

高等学校试用教材

电机学

上册

华中工学院许实章主编

机械工业出版社

试用教材

电机学

上册

许实章主编

机械工业出版社

电 机 学

上 册

华中工学院 许实章 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

升本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $15 \frac{1}{2}$ ·字数 374 千字
1980 年 3 月北京第一版·1980 年 3 月北京第一次印刷

印数 00,001—23,000·定价 1.45 元

*

统一书号: 15033·4852



编 者 的 话

本书是根据 1978 年 4 月在天津召开的一机部高等院校对口专业座谈会精神, 和 1978 年 6 月在长沙召开的电机专业教材会议制订的《电机学》编写大纲进行编写的。

全书本着从特殊到一般的认识规律, 逐一论述直流电机、变压器、异步电机和同步电机四种典型电机的基本结构、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。书中对基本原理和物理概念进行了较详细的阐述, 对一些新型电机和有发展前途的特种电机作了扼要介绍。为使全书基本内容突出, 把一些比较复杂而非主干的内容, 如较复杂的直流和交流电枢绕组、齿谐波电势分析、异步电机圆图、同步电机励磁方式等放到书后作为附录, 以便读者结合各自需要自由选读。全书分上下两册出版, 上册包括概论、直流电机、变压器和附录 I, 下册包括交流电机共同问题、异步电机、同步电机、总结和附录 II 至 VI。

本书可作为高等学校电机专业的试用教材, 也可作为工企、发配电等强电专业的试用教材或教学参考书, 并可供有关工程技术人员参考。

本书由华中工学院许实章教授主编, 华中工学院熊衍庆同志、华南工学院潘观海副教授和蒋豪贤同志、浙江大学王毓东和许承千等同志参加编写。由湖南大学蒋定宇教授主审。

书稿编写的分工如下: 熊衍庆同志编写概论、变压器、交流电机的绕组、电势和磁势以及附录 II; 潘观海同志编写直流电机的前四章; 蒋豪贤同志编写直流电机的后三章和附录 I; 王毓东同志编写同步电机, 并和许承千同志合编附录 VI, 还有浙江大学沈云宝和钱张耀同志也参加了同步电机的部分编写工作; 许实章同志编写异步电机、总结、附录 III、附录 IV 和附录 V, 并对全书作了仔细修改。

蒋定宇教授和参加本书审稿会议的同志, 对本书提出了不少宝贵意见。在此谨向他们表示衷心感谢。

主 要 符 号 表

A ——线负载 (线负荷); 截面积	F_a ——电枢磁势 (最大值)
a ——直流电枢绕组并联支路对数	F_{ad} ——直轴电枢磁势 (最大值)
B ——磁密 (磁通密度, 磁感应强度)	F_{aq} ——交轴电枢磁势 (最大值)
B_{av} ——平均磁密	F_K ——换向极磁势
$B_{z1/3}$ ——距齿根 1/3 齿高处的磁密 (对转子)	F_δ ——气隙磁势
B_h ——气隙磁密	F_1, F_2 ——原、副方磁势
B_K ——换向极下的气隙磁密	F_m ——变压器激磁磁势
B_m ——磁密最大值	f ——频率; 力; 磁势的瞬时值
b ——宽度; 弧长	f_n ——额定频率
b_p ——主磁极实际极弧长度	G ——重量
b_i ——主磁极计算极弧长度	H ——磁场强度
b_{z1} ——沿电枢表面的齿宽度	h ——高度
b_K ——换向片宽度	h_z ——齿高
C ——常数; 电容	I ——电流 (交流表示有效值)
C_e ——电势常数	I_f ——励磁电流
C_M ——转矩常数	I_a ——电枢电流
C_{Fe} ——变压器线圈的对地电容	I_N ——额定电流
C_l ——变压器线圈的匝间电容	I_K ——短路电流
D ——直径	I_{cr} ——临界电流
D_a ——电枢外径	I_{st} ——起动电流
D_{ia} ——电枢内径	I_L ——负载电流
D_K ——换向器外径	I_m ——激磁电流
E ——感应电势 (交流为有效值); 电枢电势	I_μ ——磁化电流
E_m ——电势最大值	i ——电流的瞬时值
E_1, E_2 ——原、副方电势	J ——机组转动惯量
$E_{1\sigma}, E_{2\sigma}$ ——原、副方漏电势	j ——电流密度
e ——电势的瞬时值; 自然对数的底 ($e = 2.718$)	K ——换向片数; 系数
e_r ——电抗电势	k ——变比; 系数
e_{rov} ——电抗电势平均值	k_σ ——主极漏磁系数
e_L ——自感电势	k_δ ——气隙系数 (卡氏系数)
e_M ——互感电势	k_μ ——饱和系数
e_K ——换向元件中的旋转电势	L ——自感; 电感; 长度
F ——磁势	L_r ——换向元件等效合成漏电感
	L_σ ——漏电感
	l ——长度; 导体有效长度
	M ——转矩; 互感
	M_N ——额定转矩

