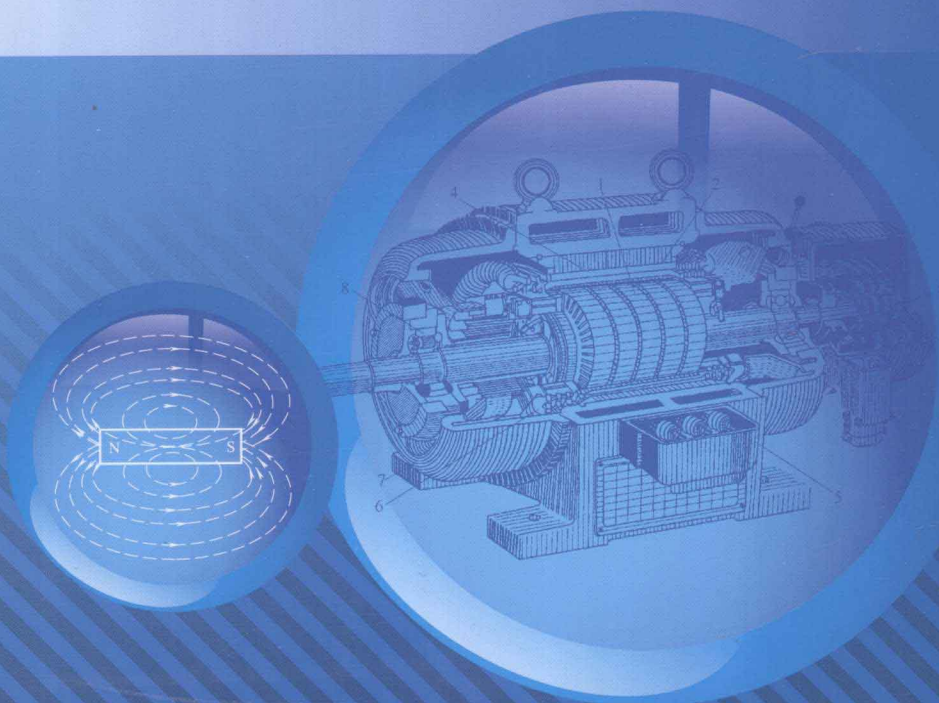


“十二五”普通高等教育电气信息类规划教材

电机学

◎ 孙克军 主编 ◎ 马 丽 朱维璐 副主编



化学工业出版社

“十二五”普通高等教育电气信息类规划教材

电 机 学

孙克军 主编

马 丽 朱维璐 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书强调基础性与实用性相结合的编写原则，以满足高等工科院校电气工程及其自动化专业及电气类相关专业的教学要求。

全书共7章，内容包括磁路、直流电机、变压器、交流绕组及其电动势和磁动势、异步电机、同步电机和特种电机等。书中主要介绍了直流电机、变压器、异步电机和同步电机稳态运行的基本理论和基本分析方法，还适当介绍了几种特种电机的工作原理、基本结构与用途，以扩大电机学的知识面。本书在编写时适当简化电磁理论的推导，强调理论知识的应用和实际运行问题的分析。主要章节均配有小结、适量例题、思考题与习题，以利复习和加强训练。

本书可作为普通高等学校电气工程及其自动化等电气类相关专业的教材，也可作为从事电工技术工作的有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/孙克军主编. —北京: 化学工业出版社, 2013. 7
“十二五”普通高等教育电气信息类规划教材
ISBN 978-7-122-17647-9

I. ①电… II. ①孙… 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 (2013) 第 129105 号

责任编辑: 郝英华

责任校对: 蒋 宇

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 19½ 字数 507 千字 2013 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

前言



本书是根据电气工程及其自动化专业教学大纲的要求编写的，主要内容包括直流电机、变压器、异步电机、同步电机和特种电机等。为使全书的基本内容突出，书中着重论述典型电机与变压器的基本结构、电磁过程、理论分析方法和运行特性。

由于电机学是电气工程及其自动化专业的技术基础课，也是一门承上启下的核心基础课，是从基础理论、技术理论走向专业课学习和工程应用研究的基础与纽带，课程的特点是理论性强、概念抽象、专业特征明显等。因此，本书力求以“内容新颖、覆盖面宽、讲解详尽、注重理论、兼顾研究”为编写原则，故本书的编写特色如下。

(1) 本书保留了传统电机学按直流电机、变压器、异步电机、同步电机四大类论述的体系。简化了传统电机学课程中关于电机与变压器的材料和工艺等方面的内容。注重基本概念、基本理论和基本分析方法的阐述，由浅入深、循序渐进，使学生建立牢固的物理概念，学会用工程观点分析问题和解决问题。

(2) 本书主要分析电机与变压器的稳态运行，重点介绍电机与变压器的工作特性和电动机的机械特性的描述和定量分析。为了拓宽知识面，以适应科研和生产的需要，本书还介绍了常用特种电机的基本结构、工作原理及应用。

(3) 本书各章节具有相对独立性，选学内容可由教师根据具体情况选定。为了便于学生复习和自学，主要章节中均有例题、章末附有小结、思考题与习题，并附有习题的参考答案，供教学参考。

