

高等学校試用教科書

电 机 学

上 册

(修 订 本)

华中工学院电机教研室編



中 国 工 业 出 版 社

本书叙述交、直流电机和变压器的工作原理和基本结构，分析它们的运行方式和特性。全书共分上、下两册，上册包括直流电机和变压器两篇，下册包括交流电机理论的一般问题、异步电机、同步电机和交流换向器式电机四篇。

本书可供电机与电器、工业企业电气化及自动化、发电厂电力网及电力系统、船舶电工和电力机车等专业作为“电机学”课程的试用教科书，也可供电机制造厂和电力运行部门的工作人员参考。

电机学

上册

(修订本)

华中工学院电机教研室编

第一机械工业部教材编审委员会编辑(北京复兴门外三里河第一机械工业部)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $15^{1/2}$ ·字数365,000

1961年10月北京第一版

1965年5月北京第二版·1965年5月北京第六次印刷

印数10,694—14,283·定价(科五)1.80元

统一书号: K15165·980(一机-215)

前 言

我教研室自 1958 年开始以集体编写方式进行“电机学”课程的教材建设。在 1959 年上半年便完成了电机学教材初稿，并以讲义形式于 1959 至 1961 年在我院电机与电器、工业企业电气化及自动化、发电厂电力网及电力系统等专业试用了两遍。根据试用经验，对初稿作了多次重大修改之后，便分上、下两册先后于 1961 年 10 月和 1962 年 5 月作为试用教科书出版。

经过两年来一些兄弟院校试用的意见，并参照新审订的教学大纲（试行草案），在保留本书原来特点的基础上，对本书上册作了修订。重新编写了第七、八、十等三章，绪论和第九章作了较大的精简，其他各章则作了部分修改。变压器部分改用与电工基础课相同的正方向表示法。此外并对书中文字作了加工。本书下册也将在最近进行修订。

本书在内容方面，基本上与 1963 年 5 月新审订的 205 学时电机学和 180 学时电机学教学大纲（试行草案）一致，但有个别章节较大纲规定内容略为丰富和深入。在技术资料方面，尽量采用本国资料，在理论分析方面，对基本概念的阐述力求严格，并注意从物理现象出发，使学生能掌握现象的物理本质，打下良好的理论基础。

本书可供电机与电器、工业企业电气化及自动化、发电厂电力网及电力系统、船舶电工和电力机车等专业作为“电机学”教材之用。采用本书作试用教科书时，讲课时数以 130~150 小时为最适宜，若按专业特点对内容有所选择和取舍，则也能在 120~140 小时内讲完。为便于不同专业对内容的选择，书中将非主干内容用小字印出，教学时数较少时可以不讲，而不影响整个体系。

由于我教研室政治和业务水平的限制，以及修订时间还不是很充裕，因此书中错漏和不妥之处在所难免，我室热情地期待着读者提出批评和意见，以便将来再作改正。

本书由我室同志集体编写而成，全室绝大部分同志，以及我院 1961 年毕业的电机专业的一部分同学，都曾先后参加过此项工作，下面只举出初稿和历次修改的执笔人：林金铭、许实章、黄家俊、熊衍庆、陈传瓚、尹家骥、李湘生、马志云、黄维国、何全普、禹玉贵、屈琨等同志。其中，前面四位同志并为这次修订稿的执笔人，许实章同志兼负全书主编之责，林金铭同志且对修订稿作了全面的审阅。

华中工学院电机教研室

1963 年 12 月

目 录

前言		0—3 电机的发展简史	2
绪论	1	0—4 我国电机制造业的发展概述	4
0—1 电机在国民经济中的作用	1	0—5 电机制造业所用的材料	5
0—2 电机的主要类型	2		

第一篇 直流电机

第一章 直流电机的工作原理及基本结构	8	第四章 直流电机负载时的磁场, 电枢反应及其计算	64
1—1 直流电机的基本型式及应用范围	8	4—1 负载时直流电机的磁场	64
1—2 直流电机的工作原理	8	4—2 电枢的磁势和磁场	65
1—3 直流电机结构的主要元件	10	4—3 横轴与纵轴电枢反应, 电枢反应磁势各分量的计算	66
1—4 额定值	14	4—4 发电机的电枢反应	68
第二章 直流电机空载时的磁路及空载磁势计算	15	4—5 电动机的电枢反应	72
2—1 概述	15	4—6 负载时主极的磁势	72
2—2 磁路计算的基本原理	15	第五章 直流电机的换向	72
2—3 气隙磁势计算	17	5—1 概述	72
2—4 齿磁势	19	5—2 换向过程的基本现象	73
2—5 电枢轭的磁势	22	5—3 换向元件内的电势和电势平衡方程式	74
2—6 主极和磁轭的磁势	22	5—4 换向过程的分析	75
2—7 电机的磁化曲线	23	5—5 $b_m = b_k$ 时电抗电势 e_r 的确定	79
2—8 磁路计算举例	24	5—6 元件的换向电势 e_k	81
第三章 直流电机的电枢绕组及电势	27	5—7 电刷宽 $b_m = b_k$ 时的换向	81
3—1 概述	27	5—8 换向电流对主磁场的影响	83
3—2 绕组的分类	27	5—9 火花等级的规定, 火花产生的原因	83
3—3 环型电枢绕组概述	27	5—10 相邻换向片间的电压分布和电位性火花	85
3—4 从环型电枢绕组过渡到鼓型电枢绕组	28	5—11 改善换向的方法	86
3—5 鼓型电枢绕组的结构和基本特性	29	5—12 换向器上的环火及其防止办法	90
3—6 单叠绕组	33	5—13 电刷及其工作特性	91
3—7 复叠绕组	40	5—14 换向分析与调整的实验方法	92
3—8 单波绕组	43	5—15 换向性质的新近概念	94
3—9 复波绕组	48	第六章 直流发电机	96
3—10 电枢绕组的对称条件	50	6—1 直流发电机的应用范围及按激磁方式的分类	96
3—11 均压联接	51	6—2 直流发电机的功率平衡图及电势方程式	97
3—12 蛙形绕组	57		
3—13 各种型式绕组的比较及应用范围	59		
3—14 直流电机电枢绕组的电势	59		

