269
7-10 同步电动机和同步补偿机	279
7-11 同步发电机的不对称运行	288
*7-12 同步电机的小振荡	295
第八章 电机的发热和冷却	303
8-1 电机中常用的绝缘材料及其容许温度	303
8-2 电机的发热和冷却	304
8-3 电机的定额	307
8-4 电机的冷却方式	308

第二部分 旋转电机的一般分析方法和动态分析

第九章 旋转电机分析的一般方法	312
9-1 旋转电机的分析步骤和方法	312
9-2 运动方程的建立方法	313
9-3 运动方程的解法	318
9-4 坐标变换	333
*9-5 原型电机及其运动方程	341
第十章 直流电机的动态分析	348
10-1 直流电机的运动方程	348
10-2 他励直流电动机的框图和传递函数	349
10-3 直流电动机起动过程的动态分析	355
第十一章 同步电机的动态分析	358
11-1 无阻尼绕组的同步电机的运动方程	358
11-2 同步电机的标么值	365
11-3 无阻尼绕组的同步电机的等效电路和运算电抗	369
11-4 无阻尼绕组的同步发电机的三相突然短路	373
11-5 有阻尼绕组的同步发电机的三相突然短路	381
第十二章 感应电机的动态分析	387
12-1 三相感应电动机的运动方程	387
12-2 三相感应电动机起动过程的动态分析	390
12-3 三相感应电动机的矢量变换控制	393
附录一 分数槽绕组	397
附录二 拉格朗日方程的导出和应用条件	403
附录三 凸极同步电机定子绕组的自感和互感	409
参考书目	413

绪 论

0-1 电机在国民经济中的作用

电机是一种进行机电能量或讯号转换的电磁机械装置。就能量转换的功能来看,电机可分为两大类。第一类是发电机,它是把机械能转换为电能的装置,通过原动机先把各类一次能源蕴藏的能量转换为机械能,然后通过发电机转换为电能,经输、配电网络送往各工矿企业、城市、家庭等各种用电场合。第二类是电动机,它的用途是把电能转换为机械能,用来驱动各种用途的生产机械和其他装置,以满足人类的不同需求。

由于一次能源形态的不同,可制成不同的发电机。利用水力资源,和水轮机配合,可制成水轮发电机,由于水库容量的大小和水头落差高低的不同,可制成容量和转速各异的水轮发电机。利用煤、石油等资源的热能,和锅炉、汽轮机配合,可制成汽轮发电机,这种发电机多为高速电机(3000r/min)。此外,还有利用风能、原子能、地热等能源的各类发电机。

到1991年,我国的电力总装机容量已达148900MW,年总发电量为6700亿度。从发电量看,已居世界第四位(其中以火、水电为主)。今后预计需以每年增装2000万kW机组的速度增加发电量,才能满足生产的需求。

电动机作为原动机,已广泛应用于各行各业,大至冶金企业使用的高达上万千瓦的电动机,小至分马力,乃至几瓦的微电机。在各类原动机中,电动机的容量已超过总容量的60%。

根据应用场合的要求和供电电源的不同,电动机有直流电动机,交流同步电动机、交流感应电动机,以及满足不同需求的特种电动机。四十年代以后,由于受第二次世界大战的影响,自动控制技术得到了很大的发展,出现了一系列新的控制电机。七十年代以后,由于现代控制理论的创立,以及大功率电力电子元件、微电子器件、变频技术以及微型计算机技术取得的一系列进展,为交流调速技术的发展创造了理论和物质基础,从而研制出许多调速性能优良、效率较高,能满足不同要求的交流电动机调速系统。

电力工业是一种先行工业,世界各国经济发展的经验表明,只有当电力工业的增长率高于其他工业的发展速度,才能促使整个国民经济的全面快速增长,并满足人民生活的各种需求。我国是一个拥有十多亿人口的大国,水力、煤炭等资源十分丰富,相信在今后,电力和电机制造工业将会得到更快的发展。

0-2 我国电机工业发展概况

解放前,我国的电机工业极端落后,全国只有少数几个城市有电机制造厂,这些厂规模小、设备差,生产能力低下,产品规格混乱,材料多依赖进口。解放前的最高年产

量(1947年),发电机为2万kW,电动机为5.1万kW;交流发电机的单机容量不超过200kW,交流电动机不超过230kW。

建国以来,我国的电机制造工业发展得很快,已经逐步建成较为完整的电机制造工业体系。在产量方面,1949~1952年国民经济恢复时期,各种主要产品就达到和超过了建国前的最高水平。到第一个五年计划结束时(1957年),年产量达到145万kW,是1949年的23.9倍。单机容量方面,1954年制成6000kW、1956年制成1.2万kW的汽轮发电机,1955年制成1万kW水轮发电机。在此期间,我国的电机工业逐步掌握了一系列产品的设计方法和制造工艺,并进行了中、小型电机产品的全国统一设计,改变了产品规格混乱的现象。到1957年年底,电机制造工业的产品自给率已达到75%。

