

高等学校教材

电 机 学

(修 订 本)

上 册

华中工学院 许实章 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校教材

电 机 学

(修 订 本)

上 册

华中工学院 许实章 主编



机械工业出版社

本书根据从特殊到一般的认识规律,首先逐一论述直流电机、变压器、感应电机和同步电机四种典型电机的工作原理、基本结构、电磁过程、理论分析方法、运行特性和参数,而于最后总结各种电机在电、磁、力各方面的共同特点。使读者在掌握各电机个性的基础上,了解它们的共性、对各种电机的内在联系和机电能量转换的实质有一个完整的认识。书中每章都有小结和习题,包括思考题和计算题,便于学生复习。修订本在压缩全书篇幅,精炼内容、改变难点的分析方法等方面作了较大的改进。

全书分为上、下两册,上册包括绪论、直流电机和变压器,下册包括感应电机、同步电机和总结。本书可作为高等学校电机专业的“电机学”课程的教材,也可作为其他电力类各专业的“电机学”教材,对电机制造厂和电力部门的技术人员,也是一部很好的参考书。

电 机 学

(修订本)

上 册

华中工学院 许实章 主编

*

责任编辑:朱岩 责任印制:庞云武

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $15 \frac{1}{4}$ · 字数 368 千字

1980年5月北京第一版

1988年11月北京第二版·1988年11月北京第九次印刷

印数 77,701—82,800 · 定价: 3.10元

*

ISBN 7-111-00485 X/TM·73 (课)

前 言

本书自1980年出版以来,为大多数高等院校所欢迎,至1986年年底止,本书已印刷了七次,上册出书七万多册,下册出书六万多册。

1983年11月,原机械工业部电工技术类教材编审委员会在广州召开评审会议,会上对本书的优点给以充分肯定,如内容比较充实,有一定特色,能较好地总结有关院校的教学经验和体现改革精神,并能注意联系实际等。会上对本书的进一步修订也提出了建设性意见,如注意精简内容,对有些部分的讲法希望研究改进以达到“有利于教学”等。

本书修订本是根据1983年5月在杭州召开的电工技术类教材编审委员会上制订的“高等工业学校电机学教学大纲”和上述广州教材评审会的精神进行修改的。首先是注意精简内容,原来的六个附录全部取消,而把其中与教学大纲有关的部分内容移到正文中讲述。原书正文中不是教学大纲规定的内容也几乎都删掉,只对一些理论上或实用上有较大意义的内容才保留下来,但在章节标题上加了星标,表示这些内容可结合各自需要自由选读。其次在写法上,对交流绕组的磁势和感应电机的时空矢量图等的分析过程作了较大改进,对单相感应电动机提出了新的等效电路,还有许多地方在论述方法上作了精炼和改进。

本书贯彻了国家标准 GB3101~3102-82 中有关量、单位和符号的有关规定,以及国家标准 GB4728 电气图用图形符号的有关规定。

修订版和原书比较有较大改进,是一部内容上符合教学大纲要求、论述方法适合教学的比较完善的教材。

这次修订仍由原来的主要编写人执笔,具体分工如下:华南工学院潘观海教授修改直流电机,华中工学院熊衍庆副教授修改绪论和变压器,浙江大学王毓东副教授修改同步电机,华中工学院许锦兴副教授编写“整流供电直流电动机采用的功率半导体电路”,许实章教授修改交流电机的绕组、电势和磁势,感应电机和总结,并对全部修订稿作了仔细修改。参加本书第一版编写的还有蒋豪贤、许承千、沈云宝和钱张耀同志。

本书由湖南大学蒋定宇教授主审,他对修订稿作了详细审阅,提出了很多宝贵意见。

这里,谨向蒋定宇教授和很多用过本书、提过宝贵意见的同志表示衷心感谢!

主 要 符 号 表

A ——线负载（线负荷）；面积	F_{aq} ——交轴电枢磁势（最大值）
a ——直流电枢绕组并联支路对数	F_K ——换向极磁势
B ——磁通密度（磁感应强度）	F_δ ——气隙磁势
B_{av} ——平均磁通密度	F_1, F_2 ——一次、二次侧磁势
$B_{\pi/3}$ ——距齿根 1/3 齿高处的磁通密度（对转子）	F_m ——变压器激磁磁势
B_δ ——气隙磁通密度	f ——频率；力；磁势的瞬时值
B_K ——换向极下的气隙磁通密度	f_N ——额定频率
B_m ——磁通密度最大值	H ——磁场强度
b ——宽度；弧长	h ——高度
b_p ——主磁极实际极弧长度	h_z ——齿高
b_f ——主磁极计算极弧长度	I ——电流（交流表示有效值）
b_{s1} ——沿电枢表面的齿宽度	I_f ——励磁电流
b_k ——换向片宽度	I_a ——电枢电流
C ——常数；电容	I_N ——额定电流
C_e ——电势常数	I_k ——短路电流
C_M ——转矩常数	I_{cr} ——临界电流
C_{F0} ——变压器线圈的对地电容	I_{st} ——起动电流
C_s ——变压器线圈的匝间电容	I_L ——负载电流
D ——直径	I_m ——激磁电流
D_a ——电枢外径	I_μ ——磁化电流
D_{ia} ——电枢内径	i ——电流的瞬时值
D_k ——换向器外径	J ——机组转动惯量
E ——感应电势（交流为有效值）；电枢电势	j ——电流密度
E_m ——电势最大值	K ——换向片数；系数
E_1, E_2 ——一次、二次侧电势	k ——变比；系数
$E_{1\sigma}, E_{2\sigma}$ ——一次、二次侧漏电势	k_σ ——主极漏磁系数
e ——电势的瞬时值；自然对数的底（ $e = 2.718$ ）	k_s ——气隙系数（卡氏系数）
e_r ——电抗电势	k_μ ——饱和系数
e_{rav} ——电抗电势平均值	L ——自感；电感；长度
e_L ——自感电势	L_r ——换向元件等效合成漏电感
e_M ——互感电势	L_σ ——漏电感
e_K ——换向元件中的旋载电势	l ——长度；导体有效长度
F ——磁势	T ——转矩
F_a ——电枢磁势（最大值）	T_N ——额定转矩
F_{ad} ——直轴电枢磁势（最大值）	m ——相数
	N ——电枢导体数；匝数
	N_1, N_2 ——变压器一次、二次绕组匝数
	N_y ——元件匝数