6-3 电磁转矩和转矩方程式.....	97	8-1 损耗及其分类.....	125
6-4 发电机的特性曲线及电压调整率.....	99	8-2 基本损耗.....	125
6-5 他发电机的特性.....	100	8-3 附加损耗(p_a)	127
6-6 并发电机的自激和特性.....	103	8-4 直流电机的效率.....	128
6-7 串发电机的特性.....	106	第九章 旋转电机的发热和冷却	128
6-8 复发电机的特性.....	107	9-1 电机制造中所用的绝缘材料及其所	
6-9 直流发电机的并联运行.....	107	允许的温升.....	128
第七章 直流电动机.....	110	9-2 电机的温升及温升限度.....	129
7-1 电机的可逆原理.....	110	9-3 电机发热计算的基本原理.....	130
7-2 直流电动机的功率平衡图.....	111	9-4 电机的主要额定工作方式.....	133
7-3 直流电动机的电势方程式和转矩方		9-5 电机的冷却方式及分类.....	133
程式.....	111	第十章 特种直流电机	136
7-4 电动机的特性.....	112	10-1 概述.....	136
7-5 直流电动机的启动.....	113	10-2 单极式直流发电机.....	136
7-6 直流电动机的工作特性.....	115	10-3 三电刷直流发电机.....	137
7-7 直流电动机的机械特性和稳定工作		10-4 交轴磁场电机放大机.....	138
的条件.....	119	10-5 自激电机放大机.....	141
7-8 直流电动机的制动.....	120	10-6 直流伺服电动机.....	142
7-9 直流电动机的调速.....	121	10-7 直流测速发电机.....	143
第八章 电机的损耗和效率	125		

第二篇 变压器

第十一章 变压器概论.....	144	14-1 三相变压器的磁路系统.....	179
11-1 变压器的工作原理及基本类型.....	144	14-2 三相变压器绕组的联接法与联接组.....	180
11-2 变压器的基本结构元件.....	145	14-3 三相变压器的空载运行.....	184
11-3 变压器的额定值.....	151	第十五章 三相变压器在不平衡负载下	
第十二章 变压器的空载运行	152	的运行.....	186
12-1 单相变压器空载运行时的物理情况.....	152	15-1 三相变压器不平衡负载运行的一般	
12-2 变压器的空载运行.....	153	情况及其分析方法.....	186
12-3 变压器的空载损耗.....	159	15-2 Y/Y_0 联接时的不平衡负载运行, 零	
12-4 变压器的空载试验.....	160	序阻抗的决定.....	187
第十三章 变压器的负载运行	160	15-3 $\Delta/Y_0, Y/\Delta/Y_0$ 联接时的不对称负	
13-1 变压器负载运行时的物理情况和基		载运行.....	193
本方程式.....	161	15-4 $Y/Y, Y/\Delta, \Delta/Y$ 联接时的不对	
13-2 变压器的折合值.....	163	称负载运行.....	194
13-3 变压器负载时的向量图.....	165	15-5 V/V 联接的变压器运行	194
13-4 变压器中能量的转换.....	166	第十六章 三绕组变压器	196
13-5 变压器的等值电路.....	166	16-1 三绕组变压器的绕组布置和联接法.....	196
13-6 变压器的短路运行.....	169	16-2 三绕组变压器的电势方程式、等值	
13-7 副边电压的变化.....	173	电路和向量图.....	196
13-8 变压器的效率.....	174	16-3 三绕组变压器的参数测定.....	200
13-9 变压器的漏抗及其计算.....	176	16-4 三绕组变压器的电压调整率.....	202
第十四章 三相变压器.....	179	16-5 三绕组变压器的效率.....	203

16—6 三繞組变压器各繞組的相对容量·····203	第十九章 变压器的过渡过程·····222
第十七章 自耦变压器·····204	19—1 变压器的过电流·····222
17—1 两繞組自耦变压器·····204	19—2 变压器突然短路时的电磁力·····226
17—2 三繞組自耦变压器的应用·····208	19—3 变压器的过电压·····228
17—3 三繞組自耦变压器的基本方程式和 等值电路·····210	19—4 变压器的过电压保护·····231
17—4 自耦变压器的特点·····214	第二十章 变压器的发热与冷却·····233
第十八章 变压器的并联运行·····215	20—1 变压器中热的发生与传播·····233
18—1 变压器并联运行的条件·····216	20—2 变压器各部分的温升限度·····233
18—2 組別相同但电压比和短路电压不相 等的变压器并联运行·····217	20—3 变压器的冷却方式·····234
18—3 組別和短路电压相同但变比不相等 的变压器的并联运行·····219	20—4 变压器的温度检测和过热保护·····235
18—4 組別和变比相同但短路电压不相等 的变压器的并联运行·····220	第二十一章 特种型式变压器·····236
18—5 变压器的調压·····221	21—1 变相用变压器·····236
	21—2 試驗用变压器·····237
	21—3 电弧炉电源变压器·····238
	21—4 电流互感器和电压互感器·····239

