

高等院校电气工程系列教材

电机学教程

戴文进 徐龙权 等编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书主要论述电机学及其统一理论,全书包含绪论和六篇正文。

前五篇涵盖了变压器、直流电机、异步电机、同步电机和特种电机的内容,对以上各类电机的基本结构、工作原理、运行性能和工作特性进行了详尽的分析和论述。

本书特色分明,一改以往各种版本的《电机学》的编写模式,内容大为精简。且编排合理、结构新颖,各种电机的分类一目了然。

此外,本书首次在《电机学》教材中对“电机统一理论”进行了论述,可见,该轮新编教材实现了对电机学理论的创新。

与本书同时出版的还有与之配套的学习指导书,书中不但附有全部的“习题解答”,还有“内容提要”、“疑难剖析”、“拾遗补缺”和“习题补充”等针对性的学习指导内容,相信其对读者的学习会大为有益。

本书为电气工程及其自动化专业(含各专业方向)电机学课程教材,也可作为自动化及其他相关专业的电机原理课程的选用教材,还可供有关技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电机学教程/戴文进等编著. --北京:清华大学出版社,2012.11

(高等院校电气工程系列教材)

ISBN 978-7-302-30351-0

I. ①电… II. ①戴… III. ①电机学—高等学校—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第240822号

责任编辑:邹开颜 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:张雪娇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:19

字 数:457千字

版 次:2012年11月第1版

印 次:2012年11月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:32.00元

产品编号:047434-01

电机学是电气工程及其自动化专业领域内各专业方向的一门重要的专业基础课。但其教材虽然版本很多,却在编写体系上都沿用旧时电机制造专业教材的编写方式,因此,已远不能满足宽口径的电气工程及其自动化专业中的各专业方向的要求。

此外,由于教学改革的需要,专业课的课程门类与学时数均已大幅精简。这样,课程内容与学时之间的矛盾更日显突出,这便对出版一本能够解决以上矛盾,既在篇幅上大为精简,又在内容上涵盖更广的电机学教材提出了迫切要求。正是在这种情况下,本书对原版《电机学》教材进行了全新编著,并取名《电机学教程》。

本书一改以往的编写方式,删去了大量的各种电机内部结构,以及各种电磁现象细节的描述,使全书内容精简,重点突出。

此外,本书还在结构上进行了重新编排,将原版本《电机学》沿用的“四大电机”的编写形式,改为“五大类电机”的编写结构,即将原分散在“四大电机”内的各类特种电机集中编写在一篇中(取名为“特种电机”)。这样,既突出了“四大电机”这个电机学的主要内容,又使各种电机的分类一目了然。

虽然学界对“电机统一理论”的提法已有时日,但至今尚未见有关论著公开发表。本书首次提出了“电机统一理论”,相信这是电机学理论上的一次创新,也是对电机理论发展所做出的一点贡献。

本书由南昌大学戴文进教授和徐龙权副教授担任主编,负责全书的总体构思和统稿工作。戴文进撰写了“绪论”、第5篇(除第14章的14.6节外)和第6篇。徐龙权撰写了第1篇、第2篇和第14章中的14.6节。此外,张景明和杨莉副教授也参加了本书的编著工作,他们分别撰写了第4篇和第3篇。

本书所有作者虽都长期工作在电机学的教学第一线,且对该门课程的教学改革有一定体会。但毕竟水平有限,加之本书在结构体系和内容取舍上均作了较大改动,故书中谬误在所难免,敬请读者不吝指正。

编著者

2012年10月于南昌大学

主要符号表

A	区域, 面积	k_{μ}	饱和系数
a	并联支路对数	L	自感, 长度
B	磁通密度	L_m	励磁电感
B_{δ}	气隙磁通密度	L_1	同步电感
C	电容	L_{σ}	漏电感
C_e	电势常数	M	互感
C_T	转矩常数	N	匝数
E	开路电压, 感应电动势	N_{eff}	每相有效匝数
E_1	励磁支路电动势	N_f	励磁绕组匝数
E_{σ}	漏感应电动势	N_s	串励绕组匝数
F	磁动势	n	机械转速
F_a	电枢反应磁动势	n_1	同步转速
F_{ad}	直轴电枢反应磁动势	P	有功功率
F_{aq}	交轴电枢反应磁动势	P_{em}	电磁功率
f	机械力, 电源频率	P_{mec}	机械功率
f_s	转差频率	P_{syn}	比整步功率
H	磁场强度	p_{ad}	附加损耗
I	电流相量的幅值; 直流电流	p_{Cu}	铜损耗
I_a	电枢电流	p_{Fe}	铁损耗
I_d	电流的直轴分量	p_{mec}	摩擦和风电损耗
I_f	励磁电流	q	每极每相槽数
I_L	线电流, 负载电流	R_1	一次绕组电阻
I_q	电流的交轴分量	R_2	二次绕组电阻
I_{ϕ}	相电流	R_2'	折合到原边的二次绕组电阻
i	电流瞬时值	R_a	电枢绕组电阻
J	电流密度	R_{as}	串励绕组电阻
k	变压器变比	R_m	铁芯损耗电阻, 磁阻
k_A	自耦变压器	S	视在功率
k_c	短路比	s	转差率
k_M	静态过载倍数	T	电磁转矩
k_N	绕组系数	T_0	空载转矩
k_q	绕组短距系数	T_1	输入转矩
k_{st}	起动倍数	T_2	输出转矩
k_y	绕组分布系数	T_{syn}	比整步转矩