M_{em} ——电磁转矩	u_k ——阻抗电压 (短路电压)
M_1 ——原动机转矩; 输入转矩	v ——线速度
M_2 ——负载转矩; 输出转矩	W ——能量 (储能)
M_0 ——空载制动转矩	w ——匝数
M_c ——机组总负载制动转矩	w_1, w_2 ——变压器原、副线圈匝数
M_j ——惯性转矩	w_y ——元件匝数
m ——相数	x ——电抗
N ——电枢导体数	$x_{1\sigma}, x_{2\sigma}$ ——原、副方漏电抗
n ——转速	x_k ——短路电抗
P ——功率	y ——节距; 合成节距
P_N ——额定功率 (额定容量)	Z ——电枢槽数; 阻抗
P_{em} ——电磁功率	Z_i ——虚槽数
P_{mec} ——机械功率	Z_1, Z_2 ——原、副线圈漏阻抗
P_1 ——输入功率	Z_L ——负载阻抗
P_2 ——输出功率	Z_k ——短路阻抗
P_0 ——空载功率 (空载损耗)	α ——系数; 角度
p ——损耗; 极对数	β ——系数; 角度
p_{cu} ——铜耗 (电阻损耗)	γ ——电导率
p_{Fe} ——铁耗	δ ——气隙长度
p_{mec} ——机械损耗	η ——效率
p_{ad} ——附加损耗	η_N ——额定效率
Q ——热量	η_{max} ——最大效率
R ——电阻	θ ——温度
R_m ——磁阻	λ ——比漏磁导; 散热系数
R_a ——电枢回路内电阻	μ ——导磁系数
R_f ——励磁回路总电阻	τ ——极距; 温升
R_L ——负载电阻	τ_N ——额定温升
r ——电阻	Φ ——磁通; 每极磁通; 变压器主磁通
r_a ——电枢回路各绕组电阻	Φ_m ——主磁通最大值
r_f ——励磁绕组内电阻	Φ_σ ——漏磁通
S ——面积; 元件数; 视在功率	ϕ ——磁通瞬时值
S_N ——额定视在功率 (变压器容量)	$\phi_{1\sigma}, \phi_{2\sigma}$ ——原、副线圈的漏磁通瞬时值
T ——时间常数; 周期	φ ——相位角
t ——时间	ψ ——磁链; 相位角
t_1 ——齿距	Ω ——机械角速度
U ——电压 (交流为有效值)	ω ——角频率
U_N ——额定电压	$*$ ——右上角加星标的为标么值
U_f ——励磁电压	$'$ ——右上角加撇的为折算值
U_{Kmax} ——换向器片间电压最大值	
u ——电压瞬时值; 虚槽数	

目 录

编者的话

主要符号表

概论	1
§ 0-1 电机在国民经济中的作用	1
§ 0-2 电机的主要类型	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特性	3
§ 0-5 研究电机时常用的基本电磁定律	5
§ 0-6 机电能量转换过程	13

第一篇 直 流 电 机

第一章 直流电机的工作原理和基本结构	17
§ 1-1 直流电机的工作原理	17
§ 1-2 直流电机的主要结构部件	19
§ 1-3 直流电机按励磁方式分类	24
§ 1-4 直流电机的额定值	25
§ 1-5 我国直流电机制造概况	26
§ 1-6 小结	27
第二章 直流电机的磁路、电枢绕组和电枢反应	28
§ 2-1 直流电机空载时的磁路	28
§ 2-2 气隙所需的磁势	29
§ 2-3 电机的磁化曲线	31
§ 2-4 直流电机电枢绕组基本特点	35
§ 2-5 单迭绕组	37
§ 2-6 单波绕组	40
§ 2-7 电枢绕组的感应电势	44
§ 2-8 直流电机的电枢磁势和磁场	45
§ 2-9 交轴电枢反应和直轴电枢反应	48
§ 2-10 小结	49
第三章 直流发电机	52
§ 3-1 直流电机中的能量转换和电磁转矩	52
§ 3-2 直流发电机的电势、功率和转矩平衡方程式	53
§ 3-3 直流电机中的损耗和效率	55
§ 3-4 他励发电机的特性	57
§ 3-5 并励发电机的自励条件和特性	61
§ 3-6 复励发电机的特点	66
§ 3-7 各种直流发电机的应用范围	66

