

高等学校教材

电机学

(修订版)

南京工学院 周 鹗 徐德淦 濮开贵

水利电力出版社

内 容 提 要

本书重点在于阐明电机的基本结构、基本工作原理和运行分析以及基本测试原理。全书共分五篇，包括：电力变压器；交流电机的共同理论；异步电机；同步电机；直流电机。针对重点内容附有例题、思考题和习题。

本书是高等院校电力类专业、电气技术专业通用教材，也可供有关技术人员参考。

高等学校教材

电机学

(修订版)

南京工学院 周鹗 徐德淦 濮开贵

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 30印张 678千字

1988年6月第一版 1988年6月北京第一次印刷

印数00001—14110册 定价4.35元

ISBN 7-120-00305-4/TM·74

前 言

1983年电机教材编审委员会讨论决定，由南京工学院对原吴大榕教授所编电力类专业高等学校教材《电机学》进行修订，作为第二轮高等学校电力类专业通用教材。

我们按照1983年电机教材编审委员会讨论通过的《电机学修订大纲》进行了修订。修订的要点是：

(1) 鉴于教育改革的需要，电机学课程的学时需要减少，本教材的篇幅相应地进行了压缩；

(2) 为了与后续课程的良好衔接，讲授次序由原来的直流电机，变压器，异步电机，同步电机改变为变压器，异步电机，同步电机，直流电机，为此，教材的编排作了相应的更动；

(3) 适当加强变压器和同步电机的内容。

本书的修订工作由周鹗教授负责主持，徐德淦副教授修订直流电机和同步电机篇，濮开贵副教授修订变压器、交流电机的共同理论和异步电机篇。

本书承福州大学卓忠疆教授主审，并提出了宝贵的意见；南京工学院电机教研室对修订工作给予了多方面的支持。在此，一并致以深切的谢意。

编 者

1987年2月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1-1 电机在国民经济建设中所起的作用	1
1-2 电机发展简史及发展趋势	2
1-3 电机的主要类别	4
1-4 电机的基本作用原理	5
1-5 电机的制造材料	9
思考题	11
习题	11

第一篇 变 压 器

第二章 变压器的类别和结构	14
2-1 变压器的主要类别	14
2-2 电力变压器的基本结构	15
2-3 变压器的额定值	19
2-4 变压器的发热和冷却	19
2-5 国产变压器简介	22
思考题	23
习题	24
第三章 变压器电路理论及其运行特性	25
3-1 变压器空载运行	25
3-2 变压器负载运行	32
3-3 标么值	37
3-4 参数测定方法	37
3-5 电压变化率	42
3-6 变压器的效率	44
思考题	47
习题	47
第四章 三相变压器的磁路和连接组	52
4-1 三相变压器的磁路系统	52
4-2 三相变压器的绕组接法	53
4-3 连接组别及标准连接组	54
4-4 三相变压器绕组连接法及其磁路系统对电势波形的影响	57
思考题	59

习题·····	59
第五章 变压器的并联运行·····	61
5-1 变压器并联运行的意义及应具备的条件·····	61
5-2 变压器并联运行负载分配的实用计算公式·····	62
思考题·····	64
习题·····	64
第六章 三相变压器不对称运行·····	66
6-1 基本概念·····	66
6-2 对称分量法·····	66
6-3 三相变压器的正序阻抗、负序阻抗和零序阻抗及其等效电路·····	70
6-4 三相变压器 Y/Y_0 连接单相运行·····	74
思考题·····	77
习题·····	77
第七章 变压器的瞬变过程·····	79
7-1 变压器的瞬变情况·····	79
7-2 副方突然短路时的瞬变过程·····	79
7-3 空载合闸时的瞬变过程·····	83
思考题·····	86
第八章 电力系统中的特种变压器·····	87
8-1 三绕组变压器·····	87
8-2 自耦变压器·····	95
8-3 分裂变压器·····	99
8-4 电压互感器和电流互感器·····	103
思考题·····	105
习题·····	105