1958~1966年期间,电机制造工业无论在发展品种、提高产品质量,还是在产品数量方面,都作出了巨大的成绩。在中、小型感应电动机方面,设计了J₂、JO₂系列并正式投产。与旧系列相比,该系列效率提高了1~2%,体积缩小了25.6%,重量减轻了20.1%。在发电设备方面,1959年和1960年相继设计和制成了5万kW氢冷和10万kW氢内冷汽轮发电机,之后又进行了5万kW以下汽轮发电机新系列的统一设计;同时,1959年还制成了7.25万kW的水轮发电机,1964年又制成了大型22.5万kW水轮发电机组。在直流电机和中型交流电机方面,制成了1150初轧机用的4500kW和4930kW直流电动机—发电机组,6300kW大型感应电动机和10.8MW同步电动机。在这期间,还研制了1.2万kW双水内冷汽轮发电机,1960年又试制成功了10万kW的双水内冷汽轮发电机。在中、小型直流电机和微电机方面,设计出合乎我国国情的新的系列产品。还进行了许多调查研究和科学实践工作,建立了我国自己的电机国家标准。

1969~1984年间,又先后制成了12.5万kW和30万kW的双水内冷汽轮发电机。为适应生产的需要,还试制和生产了各种不同用途的交、直流电机,包括1700mm连轧机上使用的2×3000kW的大型直流电动机(1975年),用于晶闸管供电的GZ型(1975年)和GZ₂型(1982年)中型直流电动机系列,以及新的中小型Y系列感应电动机(1984年)。并对电机的一些新原理、新结构、新工艺、新材料和新的测试方法进行了许多研究工作,取得了许多成果。

1985~1991年间,我国电机工业在引进、吸收和消化国外先进技术的基础上,对原有电机进行了改型和优化设计,并相继开发和研制出多种新系列电机,不仅基本满足了国内生产的需求,尚有部分产品出口。在发电设备方面,相继于1986年制成300MW双水内冷和全氢冷型汽轮发电机,1989年又试制成功优化型300MW水氢氢冷汽轮发电机,这些电机的一些主要性能已经达到当今的国际水平。在引进技术的基础上,1986年还试制出600MW水氢氢冷汽轮发电机,并投入运行。在此期间,还相继制成了125、250、300和320MW的大型水轮发电机,并安装运行。在大型交、直流电机方面,研制成功了2×5000kW的直流电动机,4700kW的直流发电机和42MW的同步电动机。在中、小型电机方面,已开发和制成125个系列,840多个品种,几千个规格的各种电机,其中达到八十年代初期国际水平的约占50%左右。在特殊电机方面,由于新的永磁材料的出现,制成了许多高效节能、维护简单的永磁电机。由于电机和电力装置相结合,出现了各种性能和形态迥异的“一体化电机”,满足了生产和生活领域中各种不同的需求。

0-3 本课程的任务

本课程是一门技术基础课。通过本课程的学习,可获得电机的基本理论、基本知识和基本技能,为学习专业课做好准备,为今后从事有关专业工作打下基础。

学习本课程后,应达到下列基本要求:

- (1) 对磁路的计算方法及交、直流磁路和铁心线圈的性能应有基本的了解。
- (2) 对机电装置中的能量关系,感应电动势,磁场储能,电磁转矩和机电能量转换过程,以及产生持续机电能量转换的条件有一个基本的了解。从长远来看,如能举一反三,就能触类旁通地分析、研制和开发各种不同的新型电机和特种电机。
- (3) 对变压器和三种主要电机(直流电机、感应电机和同步电机)的基本结构要有一定认识。对各种电机中气隙磁场的性质和时空关系要有深入的了解。
- (4) 对各种电机正常稳态运行时的分析方法和运行性能,要牢固掌握。要能正确地建立电压方程和转矩方程,明确电机中的能量转换关系,对稳态运行时电机的参数要有清晰的物理概念。能熟练地运用等效电路(相量图)和复数来计算电机的性能和主要运行数据。
- (5) 对交流电机的不对称运行和直流电机、同步电机以及感应电机在动态情况下的分析方法和相应的参数,要具有基本的物理概念;对一些典型的运行方式和动态过程要能作出正确的分析。
- (6) 既要掌握各种电机的共性(例如电动势、磁动势和电磁转矩的产生和算法,旋转电机的分析方法等),使学到的知识能够融会贯通;又要掌握各种电机的个性和特点,以便结合实际,对具体问题进行分析,达到解决问题的目的。
- (7) 了解电机的有关工程性问题,例如发热和冷却,励磁系统,各种电机的应用范围,电机的额定值,主要电机的各种工程数据(效率、过载能力,起动性能数据、主要参数)范围等。
- (8) 通过实验,熟练掌握电机的基本实验方法和操作技能,如运行性能、损耗、稳态参数的求取和测定方法,电动机的起动和调速,发电机的建压和调频、调压等;能对实验结果进行分析和评定,并初步具有检查电机故障的能力。

