



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电机与拖动

邹 珺 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



中国电力出版社
CHINA ELECTRICITY PRESS

电机与拖动

第二版



中国电力出版社



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电机与拖动

主 编 邹 珺
编 写 邹清源 吴奕林
肖红霞 张 艳
主 审 刘景峰



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

本书是高职高专机电一体化技术、电气自动化及供用电技术专业的基础教材，教材包含直流电机原理及其电力拖动、变压器原理、交流电机原理、异步电动机及其电力拖动、同步电机及控制电机、电力拖动系统中电动机的选择。本书根据目前高职高专学生的实际情况，对电机及拖动理论进行了适当的删减和简化，增加了一些已被广泛应用的新技术、新材料和新方法。

本书可作为高等职业技术学院、高等专科学校、成人高校等相关专业课程的教材，也可作为相关专业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动/邹珺主编. —北京: 中国电力出版社, 2011. 2

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1379 - 8

I. ①电… II. ①邹… III. ①电机—职业教育—教材②电力传动—职业教育—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 019938 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 5 月第一版 2011 年 5 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.75 印张 331 千字
定价 23.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

“电机与拖动”是电气自动化、机电一体化技术和供用电技术等专业的一门专业基础课，以电路与磁路课程为基础，将“电机学”、“电力拖动”及“控制电机”等课程有机综合为一门课程，是学好后续专业理论课的重要前提。《电机与拖动》教材包含直流电机原理及其电力拖动、变压器原理、交流电机原理、异步电动机及其电力拖动、同步电机及控制电机、电力拖动系统中电动机的选择等内容。选用本教材时可根据具体的专业方向和实际知识水平的需要，对课程内容进行必要的删减。

为了适应我国目前自动化及机电行业的发展，根据目前高职高专学生的实际情况，编写本书时在传统电机与拖动教材的基础上，删减了一部分复杂陈旧的理论及推导，增加了一些已被广泛应用的新技术、新材料和新方法。本书共分9章，以电机及拖动的基本理论为核心，以应用为目的，遵循学科条理性、实践性，全面围绕现场应用、实践需求，在基本概述的基础上，介绍电机基本工作原理、基本结构及其运行特性；编写中力求体现新材料、新工艺、新技术；内容安排尽量体现知识面宽、内容浅显易懂、实用和新颖的特点；习题选择在较传统教材的基础上进行了删减，适当降低了某些习题的难度。本书可作为相关专业的教师和学生的教科书或入门参考书。

书中带有“*”的内容为选学内容。

本书由江西电力职业技术学院邹珺老师主编，其中第1、2章由邹清源老师编写，绪论、第3、4章由邹珺老师编写，第5、6章由肖红霞老师编写，第7、8章由张艳老师编写，第9章由吴奕林老师编写。

全书由刘景峰副教授主审，并对此书提出了宝贵意见，在此谨致谢意。

感谢中国电力出版社张镛编辑的大力支持。在本书的编写过程中，参考了大量的相关书籍，并应用了其中一些资料，碍于篇幅所限，难以一一列举，在此一并向有关作者及为此书作出支持和贡献的朋友表示衷心的感谢。

鉴于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请批评指正。

编者

2010年12月

目 录

前言	
绪论	1
0.1 教材的内容及课程的性质	1
0.2 常用的基本定律	2
0.3 铁磁材料	3
0.4 永磁磁铁简介	6
第1章 直流电机原理	8
1.1 直流电机的工作原理与结构	8
1.2 直流电机的电枢绕组	14
1.3 直流电机的电枢反应	18
1.4 直流电机的电枢电动势与电磁转矩	23
1.5 直流发电机	24
1.6 直流电动机	28
小结	30
习题	31
第2章 直流电动机的电力拖动	33
2.1 电力拖动系统的动力学基础	33
2.2 他励直流电动机的机械特性	36
2.3 他励直流电动机的起动	40
2.4 他励直流电动机的反转与制动	43
2.5 他励直流电动机的调速	48
*2.6 无刷直流电动机简介	54
小结	57
习题	58
第3章 变压器	60
3.1 变压器的基本知识和结构	60
3.2 变压器的运行原理	64
3.3 变压器的负载运行	71
3.4 变压器的参数测定	77
3.5 变压器的运行特性	81
3.6 三相变压器	84
3.7 变压器的并联运行	90
3.8 其他用途的变压器	93
小结	97
习题	98
第4章 交流电机的绕组及其电动势和磁动势	100
4.1 交流电机的绕组的基本知识	100