第二篇 交流电机的共同理论

第九章 交流电机的绕组及其电势·····	108
9-1 交流绕组的基本概念·····	108
9-2 三相双层绕组·····	111
9-3 三相单层绕组·····	114
9-4 正弦磁场下绕组的感应电势·····	118
9-5 非正弦磁场下绕组的感应电势·····	124
9-6 谐波电势的消除和减小·····	126
思考题·····	127
习题·····	127
第十章 交流绕组的磁势·····	128
10-1 单相绕组的磁势·····	128

10-2 脉动磁势分解成两个旋转磁势	133
10-3 对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势	135
10-4 不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势	137
10-5 磁势的谐波分量	139
思考题	142
习题	142
第十一章 电机的定额、发热和冷却	144
11-1 电机的额定容量	144
11-2 电机的发热和测定温度的方法	145
11-3 电机各部分的温升极限	146
11-4 均质固体的发热理论	147
11-5 电机的散热	149
11-6 电机的冷却方式	150
思考题	151

第三篇 异步电机

第十二章 异步电机的构造及其基本作用原理	152
12-1 异步电动机的用途及其特点	152
12-2 异步电动机的构造	152
12-3 异步电机的基本作用原理	157
12-4 异步电动机的铭牌和额定值	158
12-5 国产异步电动机简介	158
思考题	159
习题	159
第十三章 三相异步电机运行分析及其工作特性	160
13-1 主磁通和漏磁通	160
13-2 转子不动时的异步电机	161
13-3 转子转动后的异步电动机	164
13-4 异步电动机等效电路及其简化	168
13-5 异步电动机的功率平衡式和转矩平衡式	170
13-6 电磁转矩及机械特性	173
13-7 最大转矩	175
13-8 稳态运行范围和过载能力	176
13-9 电磁转矩简化计算公式	177
13-10 高次谐波磁场所产生的谐波转矩及其对起动的影	179
13-11 异步电动机的工作特性	184
思考题	185
习题	186

第十四章 异步电动机的起动、调速和制动	189
14-1 起动电流和起动转矩	189
14-2 鼠笼式电动机的直接起动和降压起动	190
14-3 绕线式异步电动机的起动	194
14-4 深槽式异步电动机	196
14-5 双鼠笼式异步电动机	197
14-6 异步电动机调速方法综述	199
14-7 变频调速	200
14-8 变极调速	200
14-9 改变外施电压调速	202
14-10 在转子回路中接入变阻器调速	203
14-11 异步电动机制动的概念	204
思考题	206
习题	206
第十五章 异步电机的特殊运行方式及特种异步电机	208
15-1 异步发电机	208
15-2 三相异步电机在不对称电压下运行	210
15-3 单相异步电动机	212
15-4 两相伺服电动机	217
15-5 交流测速发电机	220
15-6 自整角机	221
思考题	222
习题	223

第四篇 同 步 电 机

第十六章 同步电机的型式和构造	225
16-1 同步电机的基本构造型式	225
16-2 汽轮发电机的构造特点	228
16-3 水轮发电机的构造特点	231
16-4 分数槽绕组	232
16-5 同步电机的发展和国产同步电机简介	238
思考题	239
习题	240
第十七章 同步电机的基本作用原理和电枢反应	242
17-1 同步电机的基本作用原理	242
17-2 同步电机的空载磁势	243
17-3 对称三相负载时同步电机的电枢反应	247