第一章 磁 路

电机是一种实现机电能量或讯号转换的机电装置，变压器是一种实现电能或电讯号传递的电磁装置，它们的工作原理都是以电磁感应原理为基础；因此无论是电机还是变压器，都必需以电磁场作为其耦合场。严格地说，电磁场是电场和磁场的综合，但在电机中，电流频率不高，可动部件的运动速度大大低于光速，因此电磁辐射可以略去不计，把电场和磁场分别加以处理。且对绝大多数电机，都是以磁场作为耦合场。

电机中作为耦合场的磁场，其强弱程度和分布状况不仅关系到电机的参数和性能，而且还将决定电机的体积和重量。所以磁场的分析和计算，对于认识和掌握电机是十分重要的。然而电机的结构形状比较复杂，又有铁磁材料与气隙并存，很难用麦克斯韦方程直接解析求解。因此在实际工作中，常把磁场问题简化成磁路问题来处理。从工程观点来说，准确度已经足够。

1-1 磁路的基本定律

(一) 磁路的概念

如同把电流流过的路径称为电路一样，磁通所通过的路径称为磁路。图1-1表示两种常见的磁路，其中图1-1(a)为变压器的磁路，图1-1(b)为二极直流电机的磁路。

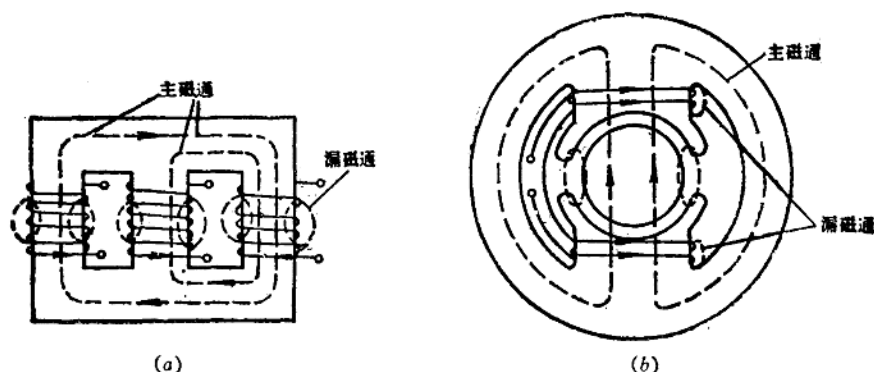


图1-1 两种常见的磁路
(a) 变压器的磁路；(b) 二极直流电机的磁路

在电机和变压器里，常把线圈套装在铁心上。当线圈内通有电流时，在线圈周围的空间（包括铁心内、外）就会形成磁场。由于铁心的导磁性能比空气要好得多，所以绝大部分磁通将在铁心内通过，这部份磁通称为主磁通。围绕载流线圈、在部分铁心和铁心周围的空间，还存在少量分散的磁通，这部分磁通称为漏磁通。主磁通和漏磁通按照一定的路径分别构成主磁路和漏磁路，图1-1中示意地表出了这二种磁路。

用以激励磁路中磁通的载流线圈称为励磁线圈（或励磁绕组），励磁线圈中的电流

称为励磁电流（或激磁电流）。若励磁电流为直流，磁路中的磁通是恒定的，不随时间而变化，这种磁路称为直流磁路；直流电机的磁路就属于这一类。若励磁电流为交流（为把交、直流励磁区分开，对交流情况称为激磁电流），磁路中的磁通随时间交变变化，这种磁路称为交流磁路；交流铁心线圈、变压器和感应电机的磁路都属于这一类。