4.2	交流电机绕组的感应电动势	108
4.3	交流电机绕组的磁动势	117
小结	.....	126
习题	.....	126
第 5 章	异步电动机原理	128
5.1	异步电动机的工作原理和基本结构	128
5.2	异步电动机的空载运行	132
5.3	异步电动机的负载运行	135
5.4	异步电动机的电磁转矩	137
5.5	异步电动机的工作特性	140
小结	.....	141
习题	.....	142
第 6 章	异步电动机的电力拖动	144
6.1	异步电动机的机械特性	144
6.2	异步电动机的起动	145
6.3	异步电动机的制动	155
6.4	异步电动机的调速	157
小结	.....	162
习题	.....	163
第 7 章	同步电机	165
7.1	同步电机的基本工作原理和结构	165
7.2	同步发电机	168
7.3	同步电动机	174
小结	.....	177
习题	.....	178
第 8 章	控制电机	179
8.1	测速发电机	179
8.2	伺服电动机	181
8.3	步进电动机	184
8.4	旋转变压器	186
8.5	自整角机	190
小结	.....	194
习题	.....	195
第 9 章	电力拖动系统中电动机的选择	196
9.1	电动机选择的一般概念	196
9.2	电动机的发热和冷却	197
9.3	电动机的工作制分类	200
9.4	电动机功率的选择方法	202
9.5	电动机种类、型式、电压、转速的选择	207
小结	.....	209
习题	.....	210
参考文献	.....	211

绪 论

0.1 教材的内容及课程的性质

电机与电力拖动是电气自动化、机电一体化技术和供用电技术等专业的一门专业基础课，以电路与磁路课程为基础，将“电机学”、“电力拖动”及“控制电机”等课程有机整合为一门课程，是学好后续专业理论课的重要前提。

现代工业生产过程中，使用各种各样的生产机械以满足各种不同的生产工艺的要求。拖动各种生产机械，可采用气动、液压传动和电力拖动。其中电力拖动具有控制简单，调节性能好、损耗小、经济、能实现远距离控制和自动控制等一系列优点，因此大多数生产机械都采用电力拖动，随着石油资源的日益短缺，这一趋势还将扩大。目前新的电机控制技术已广泛地应用在工业生产和人们的日常生活中，其应用范围大至电力机车、电动汽车，小至家用电器、医疗器械、办公自动化设备。为了适应我国目前自动化及机电行业的发展，根据目前高职高专学生的实际情况，编写本书时在传统电机与拖动教材的基础上，删减了一部分复杂陈旧的理论，增加了一些已被广泛应用的新技术、新材料和新方法，本书可作为相关专业的教师和学生的教科书或入门参考书。

0.1.1 本书的内容

本书主要内容：

- (1) 直流电机原理及其电力拖动；
- (2) 变压器原理；
- (3) 交流电机原理；
- (4) 异步电动机及其电力拖动；
- (5) 同步电机及控制电机；
- (6) 电力拖动系统中电动机的选择。

选用本书时可根据具体的专业方向和实际知识水平需要，对课程内容进行必要的删减，以上分类仅供参考。

0.1.2 课程性质与任务

本课程的任务是使学生掌握变压器、交直流电机及控制电机的基本结构和工作原理，以及电力拖动系统的运行性能、分析计算、电机选择及试验方法，为学习后续课程和今后的工作准备必要的基础知识，同时培养学生分析和解决电机及电力拖动方面问题的能力。