緒 論

0—1 电机在国民經济中的作用

电机制造属于机械制造，它对国民經济的作用，特别是对我国社会主义建設有着重大的意义。众所周知，現代电能已日益广泛地作为国民經济各部門的主要动力来源。这是因为电能有着許多优点，如：1. 电能可任意轉变为其它形态的能，其他形态的能也易于轉变为电能；2. 电能最易于传输与分配；3. 电能很容易控制；4. 利用电能极为經濟，它可以集中发出分散使用（如改变电压值）。

由于电机能将机械能轉变为电能或将电能轉变为机械能以及用作电能自身变化的机械，因而它就成为現代动力設備中生产、变换、和分配能量的主要設備，可見电机对国民經济发展的重大作用实际上是与电能在国民經济各部門的广泛应用联系在一起的。

电能不仅在能量供应方面对各生产部門起着重要的作用，而且是技术进步的重要因素。实质上，电能的应用不仅促进了产品数量的增长，而且使产品质量起了根本变化，它可以实现許多人工所不能完成的生产过程。

下面我們就电能和电机在国民經济中的几个主要方面的应用作簡要說明：

A. 在工业及农业方面 在工业和农业的生产机械上已广泛地采用电动机——将电能轉变为机械能。这有許多好处：首先，是控制方便，可以进行远距离或自动控制，同时电气操作既灵活又省力。和其它原动机比較：它的效率高，附属設備少，維護簡便。

B. 在冶金工业方面 冶金工业是对国民經济发展有重要意义的重工业部門之一，它之所以具有高度的技术水平与生产能力，正是因为它利用了电工技术，而电机則是其主要的电气設備。現在冶金工厂的平炉、轉炉、压軋机械及輸送机械等全由有完备自动控制的电机来驅动。目前最大型的軋鋼机由 10000 馬力直流电动机拖動，整个軋压过程中有时能由一个工人操纵而所軋的鋼坯可重达 20 多吨。

C. 在化学工业方面 化学工业对工农业、国防事业有重要作用，而电机的应用对化学工业的发展起着巨大的影响。如化工厂中普遍地采用低速大容量的同步和异步电动机（单机容量高达 6000 千瓦）以传动压缩設備。此外在电解电镀等方面采用着达数万安培电流的特种直流电机。

D. 煤炭工业方面 煤炭是工业的粮食，它对生产和人民生活等有着重要影响。煤炭工业的高度发展也正是因为广泛地应用了电机传动的钻探設備、电气機車、起重机及联合采煤机所致。

E. 电气运输方面 电机在交通运输上的被采用，不仅能得到高度的經濟效益，如大大提高运输量，而且引起了运输工具的革新。电气機車、有軌和无軌电車的出現正是因为采用电机作为其牵引动力的結果（蒸汽牵引機車的效率只有 3~5%，而电气牵引的效率則为 16~18%）。

F. 对于自动控制方面 随着生产的飞跃发展，又提出了对于生产机械的自动控制的要求。各种生产机械、运输工具、乃至标志着人类科学最新成就的人造卫星、宇宙飞船等

等的自动控制、自动调节、自动测量、自动检查各方面的设备中，电机（微型电机）是一个十分重要的元件。

以上所述足以表明电机工业在国民经济中起着多么巨大的作用，对国民经济的发展有着多么重大的作用与影响，列宁同志的“共产主义就是苏维埃政权加上全国电气化”这一英明断语给了电气事业以极高的估价。

如前所述，电机工业对于其他各部门的发展有着重大影响，反过来，工农业的发展、生产力的提高又对电机工业不断地提出新的要求，促使电机工业的不断发展。

0—2 电机的主要类型

电机的型式虽然很多，但其工作原理皆基于法拉第电磁感应定律。因而其构造的一般原理也就是：用适当的有效材料构成的互相感应的磁路和电路以产生电磁功率和转变能量的形态。按照能态的转换方式，电机可分为：

- 一、将机械能变为电能——发电机。
- 二、将电能变为机械能——电动机。
- 三、将电能变为电能：
 1. 用来变化电流性质（如变交流为直流）的叫换流机；
 2. 用来变化交流电的频率的叫变频机；
 3. 用来变化交流电的相数的叫变相机；
 4. 用来变化交流电压的叫变压器。

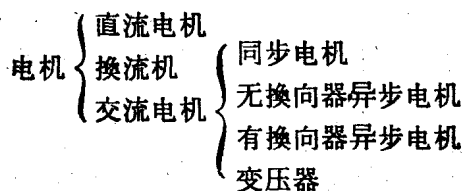
应该指出的是，所有发电机和电动机在基本原理上来看，只不过是一种机器的两种运行方式，它们本身是可逆的（楞次在1833年所提出的“电机可逆原理”）。

上述各种电机除变压器是一种静止的器械而外，其余均为旋转机械。

旋转电机的结构一般由三个主要部分组成：旋转部分——被叫作转子；静止部分——被叫作定子；定子和转子之间的间隙——被叫作空气隙。

电机若按照其发生或需要的电的性质可以分为交流电机、直流电机与换流机；交流电机除变压器外，尚可分为同步电机和异步电机。

这样，电机的主要类别可列表于下：



0—3 电机的发展简史

电机诞生迄今已有一百多年了，它的发明、发展也如其他工业部门一样，是与整个社会的发展密切相关的。随着它的发展，促进了社会生产力的不断提高，促进社会的不断向前进步。因而必须用历史唯物主义的和辩证唯物主义的观点，也就是说，不能离开当时的社会生产力、生产方式或生产方式的发展阶段来分析和观察电机的发展过程。恩格斯曾指出：“社会方面一旦发生了技术上的需要，则这种需要就会比十数个大学更加把科学推向

前进。……关于电气，只有从电气在技术上可用的性能已被发现时起，我們才知道一些合理的东西”^①。可見电工学、电工技术的发明、发展絕不能认为仅是少数发明家的聪明才智的結果。当然，他們为了适应客观要求在促进社会生产力发展过程中对电机发展方面也作了重要的貢獻。