t	时间, 温度	Z_1	一次(定子)漏阻抗
U	电压	Z_m	励磁阻抗
U_0	空载电压	α	角度, 电角度
U_k	短路电压	β	夹角
$X_{1\sigma}$	一次(定子)绕组漏电抗	δ	气隙
$X_{2\sigma}$	二次(转子)绕组漏电抗	ε	小数, 误差
X_a	电枢反应电抗	η	效率
X_{ad}	直轴电枢反应电抗	θ	温升, 功率角
X_{aq}	交轴电枢反应电抗	λ	单位面积磁导, 导热系数
X_d	直轴同步电抗	μ	磁导率
X_f	励磁电抗	ν	谐波次数
X_m	励磁电抗	τ	极距
X_p	保梯电抗	Φ	磁通
X_q	交轴同步电抗	Φ_0	励磁磁通
X_i	直轴同步电抗	Φ_g	气隙磁通
X_σ	漏电抗	Φ_σ	漏磁通
y	绕组合成节距	ψ	磁链, 内功率因数角
y_1	绕组第一节距	Ω	机械角速度
y_2	绕组第二节距	ω	角频率, 电角速度
Z	交流绕组槽数		

第 0 章 绪论	1
0.1 电机史话.....	1
0.2 电机学学习方法总览.....	4

第 1 篇 变 压 器

第 1 章 变压器概览	6
1.1 变压器的用途.....	6
1.2 变压器的分类与基本结构.....	7
1.3 变压器的额定值与标么值.....	10
习题.....	11
第 2 章 变压器的运行分析	12
2.1 变压器的空载运行.....	12
2.2 变压器的负载运行.....	18
2.3 变压器的参数测定.....	22
2.4 变压器运行时的特性指标.....	26
习题.....	29
第 3 章 三相变压器	30
3.1 三相变压器的磁路系统.....	30
3.2 三相变压器的电路系统.....	31
3.3 三相变压器的空载电动势波形分析.....	34
3.4 三相变压器的并联运行.....	35
习题.....	39

第 2 篇 直 流 电 机

第 4 章 直流电机概览	42
4.1 直流电机的用途和基本工作原理.....	42
4.2 直流电机的结构.....	43

4.3	直流电机的励磁方式	45
4.4	直流电机的额定值	46
	习题	46
第5章	直流电机的运行分析	47
5.1	直流电机的磁场	47
5.2	直流电机的电枢绕组	51
5.3	电枢绕组的感应电动势与电机的电磁转矩	54
5.4	直流电机运行的基本方程式	56
5.5	直流电机的换向问题	59
	习题	61
第6章	直流电机的运行特性	63
6.1	直流发电机的运行特性	63
6.2	直流电动机的机械特性和工作特性	68
6.3	直流电动机的起动、调速与制动	72
	习题	77
第3篇 异步电机		
第7章	异步电机概览	82
7.1	异步电机的用途	82
7.2	异步电机的分类与基本结构	82
7.3	三相异步电动机的铭牌和额定值	85
	习题	86
第8章	三相异步电动机的运行原理	87
8.1	三相异步电动机定子绕组及其电动势	87
8.2	三相异步电动机绕组的磁动势	95
8.3	三相异步电动机的工作原理	98
8.4	三相异步电动机转子堵转时的电磁关系	101
8.5	三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	106
	习题	111
第9章	三相异步电动机的运行特性	113
9.1	三相异步电动机的功率与转矩	113
9.2	三相异步电动机的机械特性和工作特性	116
9.3	三相异步电动机的参数测定	125
9.4	三相异步电动机的起动、调速与制动	127
	习题	136