电机及拖动既是一门理论性很强的专业基础课，又具有专业课的性质，涉及的基础理论和实际知识面广，是电学、磁学、动力学、热学等学科知识的综合。而用理论分析各种电机及拖动的实际问题时，必须结合电机的具体结构，采用工程观点和工程分析方法。在掌握基本理论的同时，还要注意培养实验操作技能和计算能力，因此实践性也较强。所以在学习本课程的同时，要理论联系实际，重视实验和实践，注意与生活和生产实践的联系，让知识不仅仅只局限在书本上。

0.2 常用的基本定律

0.2.1 全电流定律

如图 0-1 所示, 设空间有多根载流导体, 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 H 的线积分 $\int_l H dl$ 等于该闭合回路包围的所有导体电流的代数和, 即

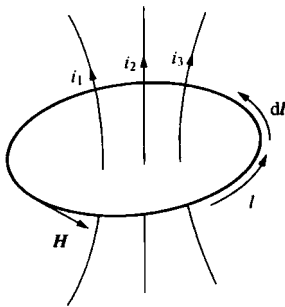


图 0-1 全电流定律

$$\int_l H dl = i_1 + i_2 + i_3 \dots = \sum i \quad (0-1)$$

全电流定律在电机原理的研究中, 应用很频繁, 是各类电机的磁路计算基础。根据电机和变压器磁路均由多段组成的特点, 式 (0-1) 可写成

$$\sum_k H_k l_k = \sum i = Ni \quad (0-2)$$

式中 H_k ——第 k 段磁路的磁场强度, A/m;

l_k ——第 k 段磁路的平均长度, m;

Ni ——磁动势, 安匝。

0.2.2 电磁感应定律

设磁场中有一 N 匝的线圈, 当线圈交链的磁通 Φ 发生变化时, 线圈中就会产生感应电动势。如果感应电动势假定的正方向与交链的磁通的正方向符合右手螺旋定则, 如图 0-2 所示, 则感应的电动势为

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-3)$$

其中

$$\Psi = N\Phi$$

式中: Ψ 为磁链; 负号表明感应电动势产生的电流所激励的磁场总是倾向于阻止线圈中磁链的变化, 称为楞次定律。

0.2.3 电磁力定律

1. 电磁力定律

在磁场中, 通电导体将受到电磁力的作用, 如果导体与磁场相互垂直, 则导体受到的电磁力为

$$F = Bli \quad (0-4)$$

式中 F ——导体受到的电磁力, N;

B ——磁通密度, T;

l ——处在磁场中的导体有效长度, m;

i ——导体中的电流, A。

其中, 电磁力 F 、磁场 B 和载流导体 i 的关系由左手定则确定。

2. 电磁转矩

由电磁力产生的转矩称为电磁转矩。设转子半径为 r , 单根导体产生的电磁转矩为

$$T_s = Fr = Blir \quad (0-5)$$

式中 T_s ——电磁转矩。

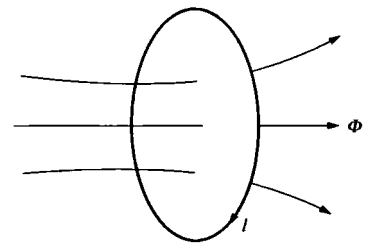


图 0-2 电磁感应定律

0.3 铁 磁 材 料

电机是依据电磁感应定律而工作的，铁芯磁路是其重要的组成部分。

1. 铁磁物质磁化及铁芯磁路饱和特性

电机的铁芯由铁磁物质制成。铁磁物质包括铁、镍、钴及其合金，常用的铁磁材料有氧化硅钢片、纯铁及铸钢等，这些材料虽然磁导率高，但涡流损耗大，常用于中低频设备。另一类铁磁材料为陶瓷软铁氧化物，它们的特点是涡流损耗小，但磁导率低，常用于脉冲变压器和高温电子元器件中。