电机的发展史基本上可划分为两个时期。

二十世紀以前是第一时期。这一时期的特征是，电机由誕生到获得初步的工业应用，三相的出現，各种电机的初步定型以及电机理論、計算和設計方法的建立与发展。

十九世紀 70 年代以前，蒸汽机是工业上的唯一动力机械。但随着当时资本主义工业的发展，它已逐漸不能滿足要求。此外，新城市的兴起，大工业的出現，也极需新的完善的照明方式。这就促使人們去寻求新的能源。同时，作为电机理論基础的电学、磁学已有相当的发展——接連的許多重大发现以及一些基本定律的确立，都为电机的誕生提供了良好的前提。

由于化学能源（原电池）的首先发现，人們最初企图制出电动机来利用这种新的能量形式。1821年法拉第的带电导体圍繞直立磁鉄旋轉的實驗模型就是这种企图的最早嘗試，也是近代电动机的“雛型”。电动机的发展最初深受蒸汽机結構观念的影响，因此早期的电动机一般是按往复式运动的。直到 1834 年俄罗斯科学院院士雅可比才利用电磁鉄制出旋轉运动的电动机。雅可比电动机上装有特殊的电流“換向器”，这可看做是近代換向器的胚胎。但是，这时电动机的能源（原电池）成本較高，功率不大，不能与蒸汽机匹敌，于是人們便寻求較大和較經濟的电源，这促进了发电机的誕生与发展。

1831 年法拉第所发现的电磁感应定律和 1833 年楞茨总结法拉第實驗并从理論上确定电动机和发电机的可逆原理的楞茨定律为发电机的发展提供理論上的根据。1832 年皮克西兄弟根据法拉第的发现先后制出了世界上第一台永磁交流和直流发电机。1845 年直流电机由永久磁鉄过渡到电磁鉄，1867 年西門子更利用約尔塞的混合激磁观点創造了自激式直流发电机。至于电枢結構型式，則从 1856 年的双 T 形（西門子）、1870 年的环形（帕新諾蒂）发展到 1873 年的鼓形电枢（黑夫堅—亚尔特涅克）。因此，十九世紀 70 年代的直流电机已实际上具有近代电机的各种基本結構元件。

电机发展到十九世紀中期时，即为馬克思所注意，他曾談到：“……自然科学已在准备一次新的革命。蒸汽……的統治已将終結，另外一个更大得无比的革命必将取而代之，它便是电的火花……”^②。

电机发展初期主要是直流，因为当时电能的主要用戶是电鍍、弧光灯照明以及城市电气运输。

为扩大直流电的供电范围，1882 年德卜勒斯在一次博覽会上証明进行远距离輸送电能的可能性，当时輸电 2 千瓦，距离 37 公里，电压 1500~2000 伏。对此，恩格斯在 1883 年写道：“……这是一个巨大的革命。蒸汽机教会我們把热能变成机械运动，但电能的利用給我們指出各种能量——热、机械运动、电、磁、光的相互变换以及將它們用之于工业的道路。……德卜勒斯的发现……在于这还仅仅是开端，而这个发现將最終地把工业几乎

① 馬克思恩格斯选集，中文版第二卷，第 504 頁（莫斯科外国文书籍出版局，1955）。

② 李卜克內西：“馬克思回忆录”。

由所有局部限制中解放出来，和使利用即令是最遥远的水力资源成为可能；而且，如果说最初这只对城市有利，归根到底，将会成为消灭城乡对立的最强有力的杠杆。非常明显，由此，生产力将发展到这样的程度，使得资产阶级将愈来愈无力加以控制”^①。

随着对直流电机需要量的增长与应用范围的扩大，随着长距离送电需将电压增高到几千伏，直流电机表现出制造困难、换向器工作情况不良以至于常出事故等问题，使得人们由 80 年代开始渐渐注意交流电的研究与应用。

亚布罗契可夫和格兰姆在 1876 年所提的多极“多相”交流发电机是皮克西兄弟的单相、和佚名发明家（署名 P. M.）的多极发电机的改进，而且是近代同步发电机的雛型结构，即具有静止的电枢绕组，旋转磁极和“激磁机”与滑环。

用电磁方式变换电流是法拉第发现电磁感应定律以后已熟知的原理。但采用铁芯、两只绕组而形成近代变压器须归功于亚布罗契可夫。通过 1884 闭式铁芯的发明（霍浦金孙），1885 年匈牙利工程师德利等人进一步明确地提出近代的变压器芯式和壳式的结构型式。

交流电的广泛使用于电力传动是旋转磁场及多相制的发明的结果。1883 年德卜勒斯从理论证明二相电流产生旋转磁场的可能性，接着 1885 年弗拉里斯和 1886 年特士拉先后分别研究并制出二相异步电动机。尤其重要的是：1889 年俄罗斯电工学者多利沃—多勃罗沃尔斯基提出了三相交流系统并于 1891 年制成了第一台完全与近代类似的三相异步电动机和第一台三相变压器；1890 年建成了长 175 公里的三相试验性高压输电线（电压 15000 伏，功率 75 千瓦），从此以后，三相交流逐步走上了主导地位。

二十世纪是电机发展的第二时期。这时期的特征是工业、运输业的迅速发展与电气化。为此，对电机的更高经济性、重量更轻、尺寸更小诸方面提出愈来愈多的要求。相应的科学研究的广泛发展，使人们逐步深入地掌握电机的电磁和热过程、发展新型绝缘材料、优质铁芯材料，因而，即使各种电机的结构原则基本不变，但结构外形起了变化并能适应多种要求；重量变轻、尺寸变小、经济性提高了。