17-4 隐极同步电机的电枢反应磁通、电枢反应电抗和同步电抗	252
17-5 凸极同步电机的电枢反应——双反应理论	254
17-6 凸极同步电机的电枢反应磁通、直轴同步电抗和交轴同步电抗	255
17-7 电枢反应的折算	260
17-8 电枢绕组的漏抗	262
思考题	263
习题	263
第十八章 同步发电机对称运行时的特性	266
18-1 同步发电机的基本特性	266
18-2 同步发电机的空载特性	266
18-3 对称负载时同步发电机的相量图	268
18-4 同步发电机的短路特性	271
18-5 负载特性曲线	271
18-6 同步电抗的实验测定	273
18-7 短路比	275
18-8 漏抗的测定和保梯电抗	276
18-9 同步发电机的外特性和调节特性	278
18-10 求取电压变化率及额定励磁电流	280
思考题	284
习题	284
第十九章 同步发电机在大容量电网上的运行、同步电动机	287
19-1 同步发电机的并联运行	287
19-2 同步发电机的整步	287
19-3 隐极式同步电机的功角特性	289
19-4 凸极式同步电机的功角特性	293
19-5 有功功率调节、静态稳定和动态稳定的概念	296
19-6 无功功率的调节和U形曲线	299
19-7 同步电动机的基本特性	303
19-8 同步电动机的起动	308
19-9 同步补偿机	311
19-10 同步电机各种运行情况小结	312
思考题	313
习题	313
第二十章 同步发电机的不对称运行	317
20-1 同步发电机的不对称运行	317
20-2 同步电机的各序阻抗与等效电路	318
20-3 同步发电机的单相稳定短路	322
20-4 同步发电机的两相稳定短路	323

20-5 同步发电机的两相对中点稳定短路	325
20-6 同步发电机单相稳定短路时的电枢反应	328
20-7 不对称运行的影响	329
思考题	330
习题	330
第二十一章 同步电机的突然短路	331
21-1 磁链守恒原理和突然短路的物理概念	331
21-2 同步电机的瞬态电抗和超瞬态电抗	335
21-3 三相突然短路电流	339
21-4 时间常数	341
21-5 不对称突然短路的概念	345
思考题	346
习题	347
第二十二章 同步电机的振荡	349
22-1 振荡的物理概念	349
22-2 转矩平衡方程式	350
22-3 同步电机的自由振荡	353
22-4 同步电机的强制振荡	355
思考题	357
习题	358
第二十三章 同步电机的损耗和效率、发热和冷却以及励磁方式	359
23-1 同步发电机的损耗和效率	359
23-2 同步发电机的发热和冷却	360
23-3 同步发电机的励磁方式	365
23-4 励磁系统中的中频发电机	371
思考题	373

第五篇 直流电机

第二十四章 直流电机的作用原理和构造	374
24-1 直流电机的工作原理	374
24-2 直流电机的基本结构	375
24-3 电枢绕组概论	379
24-4 叠绕组	383
24-5 波绕组	386
24-6 电枢绕组的感应电势和电磁转矩	391
思考题	394
习题	395
第二十五章 空载磁场和电枢反应	398

25-1 空载时直流电机的磁场	398
25-2 主磁路计算的基本原理	399
25-3 电枢电流产生的磁势	409
25-4 有负载时空气隙中的磁势和磁场	412
25-5 交轴电枢反应和直轴电枢反应	415
25-6 电枢反应对电机运行的影响	417
思考题	419
习题	420
第二十六章 直流发电机	422
26-1 直流电机按励磁方式的分类	422
26-2 自励发电机的电压建起过程	423
26-3 直流发电机的电压、功率和转矩平衡方程式	425
26-4 他励发电机的特性	428
26-5 并励发电机的特性	429
26-6 串励发电机的特性	431
26-7 复励发电机的特性	432
思考题	435
习题	435
第二十七章 直流电动机	438
27-1 直流电动机的电压、功率和转矩平衡方程式	438
27-2 机械特性及稳定运行条件	439
27-3 直流电动机的工作特性	441
27-4 直流电动机的起动	447
27-5 直流电动机的调速	451
27-6 直流电动机制动的概念	453
27-7 各种直流电动机的应用范围	454
思考题	454
习题	455
第二十八章 直流电机的换向	458
28-1 换向的基本概念	458
28-2 换向电路分析	459
28-3 换向时刷面下火花分析	464
28-4 改善换向的方法	465
思考题	468
习题	468