n ——转速
 P ——功率
 P_N ——额定功率 (额定容量)
 P_{em} ——电磁功率
 P_{mec} ——机械功率
 P_1 ——输入功率
 P_2 ——输出功率
 P_0 ——空载功率 (空载损耗)
 p ——损耗; 极对数
 p_{Cu} ——铜耗 (电阻损耗)
 p_{Fe} ——铁耗
 p_{mec} ——机械损耗
 p_{ad} ——杂散损耗 (附加损耗)
 Q ——热量
 R ——电阻
 R_m ——磁阻
 R_a ——电枢回路内电阻
 R_f ——励磁回路总电阻
 R_L ——负载电阻
 S ——元件数; 视在功率
 S_N ——额定视在功率 (变压器容量)
 T ——时间常数; 周期; 转矩
 T_N ——额定转矩
 T_{em} ——电磁转矩
 T_1 ——原动机转矩; 输入转矩
 T_2 ——负载转矩; 输出转矩
 T_0 ——空载制动转矩
 T_O ——机组总负载制动转矩
 T_J ——惯性转矩
 t ——时间
 t_1 ——齿距
 U ——电压 (交流为有效值)
 U_N ——额定电压
 U_f ——励磁电压
 $U_{K_{max}}$ ——换向器片间电压最大值
 u ——电压瞬时值; 虚槽数

u_k ——阻抗电压 (短路电压)
 v ——线速度
 W ——能量 (储能)
 X ——电抗
 $X_{1\sigma}, X_{2\sigma}$ ——一次、二次侧漏电抗
 X_k ——短路电抗
 y ——节距; 合成节距
 Z ——电枢槽数; 阻抗
 Z_1 ——虚槽数
 Z_1, Z_2 ——一次、二次绕组漏阻抗
 Z_L ——负载阻抗
 Z_k ——短路阻抗
 α ——系数; 角度
 β ——系数; 角度
 γ ——电导率
 δ ——气隙长度
 η ——效率
 η_N ——额定效率
 η_{max} ——最大效率
 θ ——温度
 λ ——比漏磁导; 散热系数
 μ ——磁导率
 τ ——极距; 温升
 τ_N ——额定温升
 Φ ——磁通; 每极磁通; 变压器主磁通
 Φ_m ——主磁通最大值
 Φ_σ ——漏磁通
 ϕ ——磁通瞬时值
 $\phi_{1\sigma}, \phi_{2\sigma}$ ——一次、二次绕组的漏磁通瞬时值
 ψ, φ ——相位角
 Ψ ——磁链
 Ω ——机械角速度
 ω ——角频率
 $*$ ——右上角加星标的为标么值
 $'$ ——右上角加撇的为折算值

目 录

主要符号表

绪论	1
§0-1 电机在国民经济中的作用	1
§0-2 电机的基本特点和主要类型	1
§0-3 我国电机工业发展概况	2
§0-4 电机中所用的材料和铁磁材料的磁化特性	4
§0-5 研究电机时常用的基本电磁定律	8
§0-6 磁路的基本定律及计算方法	14
§0-7 电机中机电能量转换过程	19

第一篇 直 流 电 机

第一章 直流电机的工作原理和基本结构	25
§1-1 直流电机的工作原理	25
§1-2 直流电机的主要结构部件	27
§1-3 直流电机按励磁方式分类	31
§1-4 直流电机的额定值	31
§1-5 小结	32
第二章 直流电机的磁路、电枢绕组和电枢反应	34
§2-1 直流电机空载时的磁场和磁路计算	34
§2-2 气隙所需磁势	35
§2-3 齿部及其它铁心部分所需磁势	37
§2-4 直流电机的磁化曲线	37
§2-5 直流电机电枢绕组的构成原则和基本特点	41
§2-6 单叠绕组	43
§2-7 复叠绕组	47
§2-8 单波绕组	48
§2-9 复波绕组	52
§2-10 直流电枢绕组的均压线	53
§2-11 蛙绕组	53
§2-12 直流电机的电枢磁势和磁场	55
§2-13 交轴电枢反应和直轴电枢反应	57
§2-14 电枢绕组的感应电势	60
§2-15 直流电机的电磁转矩	61
§2-16 小结	62
第三章 直流发电机	65
§3-1 直流发电机中的能量转换	65
§3-2 直流发电机的电势、功率和转矩平衡方程式	65
§3-3 直流电机中的损耗和效率	67