第4篇 同步电机

第10章 同步电机概览	140
10.1 同步电机的用途和分类	140
10.2 同步电机的基本结构	141
10.3 同步电机的额定值	142
习题	143
第11章 同步发电机的运行分析	145
11.1 同步发电机的空载运行	145
11.2 同步发电机对称负载时的电枢反应	146
11.3 隐极同步发电机的对称负载运行分析	150
11.4 凸极同步发电机的对称负载运行分析	154
11.5 同步发电机的空载和短路特性	159
11.6 同步发电机的零功率因数负载特性	162
11.7 外特性和调整特性	164
习题	166
第12章 同步发电机的并网运行	169
12.1 同步发电机的并联条件和方法	169
12.2 同步发电机的平衡方程式和功角特性	171
12.3 同步发电机有功功率的调节和静态稳定	175
12.4 同步发电机无功功率的调节和V形曲线	178
习题	181
第13章 同步电动机与同步调相机	184
13.1 同步电机的可逆原理	184
13.2 同步电动机的电动势方程式和相量图	185
13.3 同步电动机的功角特性和功率平衡方程式	186
13.4 同步电动机无功功率的调节和V形曲线	186
13.5 同步电动机的起动	187
13.6 同步调相机	188
习题	188

第5篇 特种电机

第14章 中小型特种电机	192
14.1 无换向器电动机	192
14.2 转子供电式三相并励交流换向器电动机	198
14.3 电磁转差调速异步电动机	203
14.4 直线电机	204

14.5	开关磁阻电动机	207
14.6	特种变压器的运行分析	211
	习题	217
第 15 章	微电机	219
15.1	驱动微电机	219
15.2	控制微电机	229
	习题	256
第 6 篇 电机统一理论		
第 16 章	基本电磁规律的对立统一	260
16.1	电动机中的情形	260
16.2	发电机中的情形	261
16.3	变压器中的情形	262
	习题	267
第 17 章	励磁系统方式的分类统一	268
17.1	单边励磁磁路的特点	268
17.2	双边励磁磁路的特点	271
	习题	273
第 18 章	功角平面分布的完美统一	274
18.1	同步电机稳定运行时的功率角区间	274
18.2	异步电机稳定运行时的功率角区间	276
18.3	直流电机稳定运行时的功率角	277
18.4	变压器运行时的功率角	278
	习题	280
第 19 章	静态稳定判据的集中统一	281
19.1	电磁功率随转速而变化的一类电机的判据	281
19.2	电磁功率随功率角而变化的一类电机的判据	285
	习题	287
第 20 章	分析工具的高度统一	288
20.1	四大电机的平衡方程	288
20.2	四大电机的等效电路	289
20.3	四大电机的相量图	290
	习题	291
	参考文献	292

0.1 电机史话

远古时代,人类以自身的力量为动力来源,人们肩背手提,挥臂而作。由于当时人类的体力有限,所能捕捉猎杀的动物和搬运的物品不多,因而生产力水平极为原始。后来,人类慢慢地学会了饲养动物,利用兽力来节省人力。这样,生产力水平便有所提高。随着人类的进一步进化和发展,人类又学会了利用大自然的动力来帮助人们干活。例如运用风力带动风车,运用水力带动水车等。这样,生产力水平便又上了一个台阶。直至十八世纪以前,社会生产的源动力还仍然停留在人力、畜力、风力和水力等原始动力的水平上。

然而,原始的人力、畜力、风力或水力是无法使生产力水平得到更大释放的。因而,人类一直在寻求更加强劲的生产动力。直至瓦特的蒸汽机面市后,才开创了一个新的动力时代——蒸汽机时代。

其实,瓦特并不是蒸汽机的原始发明者。古人在公元前 2 世纪就已经开始了对蒸汽机的探索。在瓦特之前,蒸汽机早已面世,这就是所谓的纽科门蒸汽机。但这种早期的蒸汽机耗煤量极大,效率也相当低。瓦特经过多年研究,逐渐发现了这种蒸汽机的弊病所在。在 1765—1790 年间,他进行了一系列技术创新和结构上的改进,使蒸汽机的效率提高了两倍多。这样,第一台现代意义上的蒸汽机终于诞生了。蒸汽机是第一次工业革命的开创性的发明,它的发明为世界带来了一种更加有效和更加强劲的动力。