铁磁物质置于外磁场中会显著增强磁场。这是因为铁磁物质在外磁场中被磁化，产生附加磁场，叠加在外磁场上，使得合成磁场大大增强。图 0-3 是铁磁物质磁化的示意图，其中图 0-3 (a) 表示未磁化前，铁磁物质内部具有极性的磁畴分子杂乱无章地排列着，所以铁磁材料本身不呈现磁性。一旦将铁磁物质置于外磁场中 [见图 0-3 (b)]，各个磁畴将在外磁场的作用下方向趋向一致，从而形成附加磁场叠加在外磁场上使总磁场增强，所以铁磁材料的磁导率 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ 。 μ_0 为真空中的磁导率，一般可认为是非铁磁材料的磁导率。电机中常用铁磁材料的磁导率 μ_{Fe} 为 $2000 \sim 6000\mu_0$ 。

将尚未磁化的铁磁材料置于磁场中进行磁化时，随着磁场强度 H 的逐渐增大，磁通密度 B 将随之增大，曲线 $B=f(H)$ 呈非线性特征，称为铁磁材料的原始磁化曲线，如图 0-4 所示。在曲线 Oa 段，铁磁材料的部分磁畴开始按外磁场 H 的方向旋转；在曲线 ab 段，大量磁畴按外磁场 H 方向取向， B 值成正比增大；在曲线 bc 段，可以按外磁场 H 转向的磁畴数量越来越少， H 值增加变慢，称为“饱和”。达到饱和之后，随 H 值增加， B 值的增加规律基本与非铁磁材料的规律 $B=\mu_0 H$ 相同，如曲线 cd 段及其以后。

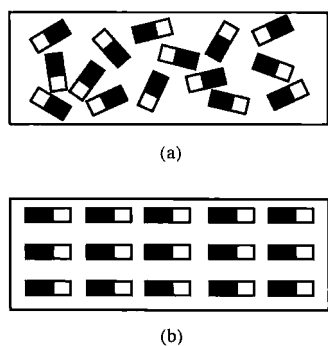


图 0-3 磁畴
(a) 未磁化时；(b) 磁化后

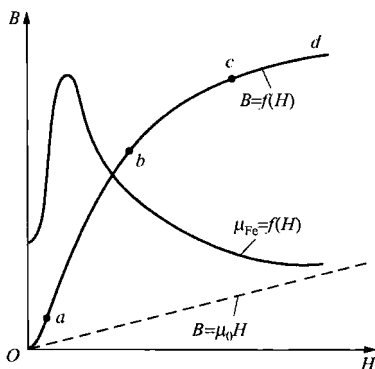


图 0-4 铁磁材料磁化曲线和 $\mu_{Fe}=f(H)$ 曲线

曲线 $B=f(H)$ 称为铁磁材料的磁化曲线，其上 b 点，是曲线开始拐弯的点，称为膝点，表示磁路开始饱和。

由于 $B-H$ 曲线是非线性的，磁导率 $\mu=\frac{B}{H}$ 不为常数，见图 0-4 中曲线 $\mu_{Fe}=f(H)$ 。 Oa 段 μ 值较小， ab 段 μ 值较大，过了 b 点以后 μ 值又较小，进入饱和区后， μ 值急剧下降，若

H 值再增大, μ 值将继续减小, 直至逐渐趋于 μ_0 。电机铁芯内的工作磁通密度 B , 通常选择在膝点附近, 以便磁路内既有较大磁通量, 又不会过分饱和和以免增大励磁电流及损耗。

2. 交变磁场中的磁滞、涡流现象

若铁磁材料置于交变磁场中, 则铁磁材料在外磁场作用下进行周期性的反复磁化, 其 B 与 H 之间的关系为图 0-5 所示的闭合回线 $abcdefa$ 。由图 0-5 可见, 当外磁场 H 从零增加到 H_m 时, B 值相应地按起始磁化曲线增加到 B_m , 此后逐渐减小 H , B 值将按曲线 abc 下降, 至 b 点时 $H=0$, 而 $B=B_r$, B_r 称为剩余磁通密度, 简称剩磁; 若使 B 值从 B_r 减小到零, 则须加反向的外磁场 H_c , H_c 称为矫顽力。铁磁材料这种磁通密度 B 的变化滞后于磁场强度变化的现象, 称为磁滞现象。铁磁材料在交变磁场中周期性磁化, 呈现的 $B-H$ 间的闭合回线, 称为磁滞回线。在交变磁场中铁磁材料会有磁滞现象是其基本特性之一。铁磁材料的铁芯在反复磁化中, 磁畴之间在不停地摩擦, 消耗能量, 称为磁滞损耗 p_h 。