(4) 本书可作为普通高等学校电气工程及其自动化等电气类相关专业的教材。由于在编写过程中考虑到了便于自学的需求，故本书也可作为从事电工技术工作的有关工程技术人员的参考用书。

本书配套的电子课件可免费提供给采用本书作为教材的老师，如有需要，可发邮件至 cipedu@163.com 索取。

本书由孙克军主编，马丽、朱维璐为副主编。第1章由李文娟编写，第2章由马丽编写，第3章由樊伟编写，第4章由朱维璐编写，第5章由孙克军编写，第6章由孙会琴编写，第7章由徐红编写。

由于编者的经验和学识水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2013年6月

目录

绪论	1
0.1 电机在国民经济中的作用	1
0.2 电机的定义与分类	1
0.2.1 电机的定义	1
0.2.2 电机的分类	2
0.3 电机学课程的性质和学习方法	3
0.3.1 电机学课程的性质	3
0.3.2 电机学课程的学习方法	3

第1章 磁路

1.1 磁路的基本知识	5
1.1.1 磁场	5
1.1.2 磁路常用物理量	6
1.2 常用的铁磁材料及其特性	8
1.2.1 铁磁材料的磁化曲线	8
1.2.2 铁磁材料的损耗	10
1.2.3 铁磁材料的分类	10
1.3 磁路的基本定律	11
1.3.1 全电流定律	11
1.3.2 磁路的欧姆定律	11
1.3.3 磁路的基尔霍夫第一定律	12
1.3.4 磁路的基尔霍夫第二定律	12
1.3.5 电磁感应定律	13
1.3.6 电磁力定律	15
1.4 磁路的计算	16
1.4.1 磁路计算的方法步骤	16
1.4.2 磁路计算实例	17
思考题与习题	18

第2章 直流电机

2.1 直流电机的工作原理和基本结构	20
2.1.1 直流电机的基本结构	20
2.1.2 直流发电机的工作原理	23
2.1.3 直流电动机的工作原理	24
2.1.4 直流电机的励磁方式	25
2.1.5 直流电机的特点和用途	26
2.1.6 直流电机的型号和额定值	27
2.2 直流电枢绕组	28
2.2.1 直流电枢绕组常用术语	28
2.2.2 直流电机电枢绕组的分类	30
2.2.3 单叠绕组的特点与实例	30
2.2.4 单波绕组的特点与实例	31
2.3 空载和负载时直流电机的磁场	33
2.3.1 空载时直流电机的磁场	33
2.3.2 负载时直流电机的磁场	34
2.3.3 交轴电枢反应	36
2.3.4 直轴电枢反应	37
2.4 电枢感应电动势和电磁转矩	38
2.4.1 电枢的感应电动势	38
2.4.2 直流电机的电磁转矩	39
2.5 直流发电机	40
2.5.1 直流发电机的基本方程式	40
2.5.2 直流发电机的效率特性	42
2.5.3 他励直流发电机的运行特性	43
2.5.4 并励直流发电机的自励	45
2.5.5 并励直流发电机的运行特性	46
2.5.6 复励直流发电机的外特性	46
2.6 直流电动机	47

2.6.1 电机的可逆原理	47	2.6.9 直流电动机的调速	59
2.6.2 直流电动机的基本方程式	48	2.6.10 直流电动机的制动	61
2.6.3 直流电动机的工作特性	50	2.7 直流电机的换向	64
2.6.4 并励直流电动机的机械特性	52	2.7.1 直流电机的换向过程	64
2.6.5 串励直流电动机的机械特性	54	2.7.2 产生火花的原因	65
2.6.6 复励直流电动机的机械特性	55	2.7.3 改善换向的措施	65
2.6.7 电力拖动系统运行的稳定性	56	小结	68
2.6.8 直流电动机的启动	57	思考题与习题	69

第3章 变压器

3.1 变压器概述	71	3.4.3 阻抗电压	95
3.1.1 变压器的用途	71	3.5 变压器的标么值	95
3.1.2 变压器的分类	71	3.5.1 基准值的选取与标么值的 计算	95
3.1.3 变压器的基本结构	72	3.5.2 采用标么值的优点	96
3.1.4 变压器的型号和额定值	77	3.6 变压器的运行特性	98
3.2 变压器的空载运行	79	3.6.1 变压器的外特性	98
3.2.1 空载运行时的物理现象	79	3.6.2 变压器的电压变化率	98
3.2.2 变压器中各物理量正方向的 规定	80	3.6.3 变压器的效率特性	100
3.2.3 变压器空载运行时各物理量 之间的关系	81	3.7 三相变压器	102
3.2.4 变压器空载运行时的电压平衡 方程式	82	3.7.1 三相变压器的磁路系统	102
3.2.5 变压器的空载电流和励磁 电流	82	3.7.2 三相变压器的电路系统	103
3.2.6 变压器空载运行时的等效电路 与相量图	84	3.7.3 三相变压器的联结方法和磁路 系统对电动势波形的影响	109
3.3 变压器的负载运行	84	3.8 变压器的并联运行	111
3.3.1 负载运行时的物理过程	85	3.8.1 变压器并联运行的优点	111
3.3.2 磁动势平衡方程式	86	3.8.2 变压器并联运行的条件	111
3.3.3 负载运行时的电压平衡 方程式	87	3.8.3 变比不等时变压器的并联 运行	112
3.3.4 绕组的折算	87	3.8.4 联结组别不同时变压器的并联 运行	113
3.3.5 绕组折算后变压器的等效电路	89	3.8.5 短路阻抗不等时变压器的并联 运行	113
3.3.6 绕组折算后变压器的 相量图	91	3.9 特殊变压器	115
3.4 变压器的参数测定	91	3.9.1 三绕组变压器	115
3.4.1 空载试验	92	3.9.2 自耦变压器	117
3.4.2 短路试验	93	3.9.3 仪用互感器	120
		小结	122
		思考题与习题	123