§3-4	他励发电机的特性	70
§3-5	并励发电机的自动条件和特性	73
§3-6	复励发电机的特点	78
§3-7	小结	79
第四章	直流电动机	81
§4-1	电机的可逆原理	81
§4-2	直流电动机的功率、转矩和电势平衡方程式	82
§4-3	直流电动机的起动	84
§4-4	直流电动机的工作特性	89
§4-5	直流电动机的机械特性	93
§4-6	电力拖动机组稳定运行的条件	96
§4-7	直流电动机的调速	97
§4-8	直流电动机的制动	102
§4-9	可控硅整流供电的直流电动机	106
§4-10	各种直流电动机的应用范围	110
§4-11	小结	110
第五章	直流电机的换向	114
§5-1	直流电机的换向过程	114
§5-2	换向的电磁理论	115
§5-3	产生火花的原因	121
§5-4	改善换向的措施	122
§5-5	环火及其防止方法	125
§5-6	换向的试验调整	126
§5-7	直流电机运行时对无线电的干扰及其抑制方法	127
§5-8	可控硅整流供电直流电动机的换向特点	129
§5-9	小结	130
第六章	特种直流电机	132
§6-1	直流伺服电动机	132
§6-2	直流测速发电机	133
§6-3	交轴磁场电机放大器	134
§6-4	单极直流电机	136
§6-5	小结	138
第七章	电机的发热和冷却	139
§7-1	电机的温升及温升限值	139
§7-2	电机中常用的绝缘材料及其允许温度	140
§7-3	电机的发热和冷却过程	141
§7-4	电机的定额	143
§7-5	电机的冷却方式及机壳的防护形式	144
§7-6	小结	146

第二篇 变 压 器

第八章	变压器的工作原理和基本结构	149
§8-1	变压器的工作原理和分类	149

§8-2	变压器的主要结构部件	150
§8-3	变压器的发热与冷却	154
§8-4	变压器的额定值	156
§8-5	小结	157
第九章	变压器的运行原理	158
§9-1	变压器的空载运行	158
§9-2	变压器的负载运行	163
§9-3	变压器的漏抗计算和参数测定	171
§9-4	标么值	176
§9-5	变压器的运行特性	179
§9-6	小结	183
第十章	三相变压器	187
§10-1	三相变压器的磁路系统	187
§10-2	三相变压器的电路系统——绕组的连接法和联结组	188
§10-3	三相变压器绕组的连接法和磁路系统对电势波形的影响	192
§10-4	变压器的并联运行	195
§10-5	小结	200
第十一章	三相变压器的不对称运行	203
§11-1	对称分量法	203
§11-2	Y/Y ₀ 连接三相变压器的单相负载	205
§11-3	小结	210
第十二章	变压器的瞬变过程	212
§12-1	变压器空载合闸时的瞬变过程	212
§12-2	二次侧突然短路时的瞬变过程	214
§12-3	变压器的过电压现象	216
§12-4	小结	220
第十三章	三绕组变压器及其他用途变压器	222
§13-1	三绕组变压器	222
§13-2	自耦变压器	229
§13-3	电流互感器和电压互感器	232
§13-4	小结	233
附表1	50Hz、0.5mm、D23 磁化曲线	235

绪 论

§0-1 电机在国民经济中的作用

电机工业是机械工业的一部分，它对我国的社会主义建设有着重要的作用。电机工业的发展同国民经济和科学技术的发展有着密切的联系。

电能是现代最主要的能源，电机是与电能的生产、传输和使用有关的机电能量转换或改变电能特性的机械，不仅是工业、农业和交通运输业的重要设备，而且在日常生活中应用得也愈来愈广泛。

在电力工业中，电机是发电厂和变电所的主要设备。在发电厂中，发电机由汽轮机、水轮机或柴油机带动，后者把燃料燃烧、水流动力或原子核裂变的能量转化为机械能传给发电机，再由发电机转换成电能。为了经济地传输和分配电能，采用变压器升高电压，再把电能送到用电地区，然后又经过变压器降低电压，供用户使用。

在机械、冶金、石油、煤炭和化学工业以及其他各种工业企业中，广泛地应用电动机驱动各种生产机械。例如各种机床都用电动机拖动，高炉运料装置、电铲、轧钢机、吊车、抽水机、鼓风机、搅拌机、造纸机等都采用电动机拖动。一个现代化工厂需要几百台至几万台电动机。

在交通运输业中，随着城市交通运输和电气铁道的发展，需要大量具有优良起动和调速性能的牵引电动机，在航运和航空事业中，需要很多具有特殊要求的船用电机和航空电机。

随着农业机械化的发展，电机在农业上的应用也日趋广泛，如电力排灌、脱粒、碾米、榨油、粉碎等农业机械，都是用电动机拖动。

随着四个现代化的发展，工业生产的自动化程度不断提高，还需要采用各种各样的控制电机作为自动化系统中的元件，甚至在人造卫星的自动控制系统中电机也是不可缺少的。

此外，在国防、文教、医疗以及日常生活中，电机应用得也愈来愈广泛。

§0-2 电机的基本特点和主要类型

电机的型式很多，但其工作原理都基于电磁感应定律和电磁力定律。因此，其构造的一般原则是：用适当的有效材料（导磁和导电材料）构成能互相进行电磁感应的磁路和电路，以产生电磁功率和电磁转矩，达到转换能量形态的目的。