应当说明, 铁磁材料在不同磁场强度 H_m 下反复磁化时, 可得一系列同心的磁滞回线, 将其顶点连接起来得到的曲线, 称为基本磁化曲线 (又称平均磁化曲线), 如图 0-6 所示, 它不是原始磁化曲线, 但区别不大。电机铁芯磁路计算中, 所使用的都是基本磁化曲线。

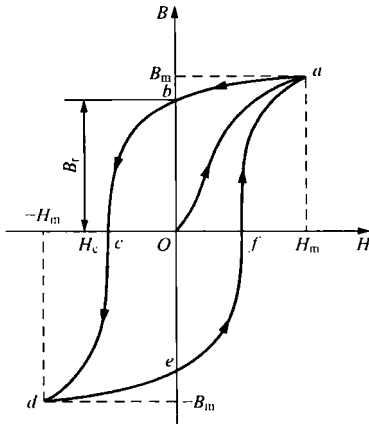


图 0-5 铁磁材料的磁滞回线

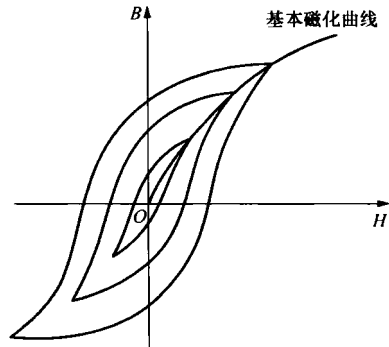


图 0-6 基本磁化曲线

铁磁物质根据磁滞回线的形状不同分类: 回线瘦窄、剩磁 B_r 小、矫顽力 H_c 小、回线面积小的一类称为软磁材料, 磁导率很高, 如电工硅钢片、铁镍合金、纯铁与铸钢等, 电机铁芯磁路都用软磁材料。磁滞回线胖宽、剩磁 B_r 大、矫顽力 H_c 大、回线面积大的一类称为硬磁材料, 如钨钢、钴钢等, 用做永久磁铁。矩形磁滞回线的材料在电子计算机存储器中作磁芯。

当铁磁材料的铁芯处在交变磁场中, 除了会产生磁滞现象之外, 还同时会产生涡流现象。因为铁芯是导电的, 当通过铁芯的磁通随时间交变时, 根据电磁感应定律, 铁芯中将感应电动势, 并在铁芯中产生许多闭合的旋涡状的环流, 称为涡流 i_w , 如图 0-7 所示。涡流在铁芯中引起的损耗, 称为涡流损耗 p_w 。

3. 铁芯损耗 p_{Fe}

铁磁材料制成的铁芯处在交变磁场中, 必然会相伴产生磁滞和涡流现象, 相应地引起磁滞和涡流损耗, 两者合称为铁芯损耗 p_{Fe} , 即 $p_{Fe} = p_h + p_w$ 。