第4章 交流绕组及其电动势和磁动势

4.1 交流电机的基本工作原理	126	4.1.2 异步电机的基本工作原理	127
4.1.1 同步电机的基本工作原理	126	4.2 交流绕组的基本要求和分类	127

4.3 三相双层绕组	128	4.6.1 高次谐波电动势	142
4.3.1 槽电动势星形图	128	4.6.2 削弱谐波电动势的方法	143
4.3.2 三相双层叠绕组	129	4.7 通有正弦电流时单相绕组的	
4.3.3 三相双层波绕组	132	磁动势	145
4.4 三相单层绕组	134	4.7.1 整距线圈的磁动势	145
4.4.1 三相单层同心式绕组	134	4.7.2 整距分布绕组的磁动势	146
4.4.2 三相单层链式绕组	135	4.7.3 短距分布绕组的磁动势	147
4.4.3 三相单层交叉式绕组	136	4.7.4 单相绕组的基波磁动势和脉振	
4.5 正弦磁场下交流绕组的感应		磁动势	148
电动势	137	4.7.5 单相绕组的谐波磁动势	148
4.5.1 导体的感应电动势	137	4.8 通有对称三相电流时三相绕组的	
4.5.2 整距线圈的感应电动势	138	磁动势	149
4.5.3 短距线圈的感应电动势和短矩		4.8.1 三相绕组的基波合成磁	
系数	139	动势	149
4.5.4 分布绕组的感应电动势、分布		4.8.2 三相合成磁动势中的高次	
系数和绕组系数	139	谐波	152
4.5.5 相电动势和线电动势	141	小结	152
4.6 感应电动势中的高次谐波	142	思考题与习题	153

第5章 异步电机

5.1 异步电机的结构和运行状态	155	5.5.2 短路试验	182
5.1.1 异步电机的基本结构	155	5.6 异步电动机的转矩-转差率曲线	183
5.1.2 三相异步电机的工作原理	158	5.6.1 异步电动机电磁转矩的参数	
5.1.3 异步电机的运行状态	159	表达式	183
5.1.4 异步电动机的型号和额定值	161	5.6.2 异步电动机的转矩-转差率	
5.2 三相异步电动机的基本方程、等效		曲线	184
电路和相量图	163	5.6.3 异步电动机的机械特性	186
5.2.1 转子绕组开路时的异步		5.7 异步电动机的工作特性	188
电动机	163	5.7.1 工作特性的分析	189
5.2.2 转子堵转时的异步电动机	166	5.7.2 工作特性的求取	190
5.2.3 转子旋转时的异步电动机	170	5.8 三相异步电动机的启动	191
5.3 笼型转子的极数和相数	176	5.8.1 笼型三相异步电动机的直接	
5.3.1 笼型转子的极数	176	启动	191
5.3.2 笼型转子的相数和绕组		5.8.2 笼型三相异步电动机的降压	
因数	177	启动	192
5.4 异步电动机的功率方程和转矩		5.8.3 绕线转子三相异步电动机的	
方程	178	启动	195
5.4.1 异步电动机的功率方程	178	5.8.4 改善启动性能的笼型三相异步	
5.4.2 异步电动机的转矩方程	180	电动机	196
5.4.3 异步电动机的电磁转矩	180	5.9 三相异步电动机的调速	198
5.4.4 电磁转矩的物理表达式	181	5.9.1 异步电动机的变极调速	199
5.5 感应电动机参数的测定	181	5.9.2 异步电动机的变频调速	200
5.5.1 空载试验	181	5.9.3 异步电动机的调压调速	202
		5.9.4 绕线转子异步电动机的	

调速	203	5.11.4 单相异步电动机的型号	211
5.10 三相异步电动机的制动	205	5.11.5 单相异步电动机的机械特性	214
5.10.1 异步电动机的能耗制动	205	5.11.6 罩极式单相异步电动机的启动	215
5.10.2 异步电动机的反接制动	206	5.11.7 单相异步电动机的调速	216
5.10.3 异步电动机的回馈制动	208	5.12 异步发电机	217
5.11 单相异步电动机	209	5.12.1 与电网并联运行的三相异步发电机	217
5.11.1 单相异步电动机的基本结构	209	5.12.2 单独运行的异步发电机	218
5.11.2 单相异步电动机的工作原理	210	小结	219
5.11.3 单相异步电动机的分类与特点	211	思考题与习题	221