§ 3-8 小结	67
第四章 直流电动机	69
§ 4-1 电机的可逆原理	69
§ 4-2 直流电动机的功率、转矩和电势平衡方程式	71
§ 4-3 直流电动机的起动	72
§ 4-4 直流电动机的工作特性	77
§ 4-5 直流电动机的机械特性	81
§ 4-6 电力拖动机组稳定运行的条件	83
§ 4-7 直流电动机的调速	85
§ 4-8 直流电动机的制动	91
§ 4-9 各种直流电动机的应用范围	94
§ 4-10 小结	95
第五章 直流电机的换向	98
§ 5-1 换向过程	98
§ 5-2 换向的电磁理论	99
§ 5-3 产生火花的原因	104
§ 5-4 改善换向的方法	106
§ 5-5 电位差火花、环火的形成与防止	109
§ 5-6 换向的试验调整	110
§ 5-7 直流电机运行时对无线电的干扰及其抑制方法	112
§ 5-8 小结	113
第六章 特种直流电机及可控硅整流供电直流电机的特点	116
§ 6-1 直流伺服电动机	116
§ 6-2 直流力矩电动机	117
§ 6-3 直流测速发电机	119
§ 6-4 交轴磁场电机放大机	120
§ 6-5 无换向器直流电动机	122
§ 6-6 可控硅整流供电的直流电动机的特点	125
§ 6-7 单极直流电机及单极超导直流电机	128
§ 6-8 磁流体发电机	131
§ 6-9 小结	132
第七章 电机的发热和冷却	134
§ 7-1 电机的温升及温升限度	134
§ 7-2 电机中常用的绝缘材料及其容许温度	136
§ 7-3 电机的发热和冷却过程	137
§ 7-4 电机的定额	138
§ 7-5 电机的冷却方式及机壳的防护形式	139
§ 7-6 小结	141

第二篇 变 压 器

第八章 变压器的基本工作原理和结构	143
§ 8-1 变压器的基本工作原理和分类	142

§ 8-2 变压器结构的主要部件	144
§ 8-3 变压器的发热与冷却	149
§ 8-4 额定值	151
§ 8-5 我国变压器发展概况	151
§ 8-6 小结	152
第九章 变压器的基本原理	154
§ 9-1 变压器的空载运行	154
§ 9-2 变压器的负载运行	159
§ 9-3 变压器的漏抗计算和参数测定	166
§ 9-4 标么值	170
§ 9-5 变压器的运行特性	175
§ 9-6 小结	179
第十章 三相变压器	182
§ 10-1 三相变压器的磁路系统	182
§ 10-2 三相变压器的电路系统——线圈的连接法和连接组	183
§ 10-3 三相变压器线圈的连接法和磁路系统对电势波形的影响	186
§ 10-4 变压器的并联运行	188
§ 10-5 小结	192
第十一章 三相变压器的不对称运行	195
§ 11-1 对称分量法	195
§ 11-2 Y/Y_0 连接三相变压器的单相负载	197
§ 11-3 小结	202
第十二章 变压器的瞬变过程	204
§ 12-1 变压器空载合闸时的瞬变过程	204
§ 12-2 副方突然短路时的瞬变过程	206
§ 12-3 变压器的过电压现象	208
§ 12-4 小结	212
第十三章 三线圈变压器及其他用途变压器	214
§ 13-1 三线圈变压器	214
§ 13-2 自耦变压器	218
§ 13-3 电流互感器和电压互感器	221
§ 13-4 整流变压器	222
§ 13-5 小结	228
附录 I 直流电枢绕组的补充问题	230
§ I-1 复迭绕组	230
§ I-2 复波绕组	231
§ I-3 直流电枢绕组的对称条件	232
§ I-4 直流电枢绕组的均压线	234
§ I-5 蛙形绕组	238
附表 1 50 赫芝、0.5 毫米、 D_{23} 磁化曲线	239

概 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、传输和使用有关的能量转换机械，不仅是工业、农业和交通运输业的重要设备，而且在日常生活中的应用也愈来愈广泛。

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，广泛地应用各种电动机。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、造纸机等都大量采用电动机拖动。一个现代化工厂需要几百台至几万台电机。

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动机和航空电机。

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，电机的应用也愈来愈广泛。

§ 0-2 电机的主要类型

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。

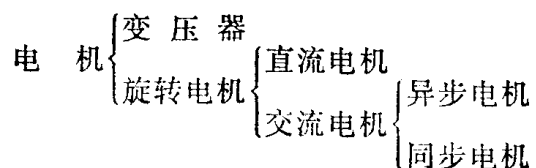
电机的分类方法很多，按其功能来看，可分为：

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，除变压器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，后者又分为异步电机和同步电机。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 200 千瓦，电动机不超过 180 千瓦，变压器不超过 2000 千伏安。成套的发电设备全由外国进口。