0—4 我国电机制造业的发展概述

我们的祖国是一个地大物博、资源丰富、人口众多的大国。早在三千年以前就发现了磁的现象，并得到了实际应用，但几千年的封建统治及近百年来帝国主义的压迫，使得我国科学技术长期不能发展。

解放前，半封建、半殖民地的旧中国电机制造业如同其他工业一样，带有极浓厚的殖民地色彩，没有独立的电机制造业体系。虽然我国电机制造业起始于 1915~1916 年，但当时的工厂和企业主要分布在东北和沿海一带城市如沈阳、上海、天津等地。这些企业规模小、设备陈旧、技术落后，主要是修理和装配。只能制造少量的小容量电机产品，而且型式混乱、标准不一，仅频率就有 25、50、60 赫芝等种，电压有 56 种之多。所能生产的交流发电机单机容量为 200 千瓦，电动机不超过 180 马力，变压器为 2000 千伏安。电站所用的主要发电设备则成套的由外国进口。帝国主义者为了掠夺我国人民的财富，尽力窒息我国民族工业的发展。

① 马克思恩格斯全集，第一版，第二十七卷（俄文版），第 289 页。

解放十几年来,我国电机工业得到高速的发展,新建和扩建了许多电机工厂,为我国社会主义的强大电机制造工业打下了良好的基础。这些工厂为国家制造了大量的各种电机和发电设备,制造了成套的中、大型火力、水力发电设备,满足了我国社会主义建设的需要。同时各个工厂,响应党提出的勤俭建国,勤俭办一切事业的号召,在节约原材料、提高劳动生产率、降低成本、提高产品质量等方面也取得了很大的成绩。在这短短的时间内,我国电机工业走过资本主义国家需几十年走完的历程。

目前我国电机工业正沿着增加品种、提高质量、提高劳动生产率,并在自力更生的基础上稳步地向前发展,以满足我国国民经济各部门对电机提出的要求。

0—5 电机制造工业所用的材料

电机制造工业所用的材料有三类,即: 1) 结构材料; 2) 有效材料——导电和导磁材料; 3) 绝缘材料。兹分述于后。

A. 结构材料

结构材料用于制造电机中传递或承受机械负荷和应力的零部件。常用的结构材料有:

1) 铸铁,包括普通、可锻和非磁性铸铁; 2) 碳钢和合金钢,后者包括高强度和非磁性合金钢; 3) 有色金属及其合金; 4) 塑料。

用于电机中不同零部件的材料必须具有符合要求的相应机械性能。表征结构材料机械性能的是: 1) 强度限值, 2) 屈服点, 3) 疲劳限值, 4) 延伸率, 5) 冲击性能。

B. 有效材料

有效(导电和导磁)材料是为了给电机电磁过程创造最有利的工件条件。

电机工业中最重要的导电材料是铜和铝。铜具有比其他(除银以外的)金属小的比电阻,其抗锈能力比钢好,且容易焊接与熔化。铝做为导电材料虽不如铜,但具有比铜轻(约为铜的比重量的1/3)的优点。近来,由于铜资源的缺乏,铝已在许多方面取铜而代之。

铜的主要特性为: 比重 $\gamma = 8.89$ 公斤/分米³; 温度 15°C 时的比电阻 $\rho_{15} = \frac{1}{57} = 0.0175$ 欧姆·毫米²/米; 在 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内的电阻温度系数平均值 $\alpha = 0.003931/^{\circ}\text{C}$; $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内的热容量平均值 $c = 393$ 瓦·秒/ $^{\circ}\text{C} \cdot$ 公斤; 导热系数 $\lambda = 3.85$ 瓦/厘米· $^{\circ}\text{C}$ 。

铝的相应数据为: $\gamma = 2.7$ 公斤/分米³; $\rho_{15} = 0.0283$ 欧姆·毫米²/米; $\alpha = 0.0041/^{\circ}\text{C}$; $c = 910$ 瓦·秒/ $^{\circ}\text{C} \cdot$ 公斤; $\lambda = (2 \sim 2.1)$ 瓦/厘米· $^{\circ}\text{C}$ 。

电机工业中最重要的导磁材料是铸铁、铸钢以及各种型号的电工钢片。这些导磁材料的最重要电磁特性是磁通密度 B 与磁场强度 H 的关系、铁耗 p_c 与磁通密度 B 及频率 f 的关系。

电工钢片是含硅的合金钢,它是制造变压器和电机铁芯的主要材料。含硅量大则钢的比电阻增大(增大程度与含硅量约成正比关系),因此减少钢在交变磁场中工作时的涡流损耗。含硅量超过1.8%时显著地增加钢在弱磁场中的导磁系数,但稍为降低了它在强磁场中的导磁系数。其次,含硅可以减轻钢的老化(老化表现在钢的铁耗在使用期中逐渐加大),但使钢的机械性能变差和加工困难。一般含硅量高的钢片较脆,例如厚0.5毫米的D11、D12、D21型钢片(含硅3%以下)可以经受10次以上的弯折,而含硅4~4.8%

的 D 41、D 42 型鋼片經受 1 次弯折即可能断裂。

按照軋制方法，硅鋼片有热轧与冷轧两种。冷轧的磁性較佳，但磁通必須沿着軋制方向通过，就是它具有强烈的各向异性的性质，冷轧硅鋼片用于制造变压器以及巨型同步电机的鉄芯。

鋼的含硅标准及其相应比重如下：

含硅程度	具体含硅量，%	比重平均值
低度合金	由 0.8~1.8	7.80
中度合金	1.8~2.8	7.75
較高度合金		
a) 热轧	2.8~3.8	7.65
b) 冷轧	2.5~3.5	7.65
高度合金	3.8~4.8	7.55