由于蒸汽机的出现,冶金、煤矿和纺织业等得到了空前的发展。世界(当时主要是英国)的纺织业实现了机械化;冶金炼铁技术和煤矿业加快了工业化的步伐;1804 年和 1807 年先后出现了蒸汽机火车和蒸汽机轮船,从而大大改善了交通运输条件,促进了工业革命的发展。从此,人类生产和生活中的动力水平便迈上了一个新的台阶,人类的工业、现代和文明史也便大大地向前迈进了一步。

然而,蒸汽机的锅炉需承受重压,因而必须用结实的材料制造,故而蒸汽机相当笨重;蒸汽机的操纵十分复杂,因而锅炉的燃烧需有经验的人员专门看管;蒸汽机的启动相当缓慢,又不能随意停机,因而其操作十分不便;蒸汽机锅炉极易发生爆炸,因而作业面上的危险性较大。此外,由于蒸汽机的锅炉和汽缸是分离的,锅炉在工房外面燃烧,需将其燃料的热能传递给蒸汽机后再转化为机械能做功。这种外部燃烧方式的热损失相当大,因而蒸汽机的效率很低,一般只有 5%~8%,最好的也不超过 10%~13%,这是蒸汽机最大的缺点。因而,几乎在蒸汽机不断发展的同时,便有人开始研究将热机外燃烧方式改为内燃烧方式。也就是不用蒸汽做工作介质,而利用燃烧后的烟气直接推动活塞运动,将锅炉和汽缸合为一体,

这就是后来的内燃机。

1794年,英国工程师斯垂特在研究瓦特蒸汽机的基础上,制造了第一台内燃机。但是这台内燃机十分笨拙,其需要用人力将空气压入汽缸,然后喷入液体燃料(如松节油或板油等),再点火启动。1799年,法国工程师蓝蓬提出了以煤气作为燃料,用电火花来点火的内燃机设计方案。其后,英国工程师赖特设计爆发式内燃机,意大利工程师巴尔桑第研制出了自由活塞式的内燃机,等等。直至1860年,法国工程师雷诺终于制成了第一台实用的爆发式内燃机。这是一台单缸双动发动机,以煤气为燃料,活塞在它的前半冲程吸入煤气和空气的混合气,接着用电火花点燃,于是膨胀气体推动活塞完成后半个冲程。汽缸的另半部进行同样的过程,将活塞推回。这台内燃机的热效率只有4%,电火花点火也不可靠,但它第一次成为能带动生产机构的原动力机,这对内燃机的发展起到了巨大的促进作用。雷诺内燃机的运用,使人们开始探索内燃机理论。卡诺在研究热力学的同时开创了内燃机的基本原理的探讨,提出了压缩点火的可能性。1862年,法国工程师德罗夏发表了内燃机理论,阐述了取得最高效率和最佳经济性所需要的条件。他明确指出,要制造性能好的内燃机,必须使气体尽快膨胀到最大,并尽量提高膨胀的初始压力。如不能很好地满足这些要求,就会浪费大量气体,进而得不到最高效率和最佳的经济性。德罗夏提出了实现这些要求的具体步骤,就是把活塞运动分为四个冲程。按这种原理设计发动机就是四冲程内燃机,这在当时是能最有效地利用气体的内燃机,从此往后的内燃机大都运用这个原理。1876年,德国的奥古斯特·奥托运用四冲程原理,成功地制造了第一台四冲程内燃机,并取得了专利权,因此通常人们都将内燃机的发明归功于他。此间,越来越多的工厂都开始采用这种发动机来替代蒸汽机,内燃机的时代便从此开始了。

但是奥托煤气内燃机也有许多不便之处,其不能作为船舶和车辆等运输机械的动力。1859年,美国的宾夕法尼亚州打出了世界上第一口油井。此后,石油产量不断提高,汽油、煤油和柴油逐渐成为广泛应用的新燃料。

1883年,德国工程师完成了汽油内燃机的研制。1885年,英国的普雷斯特曼研制出了煤油内燃机。1892年,德国人狄塞尔制造了第一台自动点火式的柴油内燃机。1903年,美国人莱特兄弟用内燃机制造的飞机试飞成功,实现了人类翱翔天空的梦想,预告了人类历史上交通运输业的新纪元的来临。内燃机的发明,产生了动力机械史上的一次新革命。内燃机不仅效率高,而且种类繁多,用途广泛,其可运用于船舶、车辆和飞机等运输机械领域,因而大大地推动了交通运输业的革命,使汽车、轮船和飞机制造业得以迅速发展。此外,它还引起了农业生产的机械化变革等。

就在人类开始对内燃机的研究后不久,人们便注意到了电现象的存在,并开始对其进行研究。19世纪初叶,科学家们研究的重要课题,便是廉价并方便地获取电能的方法。1820年,奥斯特成功地完成了通电导线能使磁针偏转的实验。其后,不少科学家又对其进行了进一步的研究。他们指出磁针的偏转是因为受到力的作用,这种力便是机械力,其来自于电荷流动的电力。那么,能否通过磁场的作用使机械力与电力相互转换呢?