第一章 绪 论

1-1 电机在国民经济建设中所起的作用

电能是能量的一种形式。电的现象很早就已发现，但是，电能工业及人类生活中的广泛应用，还是从十九世纪初，奥斯特、法拉第先后发现了电磁感应现象，提出了著名的电磁感应定律开始的。人们为了生产和利用电能，积极致力于电机和电力工业的研究开发，由不知到知，由初级到高级，在十九世纪末期，已初具规模。与各种形式的能量相比，电能具有明显的优越性，它适宜于大量生产、集中管理、远距离传输和自动控制。各种电机的类型和性能很不相同，但是它们都是一种能量转换装置。例如把煤炭、天然气、水力、风力等自然界中储能释放出来，转换成机械能，再用电机就可以把机械能转换为电能；反之，在有电源供电情况下，电机也能将电能转换为机械能。一百多年来，电机和电力工业的发展历史说明，电机工业在国民经济建设中具有重大意义，它在电力工业、各类工矿企业、农业、国防、交通运输、日常生活各个方面都占有重要地位。

电力工业的发展是以电机制造工业的发展为基础的。例如在热力发电厂中，锅炉使燃料中的能量释放出来，对水加热，产生高压高温蒸气；蒸气进入汽轮机，使热能变为机械能，带动发电机转子旋转，而发电机则把机械能转换为电能。显然，没有发电机，就没有电能的大规模生产，它是电力系统中最关键的电气设备。此外，发电厂一般多位于燃料或水力资源开发区域，地处偏僻，这样，就需要把大量电能远距离地输送出去，这时需要用变压器将电压升高，以利经济运行，为了安全用电，在用电区域又要用变压器将电压降低。电力系统及电网需要变压器的总容量，达发电设备总容量的7~8倍。

在工矿企业和农业生产中需要大量的电动机。机械工业中各种工作母机都须由一台或多台不同容量的电动机来拖动和控制，磨床用电机的转速可达每分钟数万转，甚至更高，有些机床需用多速可控电动机；冶金工业中高炉、转炉和平炉都需用多台电动机来驱动，大型轧钢机要用5000kW或更大功率的直流电机；化学工业要用几百kW的异步机或同步机拖动压缩机。对特定用途电机的性能与对一般用途电机的要求不同。例如：石油、煤矿中的电机要防爆、防腐蚀；轻纺工业中用的电机要防尘、防潮；化工中的电机要防碱，酸及各类气体的腐蚀等。显然，各种不同的工作机械要求有不同容量、不同电压、不同起动性能和不同调速性能的电机。各类企业中的车间供电、运输传送、吊车起动、抽水鼓风、粉碎搅拌；交通运输中的城市电车、铁道列车牵引；农业中的电力排灌、农产品加工等无一不需要电机来驱动。随着工业企业电气化、自动化、电脑化的发展，还需要众多的各种容量的精密控制电机，作为整个自动控制系统工作中的重要元件。

1-2 电机发展简史及发展趋势

电机的发展可以分为二个时期，第一个时期是从发现电磁感应现象开始，直到十九世纪末和本世纪初，当各种电机和变压器的基本型式已经具备时为止。第二个时期是从本世纪初直到现在。前者可称为电机初期发展时期，后者可称为近代发展时期。前期又可分为四个阶段，即：①电磁感应定律的发现；②直流电机的发展；③单相交流电的应用；④三相交流电的应用。

一、电磁感应定律的发现

十八世纪中叶开始了第一次世界工业革命，这之前由于地理上的大发现，世界市场日益增大，以手工业为基础的工场工业已远远不能满足市场的需要，为了利润及扩大生产，必须进行技术革命。这次变革是在当时生产最发达的英国首先发生的，从棉纺织业开始，影响各个行业，波及各国。主要是以机器大生产代替工场手工业，把社会推进到机器时代，而它的主要标志是蒸气机的广泛使用。

随着生产力的发展，由于蒸气动力在输送和管理上的不便，它已不能满足进一步发展的需要，迫使人们寻找新的能源和动力。在这一时代背景下，电磁学得到了兴起和发展。人们已长期积累了有关电磁现象的丰富知识，在此基础上，1821年，法拉第表演了电流位于磁场中产生机械力的实验，发现了电动机作用原理，不久就制成了原始型式的电动机。之后，1831年法拉第提出了电磁感应定律，出现了各种各样原始型式的发电机。人们掌握了电能和机械能可以互相转换的规律，使得在生产中大规模地使用电能有了可能。