解放后，在共产党和毛主席的英明领导下，我国电机工业同国民经济各部门一样，得到迅速发展。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 3000 千瓦的水轮发电机、300 千瓦的直流电机和 940 千瓦的异步电机。

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 145.5 万千瓦，是 1949 年的 23.9 倍。在单机容量方面，先后制成了 6000 千瓦、12000 千瓦汽轮发电机和 10000 千瓦水轮发电机。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 72500 千瓦水轮发电机，50000 千瓦氢冷和 100000 千瓦氢内冷汽轮发电机。1958 年，还试制成功世界首创的 12000 千瓦双水内冷汽轮发电机，1960 年又制成 100000 千瓦双水内冷汽轮发电机。1959 年制成 220 千伏 120 兆伏安的三相变压器。在同一个时期，直流电机和一般交流电机方面，制成了 6300 千瓦的大型异步电动机，带 1150 毫米初轧机的 4930 千瓦、4500 千瓦直流电动机-发电机组和 10900 千瓦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 50000 千瓦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 225 兆瓦水轮发电机。1969 年制成了 125 兆瓦双水内冷汽轮发电机，1972 年制造了 300 兆瓦双水内冷水轮发电机和汽轮发电机。1970 年制成了 330 千伏、360 兆伏安的大型电力变压器。在直流电机

方面,目前已能生产可控硅整流供电直流电动机。

虽然我国电机工业已取得很大的成就,但是与一些工业发达的国家相比,在技术上还很落后。目前美国已生产出单机 1140 兆瓦的两极汽轮发电机和 700 兆瓦的水轮发电机,苏联已生产出 1200 兆瓦的两极汽轮发电机和 640 兆瓦的水轮发电机。日本、英国、法国、瑞士和西德等也能生产 500~1000 兆瓦的两极汽轮发电机。有些国家正在试制和生产 1000~1500 兆瓦四极汽轮发电机。我们应当学习国外先进经验,为更快地发展我国电机工业做出新的贡献。

§ 0-4 电机中所用的材料和铁磁材料的特性

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。

为了增加磁路的导磁系数,使在一定的励磁电流下产生较强的气隙磁场,所以电机和变压器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 E 级绝缘材料,当温度在 120°C 时,能长期使用,温度超过 120°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。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。

在这一节里,我们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提供基础。

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,所有非铁磁材料的导磁系数都接近于真空的导磁系数 μ_0 。而铁磁材料的导磁系数 μ_r 比真空的约大几百到几千倍。对电机中所用的铁磁材料来说, μ_r 为 μ_0 的 2000~6000 倍。因此,在同样大小的电流下,铁心线圈的磁通比空心线圈的磁通大得多。

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扩大了,逆着外磁场方向的磁畴缩小了,结果磁场不能互相抵消,从而形成一个附加磁场迭加在外磁场上。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强得多,所以铁磁物质的导磁系数 μ_r 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。铁磁材料不然， 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，如图0-1所示。从图可见，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 的增加又缓慢下来，如 bc 段所示。与此相对应， $\mu_{Fe} = \frac{B}{H}$ 也随 H 的变化而变化。 $\mu_{Fe} = f(H)$ 的曲线也示于图0-1中。从图可见，开始磁化时， μ_{Fe} 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，也即随着 H 的增加而导磁系数 μ_{Fe} 变小的现象，称为磁饱和。

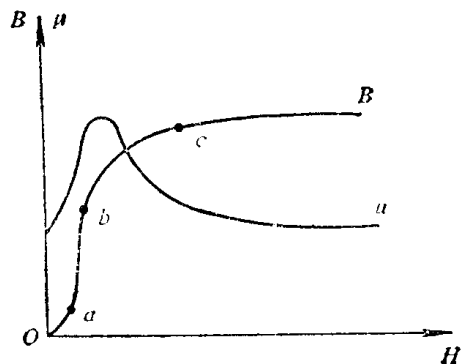


图0-1 铁磁材料的磁化曲线

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扩大，逆着外磁场方向的磁畴在缩小， B 的增加缓慢。在 ab 段，外磁场较强，虽然磁畴的扩大与缩小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，所以出现了饱和现象。

二、磁滞现象和磁滞损耗

如图0-2所示，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， H_m 愈大，则磁滞回线的面积愈大。