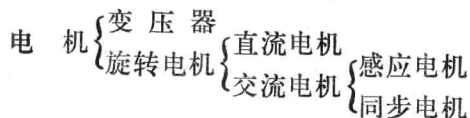
电机的分类方法很多，按其功能来看，可分为

1. 发电机 把机械能转换成电能；
2. 电动机 把电能转换成机械能；
3. 变压器、变频器、变流机、移相器 分别用于改变电压、频率、电流及相位；
4. 控制电机 作为控制系统中的元件。

应该指出，从基本原理上看，发电机和电动机只不过是电机的两种运行方式，它们本身

是可逆的。

上述各种电机中,除第三类变压器等是静止的电气设备外,其余均为旋转电机。旋转电机通常分为直流电机和交流电机,后者又分为感应电机和同步电机。这种分类法可以归纳如下:



§0-3 我国电机工业发展概况

解放前,我国仅沿海几个大城市有几家规模小、设备陈旧、技术落后的电机厂,主要从事电机的修理与装配。且产品的型式混乱,标准不一,质量很低。当时生产的最大单机容量:发电机不超过200kW,电动机不超过180kW,变压器不超过2MVA。成套的发电设备全由外国进口。

解放后,我国电机工业同国民经济各部门一样,得到了迅速发展。现在基本上建立了我国自己的电机工业体系。有了统一的国家标准、统一的电机和变压器系列,能制造成套的大、中型火力和水力发电设备,基本上能生产国民经济各部门所需要的各种类型电机。

在三年国民经济恢复时期(1949~1952年),我国电机的产量达到和超过了解放前的最高年产量,并试制成功许多新产品,如单机容量为3MW的水轮发电机、300kW的直流电机和940kW的感应电机。

在第一个五年计划期间(1953~1957年),电机工业发展很快。在产量方面,以电动机为例,1957年的年产量达1455MW,是1949年的23.9倍。在单机容量方面,先后制成了6MW、12MW汽轮发电机和10MW水轮发电机。1953年进行了中小型电机产品的全国统一设计,试制了大量新产品。新建和改建了一批电机工厂,使电机工业的技术水平有了很大的提高。到1957年底,我国电机产品的自给率已达75%。与此同时,在节约原材料、提高劳动生产率、降低成本、提高产品质量方面,也取得了很大成绩。

在第二个五年计划的头三年(1958~1960年),我国已自行设计和制成72.5MW水轮发电机,50MW氢冷和100MW氢内冷汽轮发电机。1958年,还试制成功世界首创的12MW双水内冷汽轮发电机,1960年又制成100MW双水内冷汽轮发电机。1959年制成220kV120MVA的三相变压器。在同一个时期,直流电机和一般交流电机方面,制成了6.3MW的大型感应电动机,带1150mm初轧机的4.93MW、4.5MW直流电动机一发电机组和10.9MW同步电动机的成套产品。在中小型电机方面,开始了J₂、JO₂异步电机的新系列设计和样机试制工作。

1961年以后,在“调整、巩固、充实、提高”八字方针的指导下,我国电机工业在发展新品种、提高产品质量和产量方面,又取得了很大成绩。J₂、JO₂新系列正式投产,新系列和旧系列相比,效率提高、体积缩小、重量减轻。在中小型异步电机、直流电机和微电机方面各有十几个至几十个系列。农用小型水轮发电机和50MW以下汽轮发电机也经过整顿、总结、提高,设计出合乎我国情况的新系列。在大型电机方面,1964年制成了225MW水轮发电机。1969年制成了125MW双水内冷汽轮发电机,1972年制造了300MW双水内冷水轮发电

机和汽轮发电机。1970年制成了330kV、360MVA的大型电力变压器。

当前,我国生产的汽轮发电机有6, 12, 25MW的空冷系列;50、100、200、300、600MW由氢外冷和氢内冷系列(200、300MW为定子水内冷,转子氢冷)。双水内冷汽轮发电机形成了一个12、25、50、(75)、100、125、(200)、300MW的完整系列。此外,我国还生产了一台为整流负荷提供短时脉冲电源的4极、80MW,定子绕组采用双Y移30°接法的六相同步发电机。该机的研制成功为我国把六相绕组用于大型汽轮发电机创造了良好条件。

我国能生产适应不同水头、转速和功率以及与各种型式水轮机配套的水轮发电机。从功率讲,最大的为320MW;从外形尺寸讲,最大的为葛洲坝电站运行的170MW;该机定子外径为20m,推力负荷38MN,居世界前列。

我国电力变压器最主要的系列为220kV级产品,其中包括双绕组、无激磁调压系列(31.5~240MVA, $\pm 2 \times 2.5\%$);双绕组、有载调压系列(31.5~150MVA, $\pm 8 \times 1.5\%$),以及相应的三绕组系列和自耦变压器系列(无激磁调压)。近年来,还生产了500kV, 250/250/30MVA三绕组变压器。由于输配电工程的需要,也生产110kV、35kV、10kV等级系列变压器。