二、直流电机的发展

电能工业上最早的应用是供给照明和电化学工业的需要，所以，最初发展的电机是直流发电机。在十九世纪四十年代到七十年代期间，直流发电机发展很快，在励磁方面，1845年就用电磁铁代替永久磁铁，而在1867年就制成了自励发电机。在电枢结构方面，1870年就制成了环形电枢，到1873年发展为鼓形电枢，至此，直流电枢的结构已具备了现代直流电机的基本型式。

直流电动机最初由电池供电，后来改为直流发电机供电，由于电源问题，它的发展受到限制。在1882年建成了第一条直流输电线路，虽然系统的容量、电压等级和输送距离都很有限，但是它指明了广泛应用电能的宏伟远景。

三、单相交流电的应用

为了把较大的电功率输送至较远的距离，在十九世纪七十年代人们就尝试用交流电传输电能，1876年，交流电已被应用于照明装置。不久有原始型式的同步发电机及变压器相继出现，都为单相交流系统的发展奠定了基础。当时，变压器的磁路是开启式的，直到1884年，闭合磁路的变压器制成，并得到推广使用，使单相交流电的应用得到了迅速发展。

四、三相交流电的应用

在单相交流电源供电情况下，单相交流电动机无法自行起动，必须用其它方法起动，

然后才能自行产生转矩，继续运转。不久，两相电流能产生旋转磁场的原理被发现，1885年制成了二相交流异步电机的模型，后来也得到了一定的应用。但是直到1889~1897年，经一系列的研究与实验，终于制成了三相电动机和三相变压器，建成了第一个三相交流输电系统。它的优越性立即被公认，很快取代了两相制，由此奠定了交流三相制在工业上被广泛应用的基础。接着，交流三相制发电厂迅速发展起来，高速运转的汽轮发电机也就代替了以蒸气机为原动机的发电机。十九世纪后半叶，由电磁学的发展所引起的一连串重大的科学技术成就，把社会生产力推进到电力时代，在社会进步史上称之为第二次技术革命。

交流输电系统的建成是电力工业、电机工业发展的一个重要阶段。进入二十世纪以后，在电气化基础上大型工业企业不断集中，并且发展迅速，要求传输的功率不断加大，距离延伸，电气设备在不断经历着巨大的变革。

电机的近代发展及今后发展的主要趋势有以下几个方面。

一、单机容量不断提高

随着科学技术水平不断提高，电力工业不断发展，发电机和变压器的单相容量不断增大，这是电机制造工业中的重要趋势。一台发电机的重量、所需材料、损耗和造价等与电机本身的容量并不是成正比例的。机组容量大时，单位容量的用料省、损耗小、造价低。同时，单机容量大，电站机组数就少，工作人员也少，厂房面积也可缩小，又可节约基建投资及维护费用。

二十世纪来，发电机单机容量不断提高的情况可以用汽轮发电机为例加以说明。在1900年，不超过5000kVA；到1920年，转速3000r/min电机的容量达25000kVA，转速1000r/min的达6000kVA。1937年应用空气冷却的电机达100000kW。氢气冷却在1928年初次用于同步补偿机，在1937年推广到汽轮发电机。应用氢冷后，转速3000r/min的电机容量上升到150000kW。之后，冷却技术继续发展，采用了导体内部用气体或液体冷却的措施，单机容量可以大为提高。1956年制成了定子导体水内冷、转子导体氢内冷的208000kW汽轮发电机，1960年容量上升到320000kW。目前，世界上汽轮发电机的单机容量已突破1000000kW。定子和转子都采用水内冷的技术首先在我国取得了重大成果，以后，不少其它国家也研制过。

水轮发电机和电力变压器的发展也有类似情况。

单机容量的提高与冷却技术的发展，绝缘、硅钢片、转子钢材等有效材料和结构材料性能的改进，设计和工艺水平的提高等都有密切关系。今天，超导技术在发展，这对单机容量限制的突破会起重要作用。