电机工业中主要应用以下各型鋼片：D 11、D 12、D 21、D 31、D 310、D 320、D 330、D 41、D 42、D 43。其中：D 表示电工鋼片，第一个数字（1，2，3 或 4）表示含硅量，即 1——低度，2——中度，3——較高度，4——高度，第二个数字表示某型鋼片的鉄耗水平，即 1——正常的，2——較低的，3——更低的（参看表 8—1）；第三个数字 0 表示冷轧硅鋼片。

硅鋼片通常制成 0.5 毫米和 0.35 毫米的厚度，每大张的一般尺寸为 750 毫米×1500 毫米和 1000 毫米×2000 毫米，但也可軋制其他尺寸。

C. 絕緣材料

电机及变压器中使用大量的不同絕緣材料以絕緣其带电部分。对絕緣材料所提出的基本要求是具有高的介电强度。但是电机与变压器的絕緣系在較高温度下工作，并且要承受机械应力、大气潮湿的作用；所以除了介电强度以外，絕緣材料还应有必要的耐温、耐潮以及化学上稳定等性能，而且具有足够的机械强度。

表 0—1 列举电机工业所用的主要絕緣材料的数据。

表 0—1 絕緣材料性能表

材料名称	比 重	介电强度	击穿强度 (千伏/厘米)	許可工作温度 (°C)	导热系数 (瓦/厘米·°C)	热 容 量 (瓦秒/克·°C)
紙	0.7~1	2.5~3	80~90	90	0.0013	1.5
压紙板	1.16	—	13.5	90	0.0017	—
电工紙板	0.9~1.5	3	90~130	90	0.0014~0.0025	—
漆布	1	3~4	240~650	150	0.0025	—
石棉	2.5	—	20	450	0.0018	0.82
白云母	2.8	6.7	1000	500	0.0036	0.70
云母板	2.0~2.4	—	30~36	—	0.0012~0.0015	0.92
变压器油	0.89	2.2	70~120	95	0.0012~0.0017	1.8
瓷料	2.4	5.5~6	100~200	—	0.01	—
空气	0.00121	1	30	—	0.00025	1.5

电机或变压器运行的可靠性极大程度上依凭于其某些絕緣零部件或整个繞組的浸漆或浸胶的质量。电机制造方面采用的漆和胶的种类是很多的，它們必須滿足下述各基本要求：

1) 足够的介电强度； 2) 良好的浸漬能力； 3) 漆膜应能耐潮并且化学上是稳定的；

4) 应能耐温, 并且在正常工作温度下不产生开裂或失掉弹性现象。此外, 在某些情况下还应具有良好的粘合性能。

电机工业中所用的主要漆和胶有: 1) 油性漆, 基本上用于浸渍; 2) 沥青漆, 浸胶用; 3) 挥发性溶剂漆, 用于表面覆盖或浸渍, 如虫胶、胶木漆、以及耐温水平高的硅有机漆等。

在变压器中还采用变压器油作为绝缘和改进变压器的冷却状况, 对变压器油的基本要求也是高的介电强度。为此, 必须清除变压器油中所含的各种杂质、酸和水分。变压器油的主要特性见表 0—1。

电机工业上所用的绝缘材料按耐温能力分成若干等级, 其详细情况见第 9—1 节。

第一篇 直流电机

第一章 直流电机的工作原理及基本结构

1-1 直流电机的基本型式及应用范围

一般所讲的直流电机均系对换向器式直流电机而言，实质上它是交流电机，可是具有一个能在一定的条件下变交流为直流的专门装置——换向器。

换向器使电机的工作情况复杂，所以在本世纪初企图发展无换向器的或所谓单极直流电机。可是这种电机只能发生很低的电压，在其他方面与换向器式的电机相比较，其优越性也不很多，何况到二十世纪十年代的时候，直流电机换向器的结构设计已能满足实际运行中最严重的要求。所以换向器式电机是现今直流电机中的基本型式，而单极式电机仅应用于个别的特殊情况下。

直流电机可制造成容量、电压、转速等方面都有着宽广范围的发电机和电动机，它们的容量从分数千瓦到一万千瓦左右，电压普通不超过几千伏特。虽然在个别特殊型式的容量不大的电机中，其电压有达三万伏特以上，但电压在一千伏特以下的电机用得最广。直流电机的转速从每分钟几十转到每分钟几千转，个别特殊电机的转速高达每分钟几万转。

直流电机的应用范围是很广泛的。直流发电机在工业上，在有綫和无綫电通讯设备上，在同步电机的激磁系统上，在自动传送和飞机上都要用到。此外，直流电动机广泛地用来拖动电气机车、无軌电车以及軋鋼机和軋压机等等，較之交流电动机，其主要优点是能在广泛的范围内平滑而经济地调速。

直流电机的主要缺点是因为有换向器，其价格较高，同时因为主电路内采用容易发生火花的滑动电刷接触，使其运行的可靠性较差。

1-2 直流电机的工作原理

为了说明在换向器式直流电机内变交流为直流的过程，让我们先来研究一下最简单的交流电机的工作原理。设电机作为发电机运行，也就是电机由一原动机带动并将輸入的机械能转变为电能。

如图 1-1 所示的电机，磁系统由两个在空间上静止的并产生恒定磁通量的磁极 $N-S$ 组成。在 $N-S$ 极之间置有一个电枢，在电枢直径平面的表面上安置有綫匝（回路） $ab-cd$ ；綫匝的末端与固定在軸上的两个滑环相联接，滑环上装有与任何用电设备组成的外电路相联接的电刷 $A-B$ 。