在直流电机方面,除了系列生产一般用途的中小型电机以及可控硅整流供电直流电动机外,还生产各种特殊用途的产品,如轧钢、舰艇和牵引用大型直流电机。目前我国生产的大型直流电机,电枢外径在1.2~3.8m之间,功率在1200~7000kW之间,其中有几种双电枢结构,最大的为 $2 \times 3250\text{kW}$ 、1000V、90/180r/min。我国生产的7000kW、1000V、375/506r/min直流电机,电枢周速达75.5m/s,换向难度及整个水平已接近国外水平。

在交流电机方面,系列生产的有中小型、中型、大型感应电机和同步电机以及调相机。其中最重要的是按国际电工委员会(IEC)标准自行设计的中小型感应电机Y系列,用以代替JO₂系列。Y系列是中小型感应电机的基本系列,可从中派生其他系列。该系列已于1982年定型,并在全国开始推广生产。此外,在单台电机方面,能反映我国生产水平的有:1)2极、6.3MW笼型感应电机,与锅炉给水装置配套;2)12极、10MW同步电动机,与电动机—发电机组的直流发电机配套;3)6极、15MW同步电动机,与空气压缩机配套;4)80极、7MW同步电动机,与立式水泵配套;5)6极、60MVA氢冷调相机。

此外,为了满足工农业和国防工业的发展,还生产各种用途的交直流电机、控制电机以及供风力发电、潮汐发电、地热发电、小水电站用的各种电机。

目前,我国高等院校和有关科研机关正在研制从Y系列感应电机派生的YX系列节能电机,并将其研究成果用于纺织电机及拖动其他生产机械的电机中。在变极节能、变频调速以及发展各种特殊用途的电机产品方面均取得了可喜的成绩。

虽然我国电机工业已取得了很大的成就,但与一些工业发达国家相比,在技术上还比较落后;目前美国已生产出单机容量为1152MW的2极汽轮发电机和700MW的水轮发电机,苏联已生产出1200MW的2极汽轮发电机和640MW的水轮发电机,瑞士已生产出1230MW的2极汽轮发电机。日本、英国、法国和联邦德国等也能生产500~1000MW的2极汽轮发电机。有些国家正在试制和生产1000~1500MW的4极汽轮发电机。目前,我国电机工业面临提高产品质量和发展新产品的科研任务。我们应当学习国外先进经验,为更快地发展我国电机工业作出新的贡献。

§0-4 电机中所用的材料和铁磁材料的磁化特性

电机是以磁场为媒介,利用电磁感应作用实现能量转换的。所以,在电机里,有引导磁通的磁路,和引导电流的电路。在带电导体之间以及带电导体与铁心之间还有绝缘物质,用以把带电部分分隔开来以构成电路。此外,还有既不属于磁路也不属于电路,而是构成电机整体所必需的结构部分。

为了减小电阻损耗 I^2R ,电路必须采用导电性能良好的导电材料,为此,电机绕组常采用紫铜线和铝线制成。

为了增加磁路的磁导率,使在一定的励磁磁势下产生较强的气隙磁场,此外,也为了降低铁耗,所以电机的铁心采用导磁性能高的硅钢片制成;而磁路的其他部分则常采用导磁性能较高的钢板和铸钢制成。

对于绝缘材料来说,要求介电强度高,耐热性能好。常用的绝缘材料有 A、E、B、F、H 等几种等级。由于各种绝缘材料的成分不同,所以耐热能力也不同。例如我国中小型电机常用的 B 级绝缘材料,当温度在 130°C 时,能长期使用,温度超过 130°C 时则老化很快;H 级绝缘材料则在 180°C 下能长期使用。

对结构材料来说,主要要求机械强度好,加工方便。常用的结构材料有铸铁、铸钢和钢板。在小型电机中也有采用铝合金的。

这里只着重讨论铁磁材料在磁方面的特性(包括导磁性、磁滞损耗和涡流损耗),为今后研究电机的磁路和运行特性打下基础。

一、铁磁材料的导磁性

铁磁材料包括铁、钴、镍以及它们的合金。实验表明,所有非铁磁材料的磁导率都接近于真空的磁导率 μ_0 。而铁磁材料的磁导率 μ_F 比真空的约大几百到几千倍。对电机中常用的铁磁材料来说, μ_F 为 μ_0 的 $2\,000 \sim 6\,000$ 倍。因此,当线圈的匝数和所通过的电流相同时,铁心线圈激发的磁通量比空心线圈激发的磁通量大得多,因而电机的体积可以缩小。

铁磁材料之所以有高导磁性能,在于铁磁材料内部存在着很多很小的强烈磁化了的自发磁化区域,相当于一块块小磁铁,称为磁畴。磁化前,这些磁畴杂乱地排列着,磁场互相抵消,所以对外界不显示磁性。但在外界磁场的作用下,这些磁畴沿着外界磁场的方向作有规则的排列,顺着外磁场方向的磁畴增加了,逆着外磁场方向的磁畴减少了,结果磁场不能互相抵消,从而形成一个附加磁场叠加在外磁场上。由于铁磁材料的每个磁畴原来都是强烈磁化了的,具有很强的磁场,故它们产生的附加磁场,要比非铁磁物质在同一外界磁场下所产生的磁场强得多,所以铁磁物质的磁导率 μ_F 比非铁磁物质的大得多。