分析表明: 磁滞损耗 p_h 的大小与磁场交变频率 f 、铁芯体积 V 、磁滞回线包围的面积

大小有关；涡流损耗 p_w 的大小与磁场交变频率、铁芯电阻率大小以及涡流路径长短等因素有关。

电机中，铁芯损耗 p_{Fe} 常用计算式为

$$p_{Fe} = P_{1/50} \left(\frac{f}{50}\right)^\beta B_m^2 G \quad (0-6)$$

式中 B_m ——磁通密度幅值，T；

f ——磁通交变频率，Hz；

G ——铁芯质量，kg；

β ——系数，通常 $\beta=1.2\sim 1.6$ ；

$P_{1/50}$ ——单位铁损耗，是指当 $f=50\text{Hz}$ 、 $B_m=1\text{T}$ 时，每千克硅钢片铁芯的损耗，W/kg。

当电机正常工作时， $1\text{T} < B_m < 1.8\text{T}$ ，则式 (0-6) 中 $\beta \approx$

1.3，即铁芯损耗与频率 f 的 1.3 次方、与磁通密度幅值 B_m 的平方及铁芯质量 G 三者乘积成正比。

4. 磁路的欧姆定律

在电机中，总是把线圈套在铁芯上。当线圈通入电流时，则线圈周围会形成磁场。由于铁芯的磁导率比空气大得多，则绝大部分磁通将通过铁芯并闭合，这部分磁通称为主磁通；另外的围绕线圈、通过部分铁芯经空气隙闭合的少量分散磁通称为漏磁通。如图 0-8 所示。

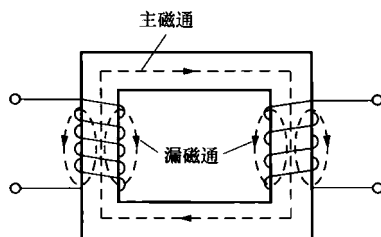


图 0-8 变压器的磁路

磁通流经的路径称为磁路。对应主磁通和漏磁通有主磁路和漏磁路。

磁路的欧姆定律表明：对任一段材料、截面积均相同的磁路，作用在该段磁路上的磁动势 F 等于磁通 Φ 与磁阻 R_m 两者的乘积，即

$$\Phi = F/R_m \quad (0-7)$$

式中 F ——作用在该段磁路上的总磁动势， $F = \sum Ni$ ；

R_m ——磁阻， $R_m = l/\mu S$ ，即磁路的磁阻 R_m 与磁路长度 l 成正比，与磁路截面积 S 及磁导率 μ 两者成反比。

5. 磁路欧姆定律与电路欧姆定律的比较

磁路与电路有一定的相似性，从数学表示形式上看，可以把磁动势 F 比拟于电路中的电动势 E ，磁通量 Φ 比拟于电路中的电流，磁阻 R_m （磁导 $\Lambda = \frac{1}{R_m}$ ）可以比拟于电路中的电阻 R （电导 $G = \frac{1}{R}$ ）。这样，磁路与电路相应物理量及其定律，可以列表对比，以利理解，如表

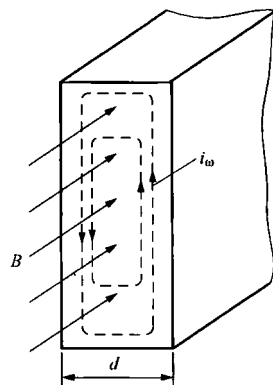


图 0-7 一片硅钢片中的涡流

0-1 所示。

表 0-1 磁路与电路的对比

电 路	磁 路	电 路	磁 路
电流 $I(A)$	磁通 $\Phi(Wb)$	电压降 $IR(V)$	磁压降 $\Phi R_m(A)$
电流密度 $J(A/m^2)$	磁通密度 $B(1T=1Wb/m^2)$	基尔霍夫第一定律 $\sum U = \sum E$	全电流定律 $\sum HI = \sum Ni$
电动势 $E(V)$	磁动势 $F(A)$	电路欧姆定律 $I = E/R$	磁路欧姆定律 $\Phi = F/R_m$
电阻 $R = \rho \frac{l}{S} (\Omega)$	磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S} (1/H)$		

0.4 永磁磁铁简介

能长期保持其磁性的磁体称为永磁体，又称“硬磁材料”，其一经磁化即能保持恒定的磁性，具有磁滞回线宽、高矫顽力、高剩磁和高稳定性的特性。我国最早发明的指南针就是利用天然的永磁材料制成的。