第6章 同步电机

6.1 同步电机的基本结构和运行状态	224	6.6 同步发电机的运行特性及参数的测定	247
6.1.1 概述	224	6.6.1 用空载特性、短路特性求取同步电抗的不饱和值和短路比	248
6.1.2 同步电机的分类	224	6.6.2 用转差法测定同步电抗	250
6.1.3 同步电机的工作原理	225	6.6.3 零功率因数负载特性及漏电抗的求取	251
6.1.4 隐极同步电机的基本结构	226	6.6.4 同步发电机的外特性	253
6.1.5 凸极同步电机的基本结构	228	6.6.5 同步电机的调整特性和效率特性	254
6.1.6 同步电机的运行状态	230	6.6.6 用电动势-磁动势图求取额定励磁电流和电压调整率	255
6.1.7 同步电机的励磁方式	231	6.7 同步发电机与电网的并联运行	256
6.1.8 同步电机的额定值	232	6.7.1 并联运行的条件和方法	257
6.2 空载和负载时同步发电机的磁场	233	6.7.2 与电网并联时同步发电机的功角特性	259
6.2.1 空载时同步发电机的磁场	233	6.7.3 有功功率的调节和静态稳定	262
6.2.2 同步发电机的电枢反应	234	6.7.4 无功功率的调节与V形曲线	266
6.3 隐极同步发电机的电压方程、相量图和等效电路	237	6.8 同步电动机与同步补偿机	268
6.3.1 不考虑饱和时的电压方程、相量图和等效电路	237	6.8.1 同步电动机的电压方程和相量图	268
6.3.2 考虑饱和时的电压方程和相量图	240	6.8.2 同步电动机的功角特性	269
6.4 凸极同步发电机的电压方程、相量图和等效电路	241	6.8.3 同步电动机的功率方程和转矩方程	270
6.4.1 双反应理论	241	6.8.4 同步电动机的工作特性	270
6.4.2 不考虑饱和时的电压方程、相量图和等效电路	242	6.8.5 同步电动机无功功率的调节和V形曲线	271
6.4.3 考虑饱和时的电压方程和相量图	245	6.8.6 同步电动机的启动	273
6.5 同步发电机的功率方程和转矩方程	246		
6.5.1 同步发电机的功率方程	246		
6.5.2 同步发电机的电磁功率	247		
6.5.3 同步发电机的转矩方程	247		

6.8.7 同步补偿机	275	6.9.3 各序等效电路	279
6.9 同步发电机的不对称运行	276	6.9.4 负序和零序阻抗的测定	280
6.9.1 对称分量法	277	6.9.5 不对称运行造成的影响	281
6.9.2 同步发电机的各相序电动势、 相序阻抗和等效电路	277	小结	281
		思考题与习题	283

第 7 章 特种电机

7.1 单相串励电动机	285	原理	291
7.1.1 单相串励电动机的用途与 特点	285	7.3 永磁电机	292
7.1.2 单相串励电动机的基本 结构	285	7.3.1 概述	292
7.1.3 单相串励电动机的工作 原理	286	7.3.2 永磁直流电动机	293
7.1.4 单相串励电动机的调速	287	7.3.3 永磁同步电动机	294
7.2 无刷直流电动机	288	7.3.4 永磁同步发电机	297
7.2.1 概述	288	7.4 交流力矩电动机	298
7.2.2 无刷直流电动机的分类	289	7.4.1 概述	298
7.2.3 无刷直流电动机的特点	289	7.4.2 交流力矩电动机的分类	298
7.2.4 无刷直流电动机的基本 结构	290	7.4.3 交流力矩电动机的结构 特点	298
7.2.5 无刷直流电动机的工作		7.4.4 交流力矩电动机的机械 特性	299
		7.4.5 力矩电动机的主要应用	299
		思考题与习题	301

参考文献

绪论

0.1 电机在国民经济中的作用

电能国民经济和国防建设中获得了广泛的应用，而电机是生产、传输、分配和应用电能的主要设备，它在电力系统中占有相当重要的地位。

在电力工业中，电机是发电厂的主要设备。如将水力、热力、风力、太阳能、核能等转换为电能，都需要使用发电机。为了经济地传输和分配电能，需要采用变压器升高电压，再把电能从发电厂输送到用电地区，然后再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。例如各种机床都采用电动机拖动，尤其是数控机床，都需由一台或多台不同功率和形式的电动机来拖动和控制；各种专用机械，如高炉运料装置、轧钢机、吊车、风机、水泵、搅拌机、纺织机、造纸机、印刷机和建筑机械等都大量采用电动机驱动。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化铁道的发展，需要大量具有优良启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。

在农业和农副产品加工中，随着农业机械化的进展，电动机的应用也日趋广泛，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。