著名科学家安培是这项研究者的第一人,可惜他的实验并没有成功。1831年,英国科学家法拉第发现了电磁感应现象,提出了电磁感应定律,这便为随后的电机和无线电发明提供了理论依据。1834年,德国人亚哥比制成了第一台可供实用的直流电动机。1834年,人们将亚哥比的直流电动机用于拖动电动轮船试验。小船在涅瓦河上载运11人以4 km/h的

速度顺流而下,又逆流而上,大获成功。值得一提的是,当时还没有可供实用的直流发电机,为其供电的是化学电池。电动机的发明,实现了电能和机械能的转换,其为由电能向工业供给动力提供了条件。其后,人们在法拉第电磁感应定律的指导下,研制出了直流发电机,以此替代了价格昂贵的化学电池,为直流电动机的扩大应用提供了电源上的保证。

由此可见,在电机和电力拖动的发展史上,首先得到应用的是直流电动机,直至19世纪70年代,直流电及其电机在应用上还一直占据着主要地位。后来,随着电动机应用的不断扩大,用电量不断增加,而当时的直流电压又无法提高,因而在远距离输电方面遇到了困难,人们开始了对交流电的研究。

1871年,凡·麦尔准发明了交流发电机。1878年,亚布洛契可夫运用交流发电机和变压器发明了简单的照明供电装置。1885年,意大利物理学家费拉利斯发现了两相电流可产生旋转磁场。一年后,他与远在美国的垣斯拉几乎同时制成了两相感应电动机的模型。1888年,多里沃·多勃罗沃尔斯基提出了三相电制。当年,南斯拉夫裔美国人特斯拉便发明了三相感应电动机,这便奠定了现代三相电路和三相电机的基础。随后,三相交流电便迅速发展起来。这时,电灯、电车、电钻、电焊等电气产品如雨后春笋般地涌现。

1902年瑞典工程师丹尼尔森首先提出同步电动机的构想。同步电动机工作原理同感应电动机一样,其由定子产生旋转磁场,但转子绕组由直流供电。其转速固定不变,不受负载影响,因此同步电动机特别适用于钟表、电唱机和磁带录音机。

到20世纪初,各种主要的现代电机均已设计制造成功。但是,要将电力应用于生产,还是必须解决远距离输送的问题。1882年,法国人德普勒发明了远距离送电的方法。美国科学家爱迪生随后便建立了美国第一个火力发电站,并将输电线连接成网络,这便是现代电力网的雏形。

电力是一种优质而价廉的新能源,且特别便于远距离输送,便于控制和调节。它的广泛应用,推动了电力工业和电器制造业等一系列新兴工业的迅速发展,也为其他行业的发展提供了强大的动力。

在拖动方面,尽管上述在人类历史上曾经采用过的人力、畜力、蒸汽、内燃动力和液压等拖动方式至今还仍然或多或少地在沿用,但运用得最为广泛的还是由电动机组成的电力拖动系统。这是因为:

(1) 电能的生产、输送和分配十分方便;

(2) 电动机的种类和规格众多,且具各式各样的工作特性,能最大限度地满足大多数生产机械的不同要求;

(3) 电力拖动系统的操作和控制最为简便,便于实现生产机械的自动化和远动操作。

在随后的一百多年内,又相继出现了许多现代发电方式,比如风力发电、水力发电、火力发电、原子能发电、磁流体发电、地热发电和潮汐发电等。电力网络的建设也日新月异,电网规模不断扩大,输电距离越来越长,输电电压越来越高,配电网技术越来越先进。在电机的生产、研究和开发等方面,也取得了令世人瞩目的成就:发电机的构造日臻完善,效率越来越高,单机容量越来越大,电压等级越来越高;电动机的规格越来越多,品种越来越齐全,新型特种高性能的电动机层出不穷。