0.4.1 永磁磁铁分类

当前常用的永磁材料主要有：

(1) 钕铁硼磁铁（稀土永磁材料）。它是目前发现商品化性能最高的磁铁，被人们称为磁王，拥有极高的磁性能，其最大磁能积高过铁氧体 10 倍以上。其本身的机械加工性能也相当好，工作温度最高可达 $200^{\circ}C$ ，而且其质地坚硬、性能稳定，有很好的性价比，故其应用极其广泛。但因为其化学活性很强，容易锈蚀，所以必须对其表面进行涂层处理（如镀 Zn、Ni，电泳，钝化等）。目前钕铁硼永磁的应用，已涉及国民经济的各个领域，特别是在计算机工业、信息工业、汽车工业、核磁共振成像工业、CD-ROM、DVD 等音像工业方面有着广泛的应用前景。

(2) 铝镍钴磁铁（金属永磁材料）。它是由铝、镍、钴、铁和其他微量金属元素构成的一种合金。铸造工艺可以加工生产成不同的尺寸和形状，可加工性很好。铸造铝镍钴永磁有着最低可逆温度系数，工作温度可高达 $600^{\circ}C$ 以上。铝镍钴永磁产品广泛应用于各种仪器仪表和其他领域。

(3) 铁氧体磁铁。主要原料包括 $BaFe_{12}O_{19}$ 和 $SrFe_{12}O_{19}$ 。通过陶瓷工艺法制造而成，质地比较硬，属脆性材料，由于铁氧体磁铁有很好的耐温性、价格低廉、性能适中，已成为应用最为广泛的永磁体。铁氧体是一种具有铁磁性的金属氧化物。就电特性来说，铁氧体的电阻率比金属、合金磁性材料大得多，而且还有较高的介电性能。铁氧体的磁性能还表现在高频时具有较高的磁导率。因而，铁氧体已成为高频弱电领域用途广泛的非金属磁性材料。

(4) 钐钴（SmCo）依据成分的不同分为 $SmCo_5$ 和 Sm_2Co_{17} 。由于其材料价格昂贵而使其发展受到限制。钐钴（SmCo）作为稀土永磁铁，不但有着较高的磁能积、可靠的矫顽力和良好的温度特性。与钕铁硼磁铁相比，钐钴磁铁更适合工作在高温环境中，应用在马达、仪表、传感器、探测器、发动机、雷达及其他高科技领域。

除上述几种永磁材料外，还有其他的永磁材料，如微粉永磁材料、纳米永磁材料、塑胶永磁材料等。

0.4.2 永磁材料的发展历程

我国最早发明的指南针便是利用天然永磁材料磁铁矿制成的。

从永磁材料的发展历史来看, 19 世纪末使用的碳钢, 磁能积 (衡量永磁体储存磁能密度的物理量) 不足 1MGOe (兆高奥), 而目前国外批量生产的 Nd-Fe-B 永磁材料, 磁能积已达 50MGOe 以上。一个世纪以来, 材料的剩磁 B_r 提高甚小, 能积的提高要归功于矫顽力 H_c 的提高。而矫顽力的提高, 主要得益于对其本质的认识和高磁晶各向异性化合物的发现, 以及制备技术的进步。20 世纪初, 人们主要使用碳钢、钨钢、铬钢和钴钢作永磁材料。20 世纪 30 年代末, AlNiCo 永磁材料开发成功, 才使永磁材料的大规模应用成为可能。50 年代, 钕铁氧体的出现, 由于其具有高的矫顽力和大的磁晶各向异性, 既降低了永磁体成本, 又将永磁材料的应用范围拓宽到高频领域。到 60 年代, 稀土钴永磁的出现, 则为永磁体的应用开辟了一个新时代。1967 年, 美国 Dayton 大学的 Strnat 等, 用粉末黏结法成功地制成 SmCo₅ 永磁体, 提高了永磁体的磁特性, 标志着稀土永磁时代的到来。进入 80 年代中期, 磁性材料的研究与开发给工业发展带来了革命性变化, NdFeB 烧结永磁体, 以其优越的性能迅速取代了 Sm-Co 系列永磁体, 成为一代磁王。