二、中小型电机技术和经济指标不断改进

当前，已广泛应用计算机对电机进行设计和分析。计算机辅助设计可以大大缩短计算时间，在大量计算基础上便于选取最佳设计方案。计算机计算时，可以建立足够精确的电机运行数学模型，使计算结果与电机实际性能很接近，这可以减少样机试制工作量，加速新产品开发。除设计技术进一步完善外，新工艺不断出现，生产过程自动化受到很大重视，新型磁性、绝缘等材料的研制，都可以促进电机性能指标和产品经济效益的提高。

我国在中小型电机生产方面，在60年代初期，已从过去的仿制转入自行设计和进一步发展阶段，建立了研究机构，形成了比较完整的工业体系。我国生产的J₂、JO₂系列小型异步电动机与J、JO老系列相比较，体积平均缩小25.6%，重量平均减轻20%。最近几年统一设计的Y系列异步电机，技术指标得到了进一步的提高。

三、应用范围不断扩大

为适应各种不同工作要求，电机的系列和品种也愈来愈多。除一般用途电机外，还有特定用途电机，如潜水电机、防爆电机、船舶电机、纺织用电机、矿用电机、林业用电机等。它们常在某些特定的环境条件下运行，例如易燃易爆、有腐蚀性气体和粉尘、辐射、虫蛀等，或者电源为非标准的，电机负载呈周期性变化等。还有特殊用途电机，如高速电机、计时电机、陀螺电机等，以及在控制系统中用作检测或伺服元件的各种微型控制电机等。后者的工作特性较为特殊，一般对它们的性能精度和动态特性等要求较高，在体积和重量方面也有严格限制。此外，一些新型结构电机，如印制绕组电机、无刷电机、各类永磁电机等也都在迅速发展。世界上对小型驱动电机需要量很大，各工业发达国家每年生产量达数千万台，甚至上亿台。这一方面显示了社会生产发展的需要，另一方面也说明日常生活所用微型电机的数量猛增。

60年代以来，由于电力电子学的迅速发展，大电流耐高压晶闸管的出现，促使许多大容量同步电机的励磁改用晶闸管励磁系统。这类装置体积小、重量轻、效率高，发电系统的性能和可靠性也得到提高。当前，国内外都有高压直流输电线路在运行，在直流和交流系统连网处的换流站，需要用整流逆变装置。此外，利用晶闸管可做成可控大容量直流电源或可控变频装置，在电动机调速和控制系统中应用，有利于电机的平滑、宽范围、高效率的调速运行。采用电子线路控制后，交流异步机的调速性能可得到很大改进。电力电子技术的发展，为电机运行、电力驱动开辟了新的途径。

显然，电机学科历史悠久，有系统的理论和丰富的工程实践。长期以来，它在国民经济建设中起着重大的作用，随着生产的发展和科学技术水平的提高，它本身的内容也在不断地深化和更新。

1-3 电机的主要类别

电机本身是转换能量的装置，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每单位时间里所能传递的能量来量度。每单位时间内所输入的能量称为输入功率，每单位时间输出的能量称为输出功率，功率的单位通常用W、kW或MW来表示。当功率通过电机时，不可避免地要有一些内部损耗。因此，任一电机的输出功率总比输入功率小。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。

电机的基本作用原理在于电磁感应，所以在任何电机中都必须有一闭合的磁路和两个或两个以上的电路相交链。电机中的功率传递，就是通过有关电路中磁链的变化来完成的。

和机械功率有关的电机都必须有机械运动，通常是旋转运动。发电机把机械功率转变

为电功率，电动机把电功率转变为机械功率，它们统称为旋转电机。旋转电机都有一静止部分，叫做定子；又有一旋转部分，叫做转子。既然有相对运动，定子和转子之间必须有一空气隙。在空气隙中的磁场分布和变化规律与电机中的功率转换和传递有着密切关系。为了解各种电机的运行特征，对于空气隙中的磁场在空间如何分布，随时间如何变化，以及随负载如何改变等，都必须充分了解。关于各种电机空气隙磁场的变化情况，在讨论到各种电机时再详细说明。