今天,人类已经置身于高度现代化的电气时代。当今世界如若离开了电机和现代电力,那简直是无法想象!电机对国民经济的重大意义,以及学习电机学的重要性是不言而喻的。

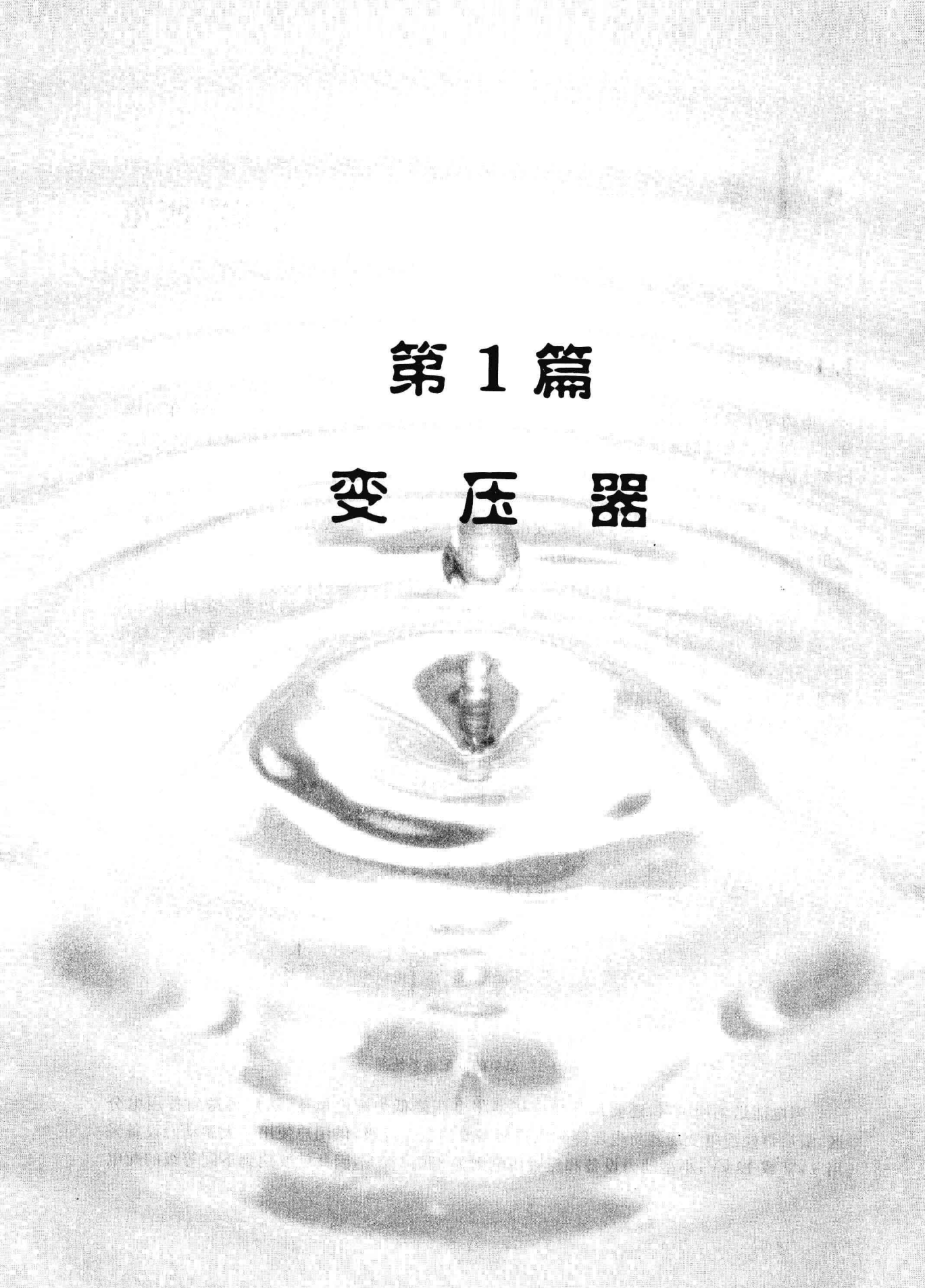
0.2 电机学学习方法总览

电机学的学习对象以四大电机,即变压器、直流电机、异步电机和同步电机为主,其总的学习方法和步骤是一致的,其可概括如下:

- (1) 了解或熟悉各类电机的基本结构及其他总体性的概貌情况;
- (2) 深入分析内部电磁关系,熟练掌握各类电机的运行原理及其分析方法;
- (3) 在以上分析的基础上,掌握各种电机的工作特性、外特性、机械特性、调速特性和启动特性等;
- (4) 根据以上所掌握的各种运行特性,熟知其运用场合,分析其运行状况。

第 1 篇

变 压 器



1.1 变压器的用途

电力变压器是一种静止的电器,它由绕在同一个铁芯上的两个或两个以上的绕组组成,绕组之间通过交变的磁通相互联系着。它的功能是将一种电压等级的交流电能,转变成为同频率的另一种电压等级的交流电能。