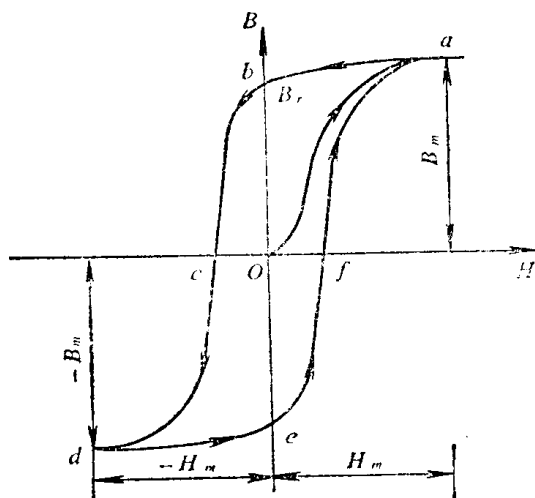


图0-2 铁磁材料的磁滞回线

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。由于存在磁滞现象，铁磁材料的磁化过程是不可逆的。在某一 H 下的 B 值要看以前的磁化过程如何。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，发生扩大和倒转时，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 H_m 值下有不同的磁滞回线，因此用不同的 H_m 值可测出许多不同的磁滞回线。把所有磁滞回线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, 工程上所用的磁化曲线就是这种磁化曲线。

如前所述, 铁磁材料在交变磁场的作用下而反复磁化过程中, 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。磁滞回线面积愈大, 损耗愈大。 B_m 愈大时, 磁滞回线面积亦愈大。因此, 试验表明, 交变磁化时, 磁滞损耗 p_h 与磁通的交变频率 f 成正比, 与磁通密度的幅值 B_m 的 α 次方成正比, 即

$$p_h \propto f B_m^\alpha \quad (0-1)$$

对常用的硅钢片, 当 $B_m = 1.0 \sim 1.6$ 韦/米² 时, $\alpha \approx 2$ 。由于硅钢片的磁滞回线面积较小, 所以电机和变压器的铁心都采用硅钢片。

三、涡流损耗

当通过铁心的磁通发生交变时, 根据电磁感应定律, 铁心内将感应电势和产生电流。这些电流在铁心内部围绕磁通呈漩涡状流动, 如图 0-3 所示, 称为涡流。涡流在铁心中引起损耗 ($i^2 r$), 称为涡流损耗。设 I_w 和 E_w 分别为涡流和产生涡流的电势, r_w 为涡流回路的等效电阻, 则涡流损耗可用下式表示:

$$p_w = I_w^2 r_w = I_w r_w \frac{E_w}{r_w} = \frac{E_w^2}{r_w}$$

由于感应电势 E 与磁通交变频率 f 和磁通幅值成正比, 而后者又与磁通密度的幅值 B_m 成正比, 因此, 涡流损耗与 $f^2 B_m^2$ 成正比, 即 $p_w \propto \frac{f^2 B_m^2}{r_w}$ 。进一步试验表明, 对电工钢片, 涡流损耗还与钢片厚度 d 的平方成正比, 故得

$$p_w \propto \frac{f^2 B_m^2 d^2}{r_w} \quad (0-2)$$

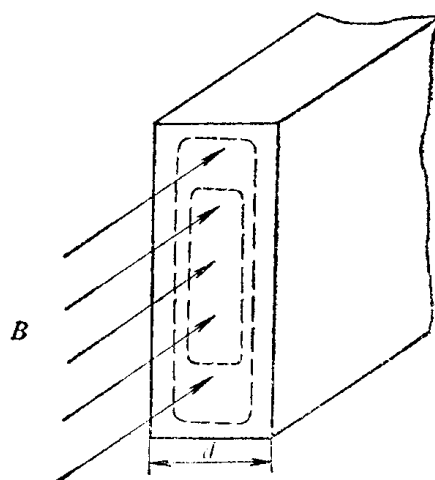


图0-3 一片硅钢片中的涡流

从上式可见, 为了减小涡流损耗, 首先是减小钢片的厚度, 所以电工钢片的厚度做成 0.5 和 0.35 毫米; 其次是增加涡流回路的电阻, 所以电工钢片中常加入 4% 左右的硅, 变成硅钢片, 用以提高电阻系数。

在电机和变压器中, 通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式计算:

$$p = p_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta B_m^2 \text{ (瓦/千克)} \quad (0-3)$$

式中 $p_{1/50}$ ——铁耗系数, 表示当 $B_m = 1$ 韦/米²、 $f = 50$ 赫时, 每千克硅钢片的损耗;
 $\beta = 1.2 \sim 1.6$ 。

§ 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 $I_1, I_2, I_3, \dots$, 则沿任何闭合路径 l , 磁场强度 $\vec{H}$ 的线积分 $\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l}$ 等于该闭合回路所包围的导体电流的代数和, 即

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Sigma I \quad (0-4)$$

这就是全电流定律。 ΣI 是回路所包围的全电流。在式(0-4)中, 若导体电流的方向与积分路径的方向符合右手螺旋关系, 该电流取正号, 反之取负号。对图 0-4 所示电流方向, I_1 和 I_2 应取正号, 而 I_3 应取负号。