按照电机在应用中的职能来分，电机可以分为下列各类：

- (1) 将机械功率转换为电功率——**发电机**；
- (2) 将电功率转换为机械功率——**电动机**；
- (3) 将电功率转换为另一种形式的电功率，又可分为：①输出和输入有不同的电压——**变压器**；②输出与输入有不同的波形，如将交流变为直流——**变流机**；③输出与输入有不同的频率——**变频机**；④输出与输入有不同的相位——**移相器**；
- (4) 不以功率传递为主要职能，而在电气机械系统中起调节、放大和控制作用的各种**微型控制电机**。

按照所应用的电流种类，电机可以统分为**直流电机**和**交流电机**。

电机还可按同步速度来分，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。电机按速度分类如下：

- (1) 没有固定的同步速度——**直流电机**；
- (2) 静止设备——**变压器**；
- (3) 作为电动机运行时，速度永远较同步速度为小，作为发电机运行时，速度永远较同步速度为大——**异步电机**；
- (4) 速度等于同步速度——**同步电机**；
- (5) 速度可以在宽广范围内随意调节，可以从同步速度以下调至同步速度以上——**交流换向器电机**。

各种控制电机可分别归入以上各类中。

从理论体系来看，后一种分类方法较为合理，因为依据电机可逆性原理，发电机和电动机并不能作为不同类别，而只是同一电机的两种不同运行方式。

1-4 电机的基本作用原理

各种电机的运行原理均以电磁基本定律为出发点的，也就是依据下列两种自然规律：

- (1) 设有电流在任一导体中流通，则在该导体周围将有磁场产生；
- (2) 设在任一线圈中所交链的磁通发生变化，则在该线圈中便有感应电势产生。

以上两定律再加上众所周知的能量守恒定律，便是电机学的全部理论基础。现分别阐述如下：

一、全电流定律

环绕载流导体取任一磁通的闭合回路，设 H 表示沿着该回路上各点切线方向上的磁场

强度, 按照全电流定律, 则有如下关系

$$\oint Hdl = NI \quad (1-1)$$

式中 N ——磁通回路包围的导体总数;

I ——每一导体中的电流;

NI ——该回路所包围的总电流量, 也叫总磁动势, 简称磁势。

式(1-1)可解释为: 在环绕着载流导体的任一磁通闭合回路中, 磁场强度 H 沿着该回路的线积分, 等于该积分回路所包围电流的总和。

在实际的电机中, 磁路是对称的, 在利用全电流定律作磁路计算时, 通常可把磁回路分为若干段磁路, 而把每一段磁路的磁场强度 H 取作常数。于是积分式 $\oint Hdl$ 便可以用代数式 $\sum Hl$ 来代替, 式(1-1)便简化为

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \cdots + H_n l_n = NI \quad (1-2)$$

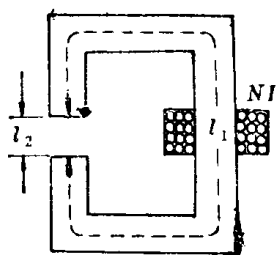


图 1-1 可分段的磁回路

例如图 1-1 所示的磁路, 在作磁路计算时, 可把磁路分为二段, 一段是均匀截面的铁心, 其磁场强度为 H_1 , 长度为 l_1 ; 另一段是空气隙, 其长度为 l_2 , 磁场强度为 H_2 , 该磁路的总磁势便为 $H_1 l_1 + H_2 l_2$ 。如磁路由若干段不同截面积, 或采用不同材料的若干部分所组成, 则由于各段磁路中的磁场强度 H 不相等, 应分别计算出各段磁路的磁场强度 H 及各段磁路的长度 l , 再分别计算各段磁路的磁势, 然后将它们相加而得到该磁路总的磁势。

各段磁路的磁场强度, 原则上可按下列公式计算

$$B = \Phi / S \quad (1-3)$$

$$H = B / \mu \quad (1-4)$$

式中 Φ ——流过某部分的磁通量;

S ——该部分的截面积;