在非铁磁材料中,磁感应强度(即磁通密度) B 与磁场强度 H 成正比($B = \mu_0 H$),它们之间的关系是线性关系。但铁磁材料的 B 与 H 的关系不是线性关系,即 $B = f(H)$ 为一曲线,这条曲线称为磁化曲线,见图 0-1。可见,磁化曲线基本上可以分为三段:在磁化开始时,随着 H 的增加 B 缓慢增加,如图中 Oa 段所示。之后,随着 H 的增加, B 迅速增加,如 ab 段。再以后,随着 H 的增加, B 的增加缓慢下来,如 bc 段所示。 c 点以后,类似于

真空中的情况,随着 H 的增加 B 的增加趋于线性关系。与此相对应, $\mu_F = \frac{B}{H}$ 也随 H 的变化而变化。 $\mu_F = f(H)$ 的曲线也示于图 0-1 中。从图可见,开始磁化时, μ_F 较小,以后

迅速增大而达到最大值，再以后又减小下来。上述这种 H 增加时， B 之增加变慢，即随着 H 的增加而磁导率 μ_F 变小的现象，称为磁饱和。

磁饱和可用磁畴观点解释如下：在 Oa 段，外磁场较弱，顺着外磁场方向的磁畴在增加，逆着外磁场方向的磁畴在减少， B 的增加缓慢。在 ab 段，外磁场较强，虽然磁畴的增加与减少过程仍然在继续进行，但与此同时，逆着外磁场方向的磁畴开始倒转到与外磁场的方向一致，故 B 迅速增强。在 bc 段，当外磁场再加强时，所有的磁畴都转到与外磁场一致的方向，这时它们所产生的附加磁场达到最大值，即使 H 再增加， B 的增加也很有限，所以出现了磁饱和现象。

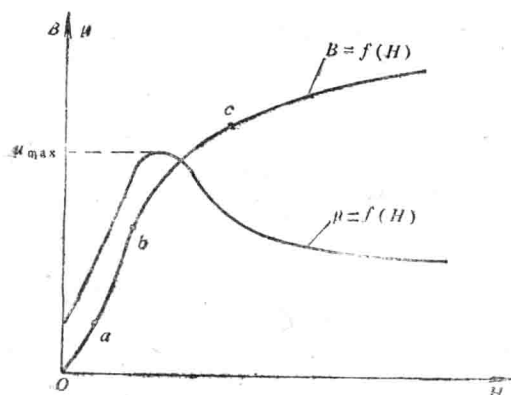


图0-1 铁磁材料的磁化曲线

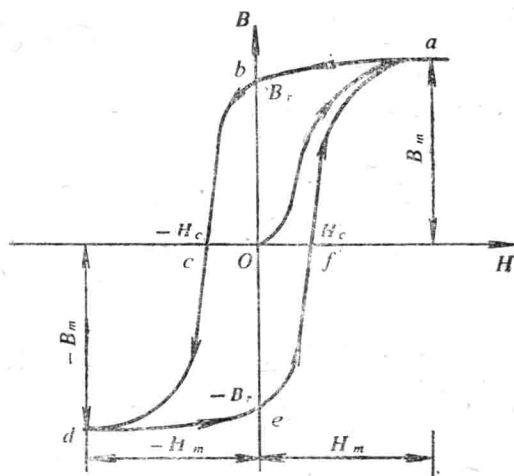


图0-2 铁磁材料的磁滞回线

二、磁滞现象

见图 0-2，在测取铁磁材料的磁化曲线时，当 H 由零上升到某个最大值 H_m 时， B 沿磁化曲线 Oa 上升；当 H 由 H_m 下降到零时， B 不是沿着 aO 下降，而是沿着另一条曲线 ab 变化。当 H 由零变到 $-H_m$ ，即进行反向磁化时， B 沿着曲线 bcd 变化。当 H 由 $-H_m$ 上升到零时， B 沿曲线 de 变化。当 H 再由零上升到 H_m 时， B 沿着 efa 上升又几乎回到了 a 点。这样反复磁化一个循环时，就得到了一个闭合回线 $abcdefa$ ，称为铁磁材料的磁滞回线。不同的铁磁材料有不同的磁滞回线。对同一铁磁材料， B_m 愈大，则磁滞回线所包围的面积愈大。

从磁滞回线可以看出，上升磁化曲线与下降磁化曲线不重合。下降时， B 的变化总是滞后于 H 的变化，当 H 下降到零时， B 不是下降到零而是下降到某一数值 B_r ，这种现象称为磁滞， B_r 称为剩余磁感应强度，而对应于 $B=0$ 时的 H 称为“矫顽力”，它们是铁磁材料磁性能的两个重要参数。由于存在磁滞现象，铁磁材料的磁化过程是不可逆的。磁滞现象的产生是由于铁磁材料中的磁畴在外磁场作用下，发生增加和倒转时，彼此之间产生“摩擦”。由于这种“摩擦”的存在，当外磁场停止作用后，磁畴与外磁场方向一致的排列便被保留下来，不能恢复原状，因此形成了磁滞现象和剩磁。