在军事和各种自动控制系统中，如雷达、计算机技术和航天技术等，需要大量的控制电机作为自动控制系统和计算装置中的执行元件、检测元件和解算元件。

此外，在文教、医疗以及日常生活中，电机的应用也越来越广泛。

随着科学技术的飞速发展，各行各业都将对电机提出新的要求，不仅要求电机能适应各种不同的工作条件，而且还要在品种、质量和性能等方面满足特定的要求。因此，电机工业与国民经济各部门之间的关系是十分密切的，是国民经济各部门中不可缺少的一个重要环节。

0.2 电机的定义与分类

0.2.1 电机的定义

电机是一种进行机电能量转换或信号转换的电磁机械装置。其重要任务是进行能量

转换。

由于电机本身并不是能源，而只是转换能量的机构，必须一方面有能量输入，另一方面才会有能量输出。电机的容量即以该机在单位时间内所能传递的能量来度量。单位时间内所输入的能量称为输入功率，单位时间内输出的能量称为输出功率，功率的单位通常用 W 或 kW 来表示，当能量通过电机转换时，不可避免地要有一些内部损耗。例如，当电流流过导线时要引起定子绕组铜耗和转子绕组铜耗；当磁通在铁芯中变化时要引起磁滞损耗和涡流损耗；当有机械运动时会引起机械摩擦损耗，这些损耗均将化作热量而散发。因此，任一电机输出功率总比输入功率为小，设以 P_1 表示电机的输入功率， P_2 表示电机的输出功率，则其比值 $\eta = P_2 / P_1$ 就称为电机的效率。

0.2.2 电机的分类

电机的种类很多，分类方法也很多，常用的分类方法有以下几种。

(1) 按照能量转换方式来分类

① 将机械能转换为电能——发电机。

② 将电能转换为机械能——电动机。

③ 将电能转换为另一种形式的电能：

a. 具有不同的电压——变压器；

b. 具有不同的频率——变频器；

c. 具有不同的相位——移相器。

④ 不以功率传递为主要职能，而在自动调节系统中起控制作用——控制电机。

(2) 按照电流性质来分类

① 应用于直流电系统的电机——直流电机。

② 应用于交流电系统的电机——交流电机。在交流电机中两个主要的类型为同步电机和异步电机。

a. 同步电机——同步电机的速度等于同步速度（同步速度决定于该电机的极数和频率，同步速度的确切意义将在后文说明）。同步电机通常主要用作发电机运行。

b. 异步电机——异步电机又称为感应电机。作为电动机运行时，速度永远比同步速度小，作为发电机运行时，速度永远比同步速度大。异步电机通常主要用作电动机运行，也可以作为发电机使用，但工作性能较差。因此，异步发电机仅用于要求不高的农村小型发电设备中。

(3) 按照旋转速度分类

① 电机的转速 n 恒等于同步转速 n_s (n_s 为电机气隙中旋转磁场的转速， $n_s = \frac{60f}{p}$ ，即 n_s 与电流的频率 f 成正比； n_s 与电机的极对数 p 成反比)——同步电机。

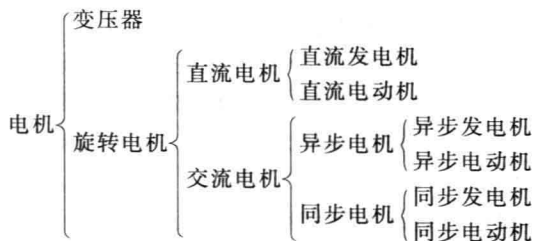
② 电机的转速 n 不等于同步转速 n_s (作为电动机运行时， $n < n_s$ ；作为发电机运行时， $n > n_s$)——异步电机。

③ 电机没有固定的同步转速——直流电机。

④ 电机的转速可以在宽广的范围内随意调节——交流换向器电机。

⑤ 静止电气设备——变压器。

上述各电机中，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。这种分类方法可以归纳如下。



注意：在电机学中，从工作原理的角度将变压器归入静止电机，但实际上变压器与电机在结构、工艺、生产、归口行业等方面都是不同的。因此，通常将变压器单独列出，与电机并列讲述。

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。即在任何电机中功率的转换是可逆的。如在电机的轴上外施机械功率，通过电机的磁场可把机械功率转换为电功率。反之，如在电机电路的端点送入电功率，通过电机的磁场可把电功率转换为机械功率。也就是说，任何电机既可以作为发电机运行，又可以作为电动机运行。这一性质称为电机的可逆原理。但在实用上有所偏重，例如，实用的交流发电机以同步电机为最多；实用的交流电动机以异步电机为最多。同一品种的电机，也将根据它在正常情况下用作发电机或者电动机，而在设计上和制造上提出不同的要求。

0.3 电机学课程的性质和学习方法

0.3.1 电机学课程的性质

电机学是电气工程及其自动化专业的一门重要的技术基础课。它与电工基础课的性质不同，电工基础所研究的问题总是理想化的和单纯的，而在电机学中要求运用理论来解决实际问题。但是在实际问题中，情况往往既是复杂的又是综合的。因此在分析时，就需要将问题简化，找出主要矛盾，运用理论加以解决。这样所得的结果有一定的近似性，但能够正确反映客观规律。所以，电机学是一门理论性和实践性都很强的课程。