使电枢按一定的方向如按反时针方向以恒速旋转，因为导体 ab 和 cd 处在完全相同的条件下，一根对应 N 极而另一根对应 S 极，所以只要研究其中任一根导体例如 ab 的电势的感应过程就行了。假定在导体有效部分的全长上，即切割磁力綫部分，其磁通密度 B 是相同的。又令 v 为导体与磁场的相对速度，则根据法拉第电磁感应定律，电枢旋转时感应

于导体内电势的瞬时值可由下式确定:

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

因为 l 与 v 值已经给定, 所以公式 (1-1) 可改写为:

$$e = \text{常数} \cdot B \quad (1-1a)$$

这样, 在所研究的情况下, 导体内感应电势依时间而变化的特性完全决定于磁极下磁通密度的分布情况。

今称与一磁极相对应的电枢圆周长度 τ 为极距。图 1-1 所示的电机具有二个极距, 或相应于一对极。设电枢外直径为 D , 电机磁

极对数为 p , 则 $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ 。

在实际的直流电机里, 磁极下面的磁通密度分布情况如图 1-2 所示。因此导体内的感应电势随时间的变化曲线也与磁通密度沿空间的分布曲线一样, 而具有如图 1-2 所示的波形。

感应电势的方向, 可以根据右手掌定则来决定 (图 1-3)。

将右手掌定则应用于图 1-1 的导体 ab

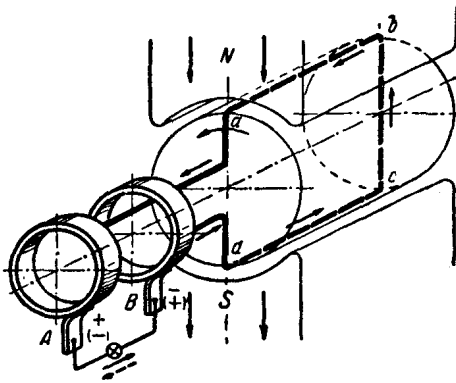


图 1-1 交流电机的工作原理。

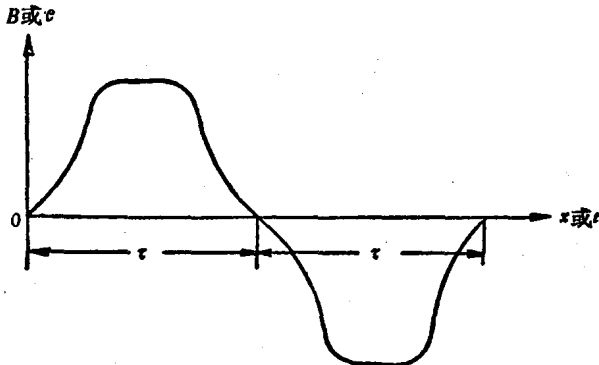


图 1-2 实际直流电机的磁通密度分布或电势波形。

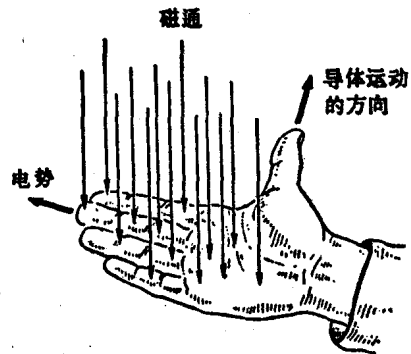


图 1-3 右手掌定则。

中, 我们可以看出当 ab 通过北极下面时, 其所感应的电势方向为离图面而向读者, 而当 ab 通过南极下面时则电势方向适与前者相反——离读者而向图面。可见在导体 ab 中感应出依时间而交变的电势, 电枢旋转一周电势变换方向两次。电势发生一次完整变化所需的时间 T 称为周期。一秒钟内的周期数称为频率, 以赫芝表之。在一般情况下, 如电机有 p 对磁极, 电枢的转速每秒钟为 n 转, 则感应电势的频率 f 等于电枢上导体每秒钟所经过的极对数 pn , 即

$$f = pn \quad (1-2)$$

从图 1-1 可见: 每一电刷经过滑环仅与某一导体相联接, 即电刷 A 与导体 ab 联接

而电刷 B 与导体 cd 联接，因而在外线路两端得到的是依时间交变的交流电压，而沿此路线流过的是具有频率 f 的交流电流。

为使在外线路按某一定方向流过电流，则在电机内需采用所谓换向器的特殊装置。换向器的工作原理如下：线圈 $ab-cd$ 的末端联接到互相绝缘并和转轴绝缘而且固定在转轴上的两只弓形铜片（换向片）上（图 1-4）。换向片上置有在空间上静止并与外电路联接的电刷 $A-B$ 。此时电刷在换向器上的装配位置与在图 1-1 内电刷在滑环上的装配位置是不同的，这具有很重要的意义。

为了使换向良好，应将电刷放在如图 1-4 所示的位置，以使它自一个换向片过渡到另一个换向片的瞬间，线圈中所感应的电势等于零。当电枢旋转时，在线圈 $ab-cd$ 中仍感应出交流电势，可是每一只电刷仅和处在有一定极性的磁极之下的导体相对应的换向片接触。例如电刷 A 总是和位于 N 极之下的导体相联接的换向片相接触，相反地电刷 B 仅和位于 S 极之下的导体相联接的换向片接触。因此

外电路中的电流将仅按一个方向流动，即自电刷 A 经外电路流入电刷 B ，换言之即感应在线圈 $ab-cd$ 中的交流电势及相应的交流电流在电刷及外电路中已换向为脉振电势及脉振电流（图 1-5）。如前面所假定的，若电机作为发电运行则向外电路流出电流的电刷 A 为

正极并标以“+”号，相反地向电机流入电流的电刷 B 为负极并标以“-”号。

图 1-5 所示的脉振电流在最大值与零之间发生变化，亦即有显著的波动特性。以后（第三章）将指出，如果在电枢上按一定型式绕制很多线圈并和换向器以一定方式联结的话，则电势的脉振情况将会缓和下来。