在图 0-4 中, 还绘了另外一条积分路径 l' , 从全电流定律讲, 不论沿积分路径 l 还是 l' , 磁场强度的线积分的结果相等。这是因为无论线积分路径的长度和形状如何, 只要被闭合路径所包围的全电流相同, 积分的结果就必然相等。在图 0-4 中, 虽 l' 的积分路径较长, 但它距离载流导体较远, 磁场强度 $\vec{H}$ 较弱, 所以

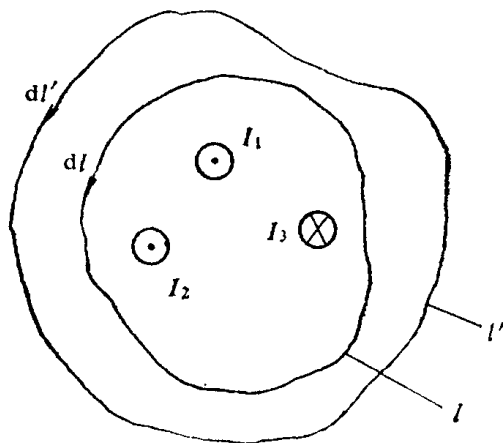


图0-4 全电流定律

$$\oint_{l'} \vec{H}' \cdot d\vec{l}' = \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

全电流定律在电机中应用很广, 它是电机和变压器磁路计算的基础。

把全电流定律应用到电机和变压器中的多段磁路时, 可改写成:

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \Sigma I = wI \quad (0-5)$$

式中 H_k ——第 k 段磁路的磁场强度(安匝/米);

l_k ——第 k 段磁路的平均长度(米);

wI ——磁势(安匝)。

上式中每一段的 HI 值称为该段磁路上的磁压降, 而 wI 是作用在整个磁路上的磁势, 在电机中就是励磁绕组的安匝数。所以式(0-5)表明, 作用在磁路上的总磁势等于各段磁路的磁压降之和。

2. 磁路欧姆定律 由于 $B = \mu H$, 同时磁通密度 B 等于磁通量 Φ 除以磁路的截面积 A , 即 $B = \frac{\Phi}{A}$, 所以式(0-5)可以写成:

$$F = wI = \sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^n \frac{B_k}{\mu_k} l_k = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\mu_k} \frac{\Phi}{A_k} l_k = \Phi \sum_{k=1}^n \frac{1}{\mu_k} \frac{l_k}{A_k} \quad (0-6)$$

式中 F ——磁路的磁势;

$\frac{1}{\mu_k} \frac{l_k}{A_k}$ ——第 k 段磁路的磁阻。

当磁路的磁阻用 R_k 表示时, 式 (0-6) 可写成:

$$F = \Phi \sum_1^n R_k$$

或

$$\Phi = \frac{F}{\sum_1^n R_k} \quad (0-7)$$

从上式可见, 磁路的磁通等于作用在磁路上的总磁势除以磁路的总磁阻, 这就是磁路欧姆定律。由于磁阻 $R_k = \frac{1}{\mu_k} \frac{l_k}{A_k}$, 所以磁路的磁阻主要取决于磁路的几何尺寸和所用材料的导磁系数。磁路的长度愈长, 截面积愈小, 磁阻就愈大。材料的导磁系数愈大, 则磁阻愈小, 所以电机的磁路采用铁磁材料。由于 $\mu_0 \ll \mu_{Fe}$, 所以即使气隙很小时, 电机的气隙磁阻也很大, 是整个磁路总磁阻的主要成分。

下面以图 0-5 为例说明无分支磁路的计算方法。

磁路计算的方法有两种, 一种是已知磁势和磁路的几何尺寸求磁通量; 另一种是已知磁通量和磁路的几何尺寸求磁势。电机和变压器中磁路计算的目的常属于后一种, 现对后一种计算方法予以介绍。

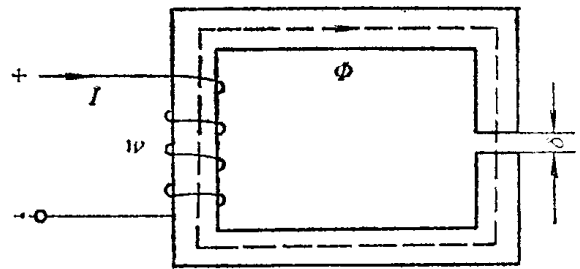


图0-5 无分支磁路

图 0-5 表示一个无分支磁路, 其中: 铁心采用 D_{23} 硅钢片, 它的截面积 $A_c = 9 \times 10^{-4}$ 米², 铁心的平均长度 $l_c = 0.3$ 米, 空气隙长 $\delta = 0.5 \times 10^{-3}$ 米, 线圈的匝数 $w = 500$ 匝。试求产生磁通 $\Phi = 9.9 \times 10^{-4}$ 韦时所需的励磁磁势 wI 和励磁电流 I 。