0.3.2 电机学课程的学习方法

电机学主要研究的是电机稳态运行时的有关问题。电机学中既有理论问题又有实际问题、既有分析又有计算，而且电机的类型很多，电路的问题、磁路的问题、力学问题及热学问题等交织在一起，情况比较复杂，在学习中应抓住基本理论，既要了解每一种电机的特殊问题，又要注意它们的共性问题，找出它们的内在联系，掌握它们的普遍规律。

在学习这门课时，要从实际出发，牢牢掌握分析和研究电机的三种基本方法，即基本方程式、等效电路（又称等值电路）和相量图。不仅要了解公式中数量上的关系，更重要的是从公式中看到它们所表达的物理概念。

(1) 分析和研究电机的一般步骤

- ① 分析电机在空载和负载运行时电机内部的物理情况（即磁动势和电动势）。
- ② 列出电机的电动势、磁动势、功率和转矩平衡方程式。
- ③ 求解基本方程，进而分析电机的各种运行性能。对于发电机来说，外特性最为重要；对于电动机来说，机械特性最为重要。其次是电机的效率特性、功率因数特性、启动性能、调速性能和过载能力等。

(2) 分析和研究电机内部磁场和基本方程式的一般方法

① 不计磁路饱和时，常采用叠加原理分析电机的各个磁场和气隙合成磁场及与磁场对应的电动势；考虑饱和时，常把主磁通和漏磁通分开处理，主磁通用合成磁动势和主磁通的磁化曲线来确定，漏磁通则以等效漏抗压降方式处理，在列写电动势平衡方程式时考虑。

② 用等效电路来表示电机时，需要采用归算法（又称折算法），对于变压器需要进行绕组归算；对于交流电机需要进行绕组归算和频率归算。

③ 分析交流电机的稳态运行时，常利用等效电路和相量图。

④ 分析交流电机的不对称运行时，常采用双旋转磁场理论和对称分量法。

⑤ 研究凸极电机时，常采用双反应理论。

电机学还是一门实践性很强的课程，要求学习中一定要重视实验课，应熟练掌握各种电机的基本实验，努力提高实验操作技能，学会使用仪器测量电机性能和参数的方法。

第1章

磁路

1.1 磁路的基本知识

1.1.1 磁场

(1) 磁场和磁力线

人们通过长期的探索和研究,发现当两个互不接触的磁体靠近时,它们之间之所以会发生相斥或相吸,是因为在磁体周围存在着一个作用力的空间,这一作用力的空间称为磁场。

磁体周围的磁场可以用磁力线(又称磁感应线)来形象描述,如图1-1所示。磁力线的方向就是磁场的方向,可用小磁针在各点测知。用磁力线来描述磁场时,磁力线具有以下特点。

① 磁力线在磁体外部总是由N极指向S极,而在磁体内部则是由S极指向N极,磁力线出入磁体总是垂直的。

② 磁力线上任意一点的切线方向就是该点的磁场方向,即小磁针N极的指向。

③ 磁力线的疏密程度反映了磁场的强弱。磁力线越密,表示磁场越强;磁力线越疏,表示磁场越弱。

④ 因为磁铁的N极和S极总是成对出现,而且磁场中任何一点,小磁针只能受到一个磁场力的作用,所以磁力线是一些互不相交的闭合曲线。

⑤ 磁力线均匀分布而又相互平行的区域称为均匀磁场,如图1-2所示;反之则称为非均匀磁场。

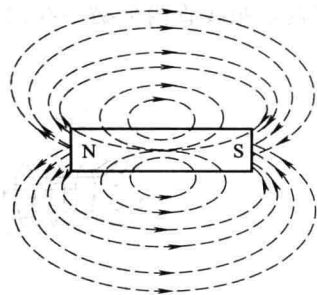


图1-1 条形磁铁磁力线

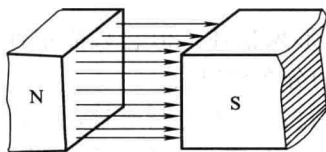


图1-2 均匀磁场

磁铁并不是磁场的唯一来源。把一根导线平行放在磁针的上方,给导线通电,磁针就发生偏转,当电流停止时,磁针又恢复原来位置。电流对磁针的这种作用说明了通电导线的周围存在着磁场,电与磁是有密切联系的。

(2) 通电直导线周围的磁场

用一根长直导体垂直穿过水平玻璃板或硬纸板。在板上

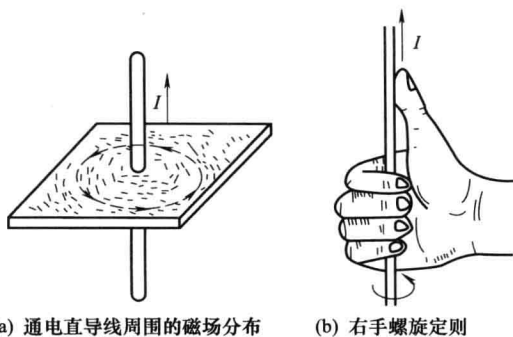


图 1-3 通电直导线产生的磁场

撒一些铁屑，使电流通过这个垂直导体，并用手指轻敲玻璃板，振动板上的铁屑，这时铁屑在电流磁场的作用下排成磁力线的形状，如图 1-3 (a) 所示。再将小磁针放在玻璃板上，可以确定磁力线的方向。如果改变电流的方向，则磁力线的方向也随之改变。