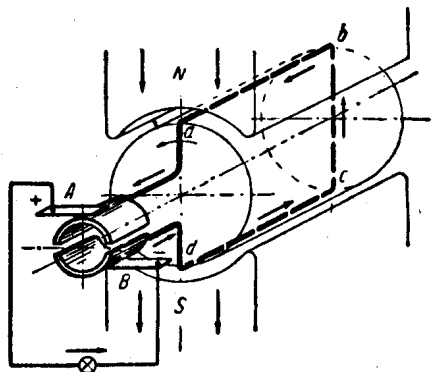


图 1-4 直流电机工作原理。

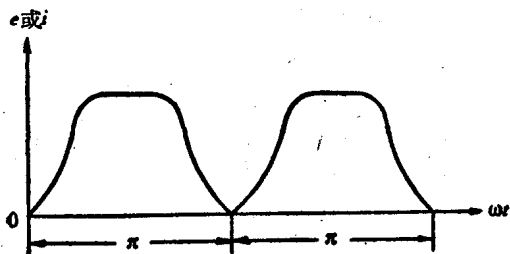


图 1-5 换向后的电势和电流。

1-3 直流电机结构的主要元件

直流电机由两个主要部分组成：

- 1) 静止部分，主要用来产生磁通。
- 2) 转动部分，被称为电枢，其中发生机械能变为电能的过程（发电机），或者相反地由电能变为机械能（电动机）。

静止部分与转动部分彼此被空气隙所隔开。

直流电机的静止部分由下列各元件组成：A) 主磁极，简称主极，用来产生主磁通；B) 换向极（或称附加极），装配于主磁极之间，用来获得换向器上无火花运行（在容量很小的电机里当缺乏地位时，不装置换向极）；C) 机座。

电枢是一个旋转于磁极之间的圆柱体，它由下列各元件组成：D) 有齿的电枢铁芯；E) 电枢绕组；F) 换向器和 G) 电刷装置等。

图 1—6 为我国生产的 Z_2 系列中 Z_2-92 型直流电机的外形图。而图 1—8 则为该电机的纵剖面图。这种系列电机的另一种型号的拆卸后的形状如图 1—7 所示。

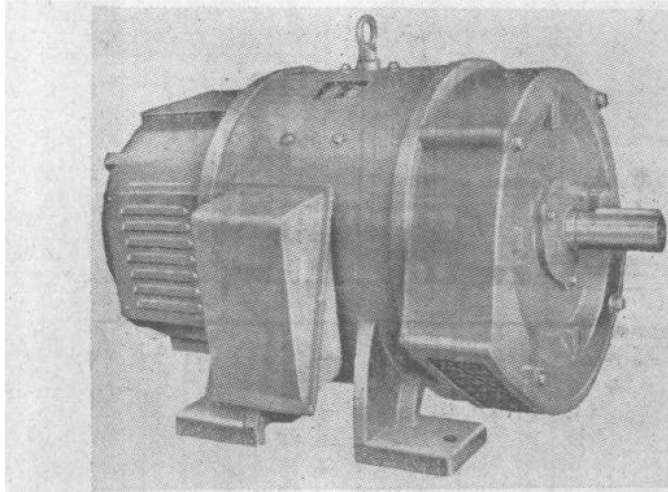


图 1—6 我国生产的 Z_2-92 型直流电机外形图。

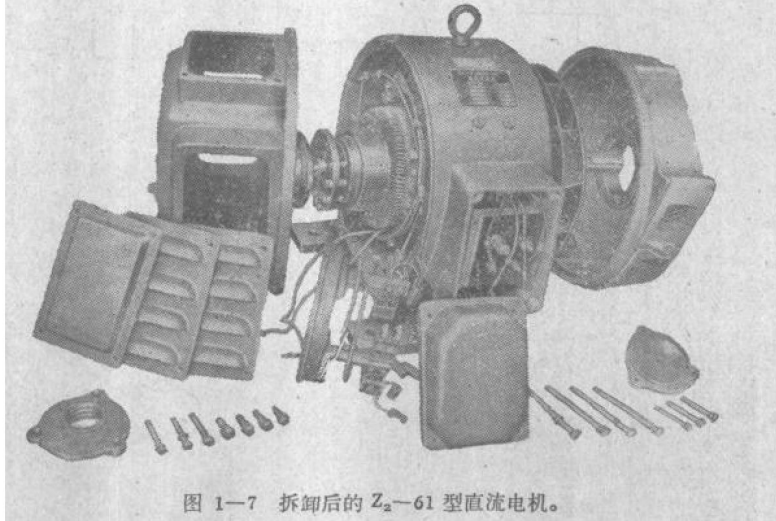


图 1—7 拆卸后的 Z_2-61 型直流电机。

从图 1—8 可看到构成直流电机的各个部件。

今将一般直流电机的主要结构部件作一简要叙述：

A. 主磁极

主磁极简称主极，其构造如图 1—9 所示。主极包括主极铁芯和激磁绕组两部分。主极铁芯一般由厚 1.0~1.5 毫米的钢板叠集并用铆钉铆紧。和电枢表面相对的一边叫极掌，用以使通过空气隙磁通的磁阻减小。极掌弧线有一定的形状，用以改善磁密的分布。激磁绕组套在主极铁芯上，它由绝缘导线绕成的线圈组成。线圈与主极铁芯之间用绝缘框架隔开，框架由电工纸板或者由塑料或胶木板制成。为了减少吸潮性和增加导热性，线圈需经过浸漆与烘干。为了改善冷却条件，绕制线圈时留有径向通风沟或轴向通风沟。主极用螺钉固定在机座上。