（二）磁路的基本定律

进行磁路分析和计算时，往往要用到以下几条定律。

安培环路定律 实验证明，沿着任何一条闭合回线 L ，磁场强度 H 的线积分值 $\oint H \cdot dl$ 恰好等于该闭合回线所包围的总电流值 Σi （亦称为全电流）。这就是安培环路定律，或称全电流定律（图1-2）。用公式表示时有

$$\oint H \cdot dl = \Sigma i \quad (1-1)$$

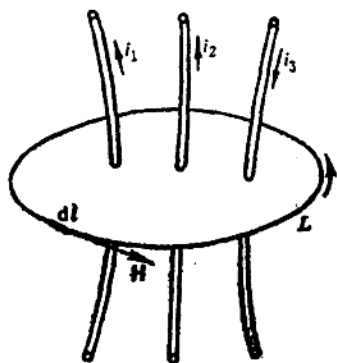


图1-2 安培环路定律

式(1-1)中，若电流的正方向与闭合回线 L 的环行方向符合右手螺旋关系时， i 取正号，否则取负号。例如在图1-2中， i_1, i_2 的正方向向上，故取正号， i_3 的正方向向下，故取负号。

若沿着长度 L ，磁场强度 H 处处相等，且闭合回线所包围的总电流是由通有电流 i 的 N 匝线圈所提供，则式(1-1)可简写成

$$HL = Ni \quad (1-2)$$

磁路的欧姆定律 图1-3(a)是一个无分支铁心磁路，铁心上绕有 N 匝线圈，线圈中通有电流 i 。铁心截面为 A ，磁路的平均长度为 l ，材料的磁导率为 μ 。若不计漏磁通，并认为磁通 Φ 均匀地通过各截面，且磁通密度 B 垂直于各截面，则磁通量 Φ 将等于磁通密度乘以面积

$$\Phi = \int B \cdot dA = BA \quad (1-3)$$

而磁场强度等于磁通密度除以磁导率 $H = \frac{B}{\mu}$ ，于是式(1-2)可改写成如下形式：

$$Ni = \frac{B}{\mu} l = \Phi \frac{l}{\mu A} \quad (1-4)$$

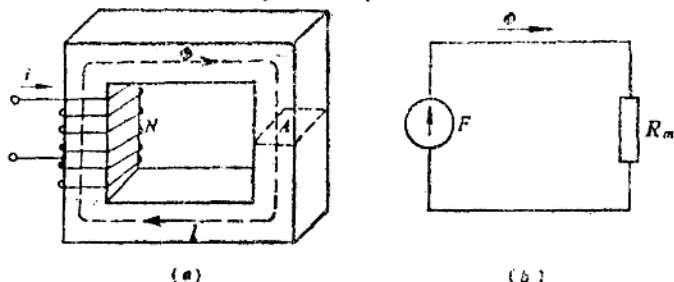


图1-3 无分支铁心磁路
(a) 无分支铁心磁路；(b) 模拟电路图

或

$$F = \Phi R_m = \frac{\Phi}{A} \quad (1-5)$$

式中 $F = Ni$ ——作用在铁心磁路上的安匝数，称为磁路的磁动势，简称磁势，单位为A；

$R_m = \frac{l}{\mu A}$ ——磁路的磁阻，它取决于磁路的尺寸和构成磁路所用材料的磁导率，单位为A/Wb；

$A = \frac{1}{R_m}$ ——磁路的磁导，它是磁阻的倒数，单位为Wb/A。

式(1-5)表明，作用在磁路上的磁动势 F 等于磁路内的磁通量 Φ 与磁路磁阻 R_m 的乘积；或者说，磁通量等于磁动势 F 和磁导 A 的乘积。此关系与电路中的欧姆定律

$$E = IR = \frac{I}{G}$$

在形式上是相似的，因此式(1-5)称为磁路的欧姆定律。这里，我们把磁路中的磁动势 F 比拟于电路中的电动势 E ，磁通量 Φ 比拟于电流 I ，磁阻 R_m 和磁导 A 分别比拟于电阻 R 和电导 G 。图1-3(b)表示相应的模拟电路图。

需要指出的是，虽然磁阻 R_m 与磁路的平均长度 l 成正比，与磁路的截面积 A 及构成磁路材料的磁导率 μ 成反比，这一情况与导体电阻 R 的计算公式极为相似；但是铁磁材料的磁导率 μ 不是一个常数，所以由铁磁材料构成的磁路其磁阻不是常数，而是随磁路中磁通密度的大小而变化，这种情况称为非线性。