通电直导线产生的磁力线方向与电流方向之间的关系可用右手螺旋定则来说明，如图 1-3 (b) 所示。用右手握住通电直导线，并把拇指伸出，让拇指指向电流方向，则四指环绕的方向就是磁力线的方向。

(3) 通电螺线管的磁场

如果把导线制成螺线管，通电后磁力线的分布情况如图 1-4 (a) 所示。在螺线管内部的磁力线绝大部分是与管轴平行的，而在螺线管外面就逐渐变成散开的曲线。每一根磁力线都是穿过螺线管内部，再由外部绕回的闭合曲线。

将通电螺线管作为一个整体来看，管外的磁力线从一端发出，到另一端回进，其表现出来的磁性类似一个条形磁体，一端相当于 N 极，另一端相当于 S 极。如果改变电流的方向，它的 N 极、S 极也随之改变。

通电螺线管产生的磁力线方向与电流方向之间的关系也可用右手螺旋定则来说明，如图 1-4 (b) 所示。用右手握住螺线管，使弯曲的四指指着电流的方向，则伸直的拇指所指的方向就是螺线管内部磁力线的方向。也就是说，拇指所指的是螺线管的 N 极。

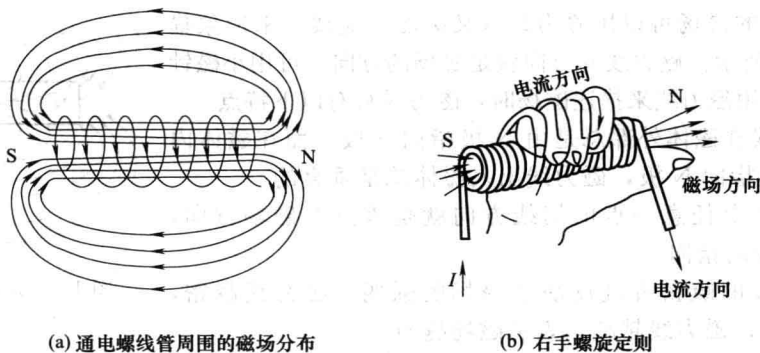


图 1-4 通电螺线管的磁场

1.1.2 磁路常用物理量

(1) 磁通

磁场在空间的分布情况可以用磁力线的多少和疏密程度来形象描述，但它只能定性分析。磁通这一物理量的引入可用来定量描述磁场在一定面积上的分布情况。

通过与磁场方向垂直的某一面积上的磁力线的总数称为通过该面积的磁通量，简称磁通，用字母 Φ 表示。磁通的单位名称是韦伯，简称韦，用符号 Wb 表示。当面积一定时，通过该面积的磁通越大，则磁场就越强。

(2) 磁感应强度

磁感应强度（又称磁通密度）是用来表示磁场中各点强弱和方向的物理量。磁感应强度用字母 B 表示。磁感应强度的单位名称是特斯拉，简称特，用符号 T 表示。

在均匀磁场中，磁感应强度可表示为

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

式中， B 为磁感应强度，T； Φ 为磁通量，Wb； A 为与磁感应强度方向垂直的某一截面积， m^2 。

式 (1-1) 表明磁感应强度 B 等于单位面积的磁通量，所以，有时磁感应强度也称为磁通密度。

磁感应强度是一个矢量，其方向为该磁场中的小磁针的 N 极所指的方向。

(3) 磁导率

磁场中各点磁感应强度 B 的大小不仅与电流的大小以及通电导体的形状有关，而且还与磁场中的媒介质的性质有关，这一点可以通过下面的实验来验证。

用一个插入铁棒的通电线圈去吸引铁钉，然后把通电线圈中的铁棒换成铜棒再去吸引铁钉，便会发现两种情况下的吸引力大小明显不同，前者比后者大得多。这表明不同的媒介质对磁场的影响是不同的，影响的程度与媒介质的导磁性质有关。

磁导率（又称导磁系数）就是一个用来表示媒介质导磁性能的物理量，不同的媒介质有不同的磁导率。

磁导率用希腊字母 μ 表示，其单位为亨/米，用符号 H/m 表示。

由实验测得，真空中的磁导率是一个常数，用 μ_0 表示， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。一般把任一媒介质的磁导率与真空中磁导率的比值称为相对磁导率 μ_r ，即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1-2)$$

式中， μ_r 为相对磁导率，它是一个无量纲的量； μ 为任一媒介质的磁导率，H/m； μ_0 为真空磁导率，H/m。

相对磁导率只是一个比值，它表示其他条件相同的情况下，媒介质中的磁导率相对真空磁导率的倍数。

根据物质相对磁导率 μ_r 的不同，可把物质分成三类。一类叫顺磁物质，其 μ_r 稍大于 1；另一类叫反磁物质，其 μ_r 稍小于 1。顺磁物质与反磁物质一般被称为非铁磁物质，如空气、铜、铝、木材、橡胶等。还有一类叫铁磁物质，如铁、钴、镍、硅钢、坡莫合金、铁氧体等，其相对磁导率 μ_r 远大于 1，可达几百甚至数万以上，且不是一个常数。铁磁物质可用来制作电机、变压器、电磁铁等的铁芯。