μ ——该部分材料的导磁系数。

对于空气来讲, 其导磁系数 $\mu = \mu_0$, 它是一常数, 不受 B 值的影响。当 B 的单位取 T (特斯拉), H 的单位取 A/m 时

$$\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} H/m \quad (1-5)$$

对于磁性材料来讲, 导磁系数 μ 不是常数, 其值随磁通密度 B 的大小而变化。工程计算一般不按式(1-4)求 H , 而是从所用材料的磁化曲线 (即 $B-H$ 曲线) 求出对应于某一 B 值时的 H 值。磁化曲线有时用 $B-H$ 数据表的形式给出。

二、电磁感应定律

设有一线圈位于磁场中, 则将有磁力线穿过该线圈而和它键链。如该线圈的不同部分所键链的磁通量不同, 则该线圈的总共磁链数为

$$\psi = \sum w_x \phi_x \quad (1-6)$$

式中 w_x ——线圈某一部分的匝数;

ϕ_x ——与 w_x 交链的磁通量。

设在该线圈中的磁链 ψ 发生变化, 则在该线圈中将有感应电势产生。感应电势的数值与线圈所交链的磁链的变化率成正比。感应电势的方向, 将**倾向于**产生一电流, 如电流能流通, 便会阻止线圈中磁链的变化。如电势、电流和磁通的正方向取得一致, 如图1-2所示, 即正电势倾向于产生正电流, 而正电流又将产生正磁通, 即电流的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋定则, 则用数学公式表示时, 感应定律可写为

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1-7)$$

必须指出, 在建立上式时, 各种电磁量的**正方向概念**是十分重要的, 决不容许混淆。基本的物理概念是:
线圈中的感应电势将倾向于阻止线圈中磁链的变化。

设所有的磁通都交链线圈的全部匝数 w , 则式(1-7)便化为

$$e = -w \frac{d\phi}{dt} \quad (1-8)$$

式中, ϕ 的单位是Wb, e 的单位是V。

线圈中磁链的变化, 可能有二种不同的方式:

(1) 磁通本来就是由交流电流所产生, 也就是说磁通本身在变化着, 这样产生的电势称为**变压器电势**;

(2) 磁通本身虽不变化, 但由于线圈与磁场间有相对运动, 线圈中的磁链在变化, 这样产生的电势称为**运动电势**或**速度电势**。

可以证明, 速度电势的大小可以用另外一种形式表示。通常形象化的说法是: 当某一导体在磁场中切割磁力线时, 则在该导体中产生的速度电势是

$$e = Blv \quad (1-9)$$

上式中 B 、 l 及 v 三个物理量互相垂直, 如 B 的单位为T, l 的单位为m, v 的单位为m/s, 则 e 的单位为V。

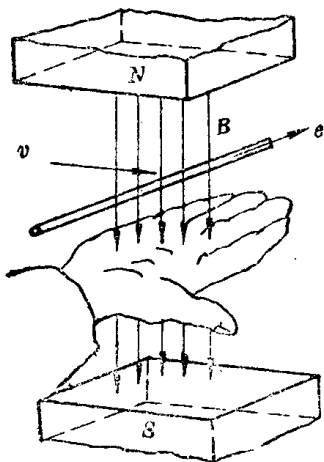


图 1-3 右手定则

为了简单地确定感应电势 e 的方向, 通常形象地用右手定则确定。参看图1-3将右手伸开, 使磁力线指向手掌, 大拇指在手掌平面中与其它四指形成 90° 角, 如大拇指指向导体运动方向, 则其它四指指向导体中的感应电势方向。

三、力和转矩

设有一导体位于磁场中, 用外力 F 加于导体使其以速度 v 运动, 外力对导体做功, 导体在磁场中截切磁力线, 导体中产生感应电势 $e = Blv$, 若导体外接至适当负载电阻成闭合回路, 则将有一电流 i 顺着感应电势方向流向负载, 输出电功率 $P = ei$ 。如略于各种损耗, 根据能

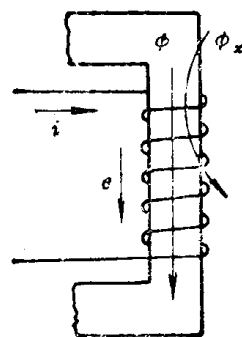


图 1-2