解 对所举例题, 磁路可分为铁心部分和气隙部分两段, 这时式 (0-5) 变成:

$$F = wI = H_c l_c + H_\delta \delta \quad (0-8)$$

式中 H_c 和 H_δ 分别为铁心和气隙中的磁场强度。从式 (0-8) 可见, 如果我们从已知条件能分别求出 $H_c l_c$ 和 $H_\delta \delta$, 则磁势 $F = wI$ 即可求出。

对铁心部分, 磁场强度 H_c 原则上可按 $H_c = \frac{B_c}{\mu_{Fe}} = \frac{1}{\mu_{Fe}} \frac{\Phi}{A_c}$ 进行计算, 但因铁磁材料的导磁系数 μ_{Fe} 不是常数, 随铁心饱和程度的变化而变化, 所以实际工作中不按上式进行计算, 而是先根据已知磁通量 Φ 和磁路截面 A_c 算出磁通密度 B_c , 再根据所用铁磁材料的磁化曲线 $B = f(H)$ 查出与磁通密度 B_c 对应的磁场强度 H_c , 进而算出 $H_c l_c$ 的值。

对图 0-5 的铁心部分, 磁通密度为:

$$B_c = \frac{\Phi}{A_c} = \frac{9.9 \times 10^{-4}}{9 \times 10^{-4}} = 1.1 \text{ (韦/米}^2\text{)}$$

由附录表 1 (D_{23} 硅钢片的磁化曲线表), 可查出当 $B_c = 1.1$ 韦/米² 时, $H_c = 493$ 安匝/米, 于是铁心磁压降为:

$$H_c l_c = 493 \times 0.3 = 148 \text{ (安匝)}$$

对于气隙部分, 当忽略磁通在气隙两边的边缘效应时, 可近似地认为气隙磁通密度与铁心中的磁通密度相等, 于是气隙磁压降为:

$$H_{\delta} \delta = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta = \frac{1.1}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.5 \times 10^{-3} = 438 \text{ (安匝)}$$

式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米，是真空的导磁系数。于是产生 $\Phi = 9.9 \times 10^{-4}$ 韦时所需之磁势 wI 为：

$$wI = H_c l_c + H_{\delta} \delta = 148 + 438 = 586 \text{ (安匝)}$$

$$I = \frac{F}{w} = \frac{586}{500} = 1.17 \text{ (安)}$$

在电机中，由于 $\mu_0 \ll \mu_{Fe}$ ，即使空气隙很小，气隙磁压降占总磁势的百分比也很大，对所举例题来说，这个比值为 $438/586 = 74.7\%$ 。

为了更好地理解磁路计算中的各种物理量，表 0-1 列出了磁路计算与电路计算中对应的物理量。

表 0-1 电路和磁路的对比

电 路	磁 路
电流 I (安)	磁通 Φ (韦)
电势 E (伏)	磁势 F (安匝)
电压降 IR (伏)	磁压降 ΦR_m (安匝)
电阻 $R = \rho \frac{l}{A}$ (欧)	磁阻 $R_m = \frac{1}{\mu} \frac{l}{A}$ (1/亨)
电导 $g = \frac{1}{R}$ (1/欧)	磁导 $\Lambda_m = \frac{1}{R_m}$ (亨)

二、电磁感应定律

1. 电磁感应定律 设有一个匝数为 w 的线圈放在磁场中，不论什么原因，例如线圈本身的移动或转动、磁场强度本身发生变化等，

造成了和线圈交链的磁通 ϕ 随时间发生变化时，线圈内都会感应出电势，这种现象叫做电磁感应。如果把感应电势的正方向与磁通的正方向规定得符合右手螺旋关系，则感应电势可用下式表示：

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

式中 $\psi = w\phi$ ——线圈所交链的磁链。

这是一个实验定律，其含意为：由电磁感应产生的电势与线圈的匝数和磁通的变化率成正比。式(0-9)右边的负号表示，如果在感应电势的作用下在线圈内流过电流，则该电流所产生的磁通起着反对磁通变化的作用。当磁通增加时（此时 $\frac{d\phi}{dt}$ 为正值，而 e 为负值），它企图减少磁通；而当磁通减少时（此时 $\frac{d\phi}{dt}$ 为负值，而 e 为正值），则企图增加磁通。这个规律，常称为楞次定律。