(4) 磁场强度

磁场中各点磁感应强度的大小与媒介质的性质有关，这就使磁场的计算显得比较复杂。因此，为了消除磁场中的媒介质对计算磁场强弱的影响，引入磁场强度这一物理量。磁场中任一点的磁场强度的大小只与产生磁场的电流大小和通电导体的几何形状有关，而与媒介质的性质无关。

磁场强度用字母 H 表示，它也是一个矢量，其方向和所在点的磁感应强度 B 的方向相同。磁场强度的单位为安/米，用符号 A/m 表示。

磁场强度的大小定义为磁场中某点的磁感应强度 B 与媒介质磁导率 μ 的比值，即

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-3)$$

式中, H 为磁场强度, A/m ; B 为磁感应强度, T ; μ 为磁导率, H/m 。

【例 1-1】在图 1-5 所示的均匀磁场中, 已知铁芯的横截面积 $A=30\text{cm}^2$, 磁感应强度 $B=0.6\text{T}$, 求通过铁芯截面中的磁通。

解

已知: $A=30\text{cm}^2=30\times 10^{-4}\text{m}^2$

通过铁芯中的磁通

$$\Phi=AB=30\times 10^{-4}\times 0.6=1.8\times 10^{-3}\text{ (Wb)}$$

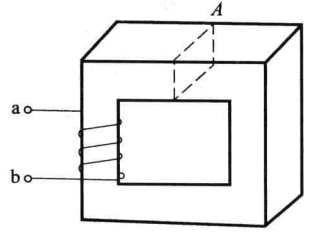


图 1-5 例 1-1 图

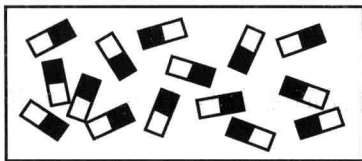
1.2 常用的铁磁材料及其特性

1.2.1 铁磁材料的磁化曲线

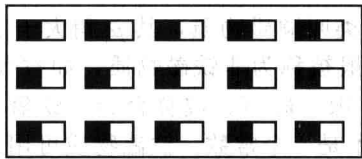
(1) 铁磁物质的磁化

使原来没有磁性的物质具有磁性的过程称为磁化。只有铁磁物质才能被磁化, 而非铁磁物质是不能被磁化的。

为什么铁磁物质能够被磁化呢? 这是因为在铁磁材料中存在着许多称为磁畴的磁性小区域, 每个磁畴由于分子内部的电子运动而呈现磁性, 就像一块小磁铁一样。在没有外磁场的作用时, 磁畴的排列是杂乱无序的, 取向任意, 它们的磁性相互抵消, 整个铁磁材料对外不呈磁性, 如图 1-6 (a) 所示。当外磁场作用时, 原来与外磁场方向不一致的磁畴, 就会顺着外磁场方向转向, 使磁畴取向与外磁场趋于一致, 如图 1-6 (b) 所示。这样就产生一个很强的与外磁场同向的附加磁场, 叠加在外磁场上, 使合成磁场大为增强。有些铁磁材料在去掉外磁场以后, 磁畴的一部分或大部分仍然保持取向一致, 对外仍显示磁性, 这就成了永久磁铁。



(a) 未磁化



(b) 磁化

图 1-6 磁畴

各种铁磁材料, 由于其内部结构不同, 磁化后的磁性各有差异, 下面通过分析磁化曲线来了解各种铁磁材料的特性。

(2) 起始磁化曲线

铁磁材料的磁感应强度 (即磁通密度) B 随磁场强度 H 而变化的曲线称为磁化曲线 $B=f(H)$, 又称 $B-H$ 曲线。

在非铁磁材料中, 磁感应强度 B 与磁场强度成正比 ($B=\mu_0 H$), 它们之间呈线性关系, 直线的斜率就等于 μ_0 。

铁磁材料的 B 与 H 之间的关系则不是线性的, 即 $B=f(H)$ 为一曲线。将一块尚未磁化的铁磁材料进行磁化, 当磁场强度 H 由零逐渐增大时, 磁感应强度 B 将随之增大, 曲线 $B=f(H)$ 就称为铁磁材料的起始磁化曲线, 如图 1-7 所示。

起始磁化曲线基本上可分为四段。

① Oa 段, 开始磁化时, 外磁场较弱, 由于磁畴的惯性, 随着 H 的增加, B 缓慢增加, 因而曲线较平缓, 但这一段很短, 称为起始磁化段。

② ab 段, 随着外磁场的增强, 材料内部大量磁畴开始转向, 越来越多地趋向于外磁场方向, 此时 B 值增加得很快, 曲线较陡, 几乎是直线上升, 为线性段。