同一铁磁材料在不同的 B_m 值下有不同的磁滞回线，因此用不同的 B_m 值可测出许多不同的磁滞回线。把所有磁滞回线在第一象限内的顶点连接起来而得到的磁化曲线称为铁磁材料的基本磁化曲线或平均磁化曲线，见图0-3。从图0-3的磁滞回线可以看出，磁感应强度 B 是磁场强度 H 的多值函数，即同 $-H$ 值可以有不同的 B 值与之对应，到底是哪一个 B 值，决定于铁磁材料是处于磁化还是退磁，即取决于过去的磁化状态。这就使磁路计算时已知 H 求

B (或反之) 变得很复杂, 利用基本磁化曲线就解决了这一复杂问题。因为在基本磁化曲线上, 虽然 $B = f(H)$ 仍是非线性关系, 但却是单值的。工程上所用的磁化曲线或相应的数据表就是基本磁化曲线。应当指出, 在进行磁路计算时利用基本磁化曲线代替磁滞回线是有一定误差的, 但这种误差从工程观点上看是允许的。

电机、电器及其它电工设备中所用的导磁材料除铁磁材料外, 还有一种硬磁材料, 其特点是磁滞回线面积宽, 矫顽力 H_c 特别大, 可达几万、甚至达 10^6 A/m , 且磁导率很小。此类材料一经磁化, 较难退磁, 能长期保存磁性, 故用于制造永久磁铁。通常用剩余磁感应强度 B_r , 矫顽力 H_c 和最大磁能积 $(BH)_m$ 三项指标表征其磁性能。硬磁材料有铁氧体、铝镍钴和稀土钴等三类。其中稀土钴永磁材料是近年发现的新材料, 其 B_r 、 H_c 和 $(BH)_m$ 最大, 是一种良好的永磁材料, 我国的稀土钴储藏量居世界首位, 因此采用稀土钴是当前永磁材料及永磁电机的发展方向。

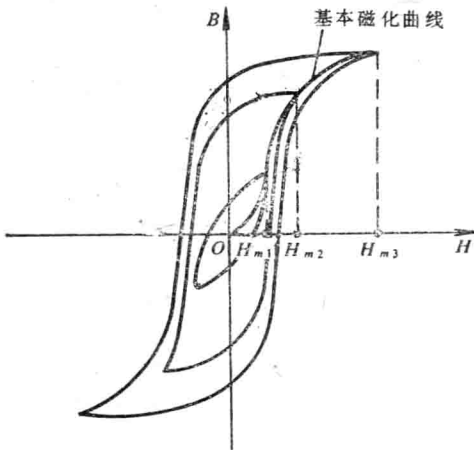


图0-3 基本磁化曲线

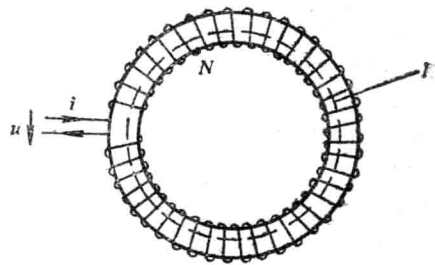


图0-4 铁心圆环

三、磁滞损耗

如前所述, 铁磁材料在交变磁场中反复磁化时, 磁畴之间不停地互相摩擦, 消耗能量, 因此引起损耗。这种损耗称为磁滞损耗。为了定量地分析磁滞损耗, 讨论由硅钢片制成的圆环, 上面紧密地缠绕 N 匝线圈, 见图0-4。由于线圈紧密缠绕, 故可略去漏磁, 认为沿铁心整个长度上各截面穿过的磁通 Φ 相等且均匀分布, 因此沿磁路平均长度 l 上各点的 B 和 H 也是相等的。应用全电流定律于圆环的闭合磁路上, 可得

$$\oint H dl = \sum i = Ni \quad (0-1)$$

即

$$Hl = Ni$$

或

$$i = \frac{Hl}{N}$$

在外加电压 u 的作用下, 电源供给圆环的瞬时功率为

$$p = ui$$

此功率一部分消耗在线圈的电阻上, 另一部分则消耗于铁心中。铁心中消耗的瞬时功率为

$$p' = u' i = N \frac{d\phi}{dt} i = N \frac{Hl}{N} \frac{d(BA)}{dt} = HlA \frac{dB}{dt} = V H \frac{dB}{dt} \quad (0-2)$$

式中 A ——圆环的截面积；

$V = Al$ ——圆环铁心的体积；

$u' = N \frac{d\phi}{dt}$ ——外加电压 u 用以平衡铁心线圈内感应电势 $-N \frac{d\phi}{dt}$ 的一个分量。

铁心消耗的平均功率为

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T u' i dt = \frac{1}{T} \int_0^T V H \frac{dB}{dt} dt = fV \oint H dB$$

式中 f ——电流交变的频率；

T ——电流变化的周期， $T = \frac{1}{f}$ 。

上述积分实际上就是沿磁滞回线的积分，故磁滞损耗与磁滞回线的面积、电流交变的频率和铁心的体积成正比。由于不同铁磁材料的磁滞回线的面积大小不同，故磁滞损耗的大小不同。另外，对同一铁心，磁感应强度最大值 B_m 愈大，则磁滞回线的面积愈大，磁滞损耗也愈大。