在式(0-9)中，当 ϕ 的单位用韦，而 t 的单位用秒时，则电势的单位为伏。

设和线圈交链的磁通随时间按正弦规律变化，即

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (0-10)$$

则感应电势为：

$$e = -w \frac{d\phi}{dt} = -w\omega \Phi_m \cos \omega t = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (0-11)$$

式中 E_m ——感应电势的幅值， $E_m = w\omega \Phi_m$ 。

式(0-11)表明，当磁通随时间按正弦规律变化时，线圈内的感应电势也随时间按正弦规律变化，但电势在相位上滞后于磁通 90° ，如图 0-6 所示。感应电势的有效值

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{w\omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} w \Phi_m = 4.44 f w \Phi_m \quad (0-12)$$

式中 Φ_m ——按正弦规律变化的磁通幅值(韦);

f ——磁通变化频率(赫);

w ——线圈的匝数;

E ——电势有效值(伏)。

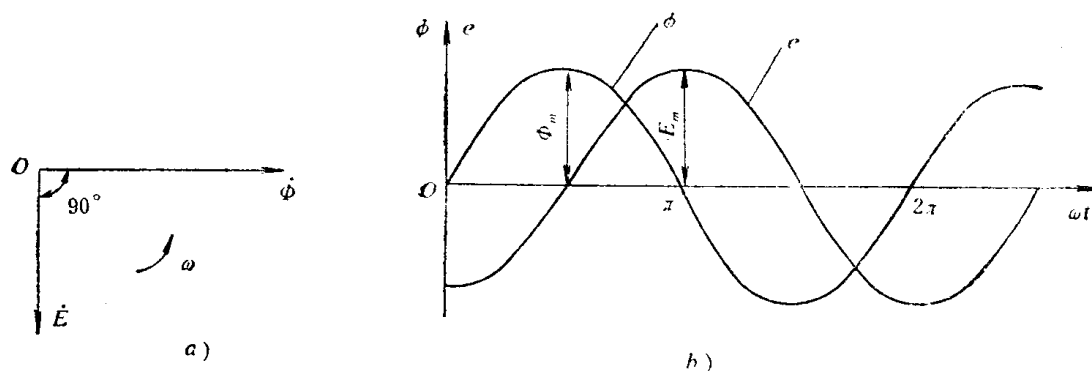


图0-6 电势与磁通的相位关系

此式为电机中经常用到的感应电势计算公式。

若线圈和磁场相对静止,如变压器的情况一样,则感应电势纯粹是由于和线圈交链的磁通本身随时间变化而产生,这种感应电势称为变压器电势。

如果磁场是恒定的(即不随时间变化),而感应电势是由于线圈和磁场之间有相对运动,因而引起和线圈交链的磁通发生变化而产生,则称这种感应电势为运动电势或速率电势。

对于运动电势,可以看成是由构成线圈的导体与恒定磁场相“切割”而产生。从这一思想出发,可从式(0-9)导出运动电势的计算公式如下:

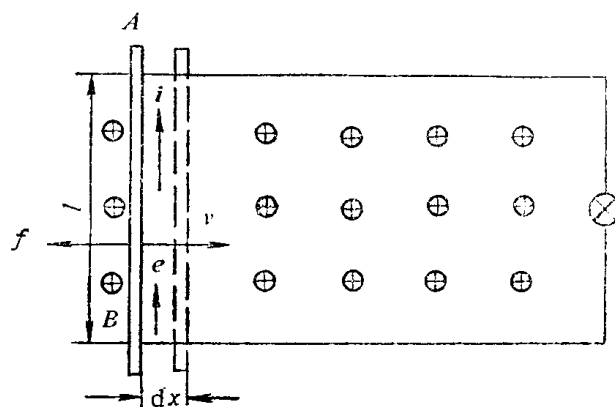


图0-7 运动电势的产生

图0-7表示在金属架上,一头放一根导体 AB ,另一头接一个灯泡。将导体和金属架放在磁通密度为 B 的恒定磁场里,并使导体和金属架构成的平面与磁力线垂直。图中 $\otimes$ 号表示磁力线的方向是进入纸面的。当导体在外力作用下从左向右平行移动时,设在 dt 时间内移动的距离为 dx ,则由导体和金属架构成的回路所交链的磁通量的变化为 $d\phi = -Bl dx$ (负号表示磁通减少),于是根据式(0-9),感应电势为:

$$e = -w \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d\psi}{dt} = Bl \frac{dx}{dt} = Blv$$

式中 v ——导体运动的线速度, $v = \frac{dx}{dt}$ 。

由此可得下述定律:

当导体在恒定磁场中运动而切割磁力线时,若磁力线、导体和运动方向三者互相垂直,则导体内的感应电势为

$$e = Blv \quad (0-13)$$