为了将发电厂发出的电能经济地传输、合理地分配和安全地使用,都要用到电力变压器。图 1-1 是简单的输配电系统图。发电机发出的电压不可能太高,一般只有 $10.5\sim 20\text{ kV}$,要想将发出的大功率电能直接送到很远的用电区去,几乎是不可能的。这是因为,低电压大电流输电,除了在输电线路产生很大损耗外,线路上产生的压降也足以使电能送不出去。为此,需要用升压变压器将发电机端电压升高到较高的输电电压。当输电的功率一定时,电压升高,电流就减小,输送过程产生的损耗将降低,能比较经济地将电能送出去。一般说来,输电距离越远,输送的功率越大,要求的输电电压也越高。例如,输电距离为 $200\sim 400\text{ km}$,输送容量为 $200\sim 300\text{ GW}$ 的输电线,输电电压一般需要 220 kV ,输电距离在 1000 km 以上,则要求有更高的输电电压。

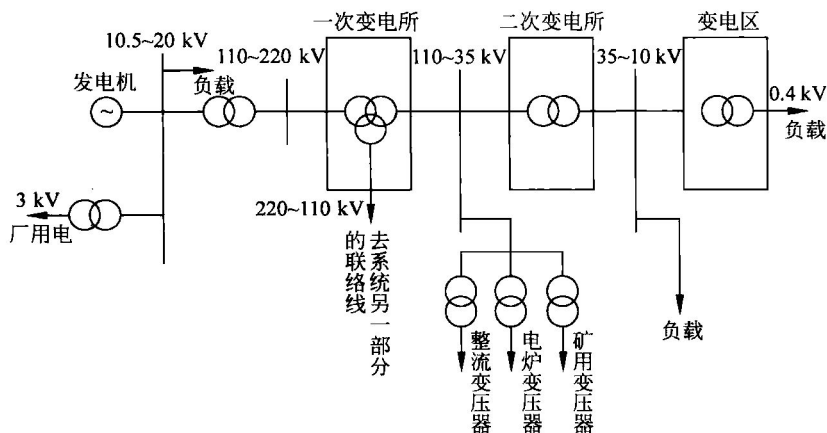


图 1-1 简单的输配电系统图

当电能送到用电区,还要用降压变压器将电压降低为配电电压,然后再送到备用电分区,最后再经配电变压器将电压降到用户所需要的电压等级,供用户使用。大型动力设备采用 6 kV 或 10 kV ,小型动力设备和照明用电则为 $380/220\text{ V}$,因此就要用到不同等级的配电

变压器。有时,为了将两个不同电压等级的电力系统彼此联系起来,还常常要用到三绕组变压器(如图 1-1 中的联络变压器)。此外,还有各种专门用途的变压器,如整流变压器、电炉变压器等。由此可见,变压器的用途十分广泛,其品种、规格也很多。通常,变压器的安装容量约为发电机安装容量的 6~8 倍。由此可见,电力变压器对电能的经济传输、灵活的分配和安全使用具有重要意义。

1.2 变压器的分类与基本结构

1.2.1 变压器的分类

变压器有多种分类方法。

按用途分类,有电力变压器和特种变压器;

按绕组数目分,有双绕组变压器、三绕组变压器和自耦变压器;

按相数分,有单相变压器和三相变压器。

电力变压器是电力系统中输配电的主要设备,容量从几十千伏安到几十万千伏安,电压等级从几百伏到 500 kV 以上。电力系统中用得最多的是高、低压两套绕组的双绕组变压器,其次是具有高、中、低三套绕组的三绕组变压器和高、低压绕组公用一个绕组的自耦变压器。

1.2.2 电力变压器的基本结构

电力变压器主要由铁芯、带有绝缘的绕组、油箱、变压器油和绝缘套管组成,下面主要介绍铁芯、绕组和油箱。

1. 铁芯

变压器的铁芯构成变压器的磁路部分。为了减小涡流损耗,变压器的铁芯用双面涂绝缘漆的电工钢片叠成,钢片的厚度为 0.35 mm。变压器的铁芯平面如图 1-2 所示。铁芯结构可分为两部分,C 为套线圈的部分,称为铁芯柱;Y 为用以闭合磁路部分,称为铁轭。单相变压器有两个铁芯柱,三相变压器有三个铁芯柱。