磁滞损耗的计算公式一般写成

$$p_h = k_h f B_m^\alpha V \quad (0-3)$$

式中 k_h ——取决于不同材料的系数；

α ——由实验确定的指数，对常用的硅钢片，当 $B_m = 0.1 \sim 1.0T$ 时， $\alpha = 1.6$ ；当 $B_m = 1.0 \sim 1.6T$ 时， $\alpha \approx 2$ 。

由于硅钢片磁滞回线的面积较小，故电机、变压器和电器的铁心常用硅铁片制成。

四、涡流损耗

当穿过铁心的磁通发生交变时，根据电磁感应定律，铁心内将感应出电势和电流。这些电流在铁心内部围绕磁通呈漩涡状流动，称为涡流，见图0-5。涡流在铁心中引起 $I^2 R$ 损耗，称为涡流损耗。现用图0-6所示的薄钢片来讨论涡流损耗的定量计算。

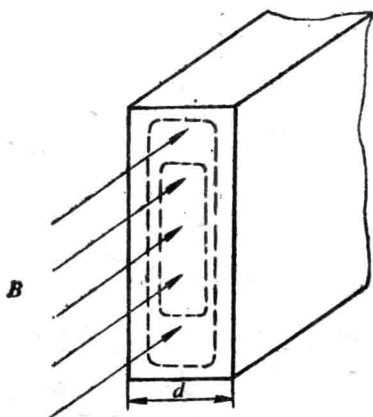


图0-5 一片硅钢片中的涡流

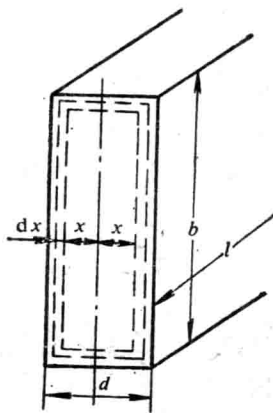


图0-6 硅钢片中涡流损耗的计算

由于涡流可近似地认为是沿长方形回路（如图0-6中之虚线）流动，而钢片的宽度 b 比其厚度 d 大得多，故可取涡流回路的一边等于钢片的宽度 b ，而另一边等于 $2x$ 。在正弦磁通下，此涡流回路内所感应的电势按§0-5推导的公式(0-9)计算为

$$E_w = \sqrt{2} \pi f b \cdot 2x B_m$$

由于钢片很薄，涡流回路的电阻可近似地认为等于两边长度上的电阻，即电阻

$$dR = \rho \frac{2b}{ldx}$$

式中 ρ ——钢片的电阻率。

单位时间内钢片内的涡流损耗为

$$d p_w = \frac{E_w^2}{dR} = \frac{4\pi^2 f^2 l b B_m^2}{\rho} x^2 dx$$

如果忽略磁通在截面上分布的不均匀性，则在钢片整个体积内能量的损耗为

$$p_w = \int_0^{\frac{d}{2}} \frac{4\pi^2 f^2 l b B_m^2 x^2}{\rho} dx = \frac{\pi^2 f^2 d^3 B_m^2 V}{6\rho} \quad (0-4)$$

式中 $V = lbd$ ——钢片的体积。

上式表明，涡流损耗与频率 f 的平方、钢片厚度 d 的平方及最大磁感应强度 B_m 的平方成正比，而与钢片的电阻率 ρ 成反比。由此可见，为了减少涡流损耗，首先应减小钢片的厚度 d ，所以电工钢片的厚度做成 0.5mm 和 0.35mm；其次是增加涡流回路的电阻，因此电工钢片中常加入适量的硅，制成硅钢片，用以提高电阻率。同时，由于硅元素的加入，使硅钢片的饱和磁感应强度降低，磁滞回线的面积减小，磁滞损耗也降低；但磁导率降低，导磁性能稍差是其缺点。

含硅量 1%~2% 的钢片称为低硅钢片，其磁导率高，韧性好，便于轧制和冲剪加工，常用于中小型电机、电器和小型变压器中。含硅量 3%~4% 的钢片称为高硅钢片，磁滞损耗和涡流损耗较小，但磁导率稍低，较脆，一般用于大型电机和变压器中。

在电机和变压器的设计计算中，常把磁滞损耗和涡流损耗合在一起称为铁心损耗，简称铁耗。单位重量的铁耗通常用下列数值方程计算：

$$p_{Fe} = p_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} B_m^2 \quad (0-5)$$

式中 $p_{1/50}$ ——铁耗系数，其值在 1.05~2.50 范围内；

β ——指数，其值在 1.2~1.6 范围内，随硅钢片的含硅量而异；

f ——频率，单位为 Hz；

B_m ——磁感应强度，单位为 T；

p_{Fe} ——铁耗，单位为 W/kg。

§0-5 研究电机时常用的基本电磁定律

电机是转换能量形态的一种机械。发电机把机械能转换成电能，电动机把电能转换成机械能，变压器则把一种电压的电能量转换成另一种电压的电能量。但无论是发电机还是电动机或变压器，其工作原理都是建立在电磁感应定律、全电流定律、电路定律和电磁力定律等基础上，所以，熟练地掌握这些基本电磁定律，是深入研究电机基本理论的基础。下面简要地讨论这些定律。

一、全电流定律

1. 全电流定律 设空间有 n 根载流导体，导体中的电流分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 ……，则沿任