【例1-1】有一闭合铁心，铁心截面积 $A = 9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，磁路的平均长度 $l = 0.3 \text{ m}$ ，铁心的磁导率 $\mu_{Fe} = 5000\mu_0$ ，励磁绕组有500匝。试求在铁心中产生 1 Wb/m^2 的磁通密度时所需的励磁磁势和励磁电流。

解 本题可用磁路的欧姆定律或安培环路定律求解。

(1) 用磁路的欧姆定律

$$\text{磁通量 } \Phi = BA = 1 \times 9 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\text{磁阻 } R_m = \frac{l}{\mu_{Fe} A} = \frac{0.3}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 9 \times 10^{-4}} = 5.3 \times 10^4 \text{ A/Wb}$$

$$\text{磁动势 } F = \Phi R_m = 9 \times 10^{-4} \times 5.3 \times 10^4 = 47.7 \text{ A}$$

$$\text{励磁电流 } i = \frac{F}{N} = \frac{47.7}{500} = 9.54 \times 10^{-2} \text{ A}$$

(2) 用安培环路定律

$$\text{磁场强度 } H = \frac{B}{\mu_{Fe}} = \frac{1}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 159 \text{ A/m}$$

$$\text{磁动势 } F = Hl = 159 \times 0.3 = 47.7 \text{ A}$$

$$\text{励磁电流 } i = \frac{F}{N} = \frac{47.7}{500} = 9.54 \times 10^{-2} \text{ A}$$

磁路的基尔霍夫第一定律 如果铁心不是一个简单回路，而是带有并联分支的分支磁路，如图 1-4 所示，则当中间铁心柱上加有磁动势 F 时，磁通的路径将如图中虚线所示。如令进入闭合面 A 的磁通为负，穿出闭合面的磁通为正，从图 1-4 可见，对闭合面 A ，显然有

$$-\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

或

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明，穿出（或进入）任一闭合面的总磁通量恒等于零（或者说，进入任一闭合面的磁通量恒等于穿出该闭合面的磁通量）。这就是磁通连续性定律。比拟于电路中的基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$ ，该定律亦称为磁路的基尔霍夫第一定律。

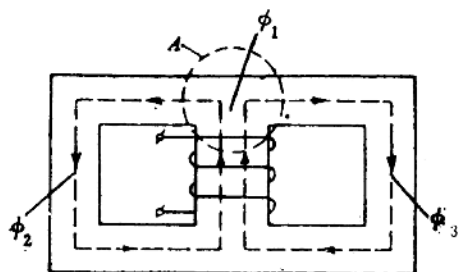


图1-4 磁路的基尔霍夫第一定律

磁路的基尔霍夫第二定律 电机和变压器的磁路总是由数段不同截面、不同铁磁材料的铁心组成，而且还可能含有气隙。磁路计算时，总是把整个磁路分成若干段，每段为同一材料、相同截面积，且段内磁通密度处处相等，从而磁场强度亦处处相等。例如如图 1-5 所示磁路由三段组成，其中两段为截面不同的铁磁材料，第三段为气隙。若铁心上的励磁磁动势为 Ni ，根据安培环路定律（磁路欧姆定律）可得：

$$Ni = \sum_{i=1}^3 H_i l_i = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta \delta = \Phi_1 R_{m1} + \Phi_2 R_{m2} + \Phi_\delta R_\delta \quad (1-7)$$

式中 l_1, l_2 ——分别为1、2两段铁心的长度，其截面积各为 A_1 和 A_2 ；

δ ——气隙长度；

H_1, H_2 ——分别为1、2两段磁路内的磁场强度；

H_δ ——气隙内的磁场强度；

Φ_1, Φ_2 ——1、2 两段铁心磁路中的磁通；

Φ_δ ——气隙磁通；

R_{m1}, R_{m2} ——1、2 两段铁心磁路的磁阻；

R_δ ——气隙磁阻。

由于 H_i 亦是单位长度上的磁压降， $H_i l_i$ 便是一段磁路上的磁压降，也等于 $\Phi_i R_{mi}$ ， Ni 则是磁通所包围的总电流，即磁动势。式 (1-7) 表明，沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁压降的代数和。类比于电路中的基尔霍夫第二定律，该定律就称为磁路

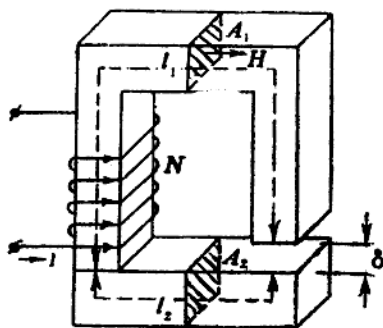


图1-5 磁路的基尔霍夫第二定律