变压器的铁芯材料结构有两种基本形式。第一种是为如图 1-3(a)所示芯式结构。这种铁芯结构的特点是铁轭靠着绕组的顶面和底面,不包围绕组的侧面。它结构简单、工艺简单,因此国产电力变压器均采用芯式结构。第二种为如图 1-3(b)所示的壳式结构。

这种结构的铁芯不仅包围绕组的顶面和底面,而且还包围绕组的侧面。它机械强度高,制造复杂,耗材料多,仅在一些特种变压器中采用。

组成铁芯的钢片应先裁成所需用的形状和尺寸,称为冲片,然后按交错方式进行装配。图 1-4(a)表示单相变压器的铁芯,每层由四片冲片组合而成。图 1-4(b)表示三相变压器的铁芯,每层由六片冲片组合而成,每两层的冲片组合应用了不同的排列方式,使各层磁路的

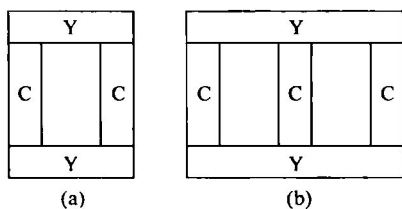


图 1-2 变压器的铁芯平面
(a) 单相变压器; (b) 三相变压器

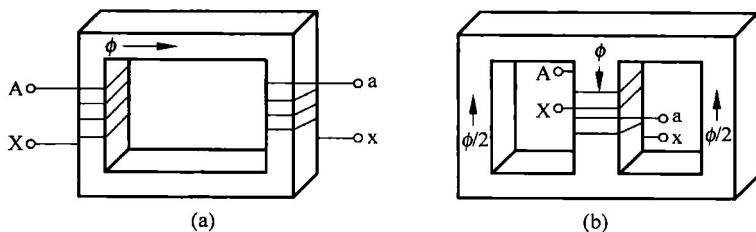


图 1-3 变压器的结构形式

(a) 芯式结构; (b) 壳式结构

接缝处互相错开,这种装配方式称为交叠装配。交叠装配可避免涡流在钢片与钢片之间流通,且因各层冲片交错相嵌,所以在将铁芯压紧时可用较少的紧固件而使结构简单。为提高磁导率和减少铁芯损耗,电力变压器一般采用冷轧硅钢片,为减少接缝间隙和励磁电流,有时还采用由冷轧硅钢片卷成的卷片式铁芯。

2. 绕组

绕组构成变压器的电路部分,一般用绝缘铜线或铝线绕制而成。在变压器中接到高压电网的绕组为高压绕组,接到低压电网的为低压绕组。变压器绕组的基本形式有同心式和交叠式两种,芯式变压器常用同心式绕组,壳式变压器常用交叠式绕组。如图 1-5(a)所示,高压绕组和低压绕组均做成圆筒形,然后同心地套在铁芯柱上。交叠式绕组又称为饼式绕组,如图 1-5(b)所示,高压绕组和低压绕组各分为若干个线饼,沿着铁芯柱的高度交错地排列着。为了排列对称起见,也为了使高压绕组离铁轭远一些以便于绝缘,高压绕组分为两个线饼,低压绕组分为一个线饼和两个“半线饼”。靠近上下铁轭处的线饼为低压“半线饼”,其匝数为位于中间的低压线饼匝数的一半。

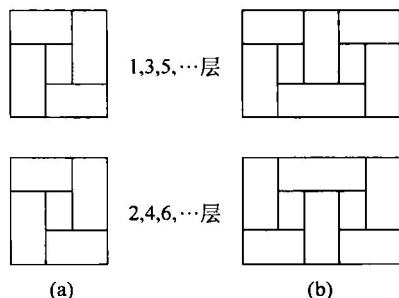


图 1-4 变压器铁芯的交叠装配

(a) 单相变压器; (b) 三相变压器

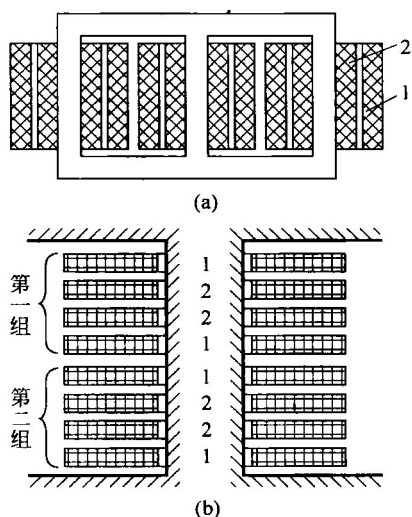


图 1-5 变压器绕组

(a) 同心式圆筒形绕组; (b) 交叠式绕组

1—高压绕组; 2—低压绕组