迄今为止, 稀土永磁已经历第一代 SmCo₅, 第二代沉淀硬化型 Sm₂Co₁₇, 发展到第三代 Nd-Fe-B 永磁材料。此外, 在历史上被用作永磁材料的还有 Cu-Ni-Fe、Fe-Co-Mo、Fe-Co-V、MnBi、AlMnC 合金等, 这些合金由于性能不高、成本不低, 在大多数场合已很少采用, 而 AlNiCo、FeCrCo、PtCo 等合金在一些特殊场合还得到应用。目前 Ba、Sr 铁氧体仍然是用量最大的永磁材料, 但其许多应用正在逐渐被 Nd-Fe-B 类材料取代。并且, 当前稀土类永磁材料的产值已大大超过铁氧体永磁材料, 稀土永磁材料的生产已发展成一个大型的新兴产业。

直 流 电 机 原 理

直流电机是实现机械能和直流电能相互转换的设备，包括直流发电机和直流电动机，两者具有可逆性。把机械能变为直流电能的电机称为直流发电机；反之，把直流电能变为机械能的电机称为直流电动机。

直流发电机能提供直流电源，应用于各种工矿企业中，在电力系统中主要用作同步发电机的励磁机。但是，由于直流电机具有换向器，因此结构较交流电机复杂，加上近年来半导体的迅速发展，交流与直流的变换技术应用方案很多，一些必须使用直流发电机的部门也采用交直流变换技术实现供电，在某些场合，半导体整流电源已能代替直流发电机，如大容量的同步发电机已采用交流励磁系统替代了直流励磁机。

直流电动机最大的优点是具有良好的起动和调速性能，能在很宽的范围内平滑经济地调速，低速运行特别是起动时具有较大的转矩，所以在调速要求较高的场所，如电车、电力机车、轧钢机、吊车等方面应用广泛。直流电动机的主要缺点是结构复杂、生产成本较高、维护费用高，功率不能做得太大。近几十年来，随着电力电子技术、控制理论、微处理器技术等飞速发展，配合半导体调速系统的交流电动机，在某些场合也有取代直流电动机的趋势。

但是，目前直流电机仍具有使用方便可靠、波形好、对电源干扰小等优点，所以无论直流发电机和直流电动机，在许多场合中仍占有重要地位。此外，直流电机的结构和分析方法，是电机理论中的一个重要组成部分。因此，直流电机仍是电机与拖动理论中的一个重要篇章。

1.1 直流电机的工作原理与结构

1.1.1 直流电机的基本结构

直流电机由静止的定子和旋转的转子两大部分构成。通常把产生磁场的部分做成静止的，称为定子；把产生感应电动势或电磁转矩的部分做成旋转的，称为转子（又称为电枢）。直流电机结构如图 1-1 所示。

1. 定子

定子用来产生磁场和起机械支撑作用，由主磁极、换向磁极、机座、端盖和电刷装置等组成。

(1) 主磁极。主磁极的作用是产生主磁场。主磁极由主磁极铁芯和套在铁芯上的励磁绕组组成，如图 1-2 所示。主磁极铁芯分为极身和极靴两部分。极身用来套装励磁绕组。极靴的作用是支撑励磁绕组和改善气隙磁通密度的波形。为了减少涡流损耗，主磁极铁芯一般用 0.5~1.5mm 厚的硅钢片或低碳钢板冲片叠压而成，并用铆钉铆紧，然后固定在机座上。励磁绕组是用圆形截面或矩形截面的绝缘铜导线绕制而成。各主磁极的励磁绕组串联相接，但要使其通入直流励磁电流后，产生的磁场的极性沿定子内圆按 N、S 极交替排列。

(2) 换向磁极。换向磁极简称换向极，又称为附加磁极。换向极安装在相邻两个主磁极间的几何中性线上，其作用是改善直流电机的换向。换向极的几何尺寸小于主磁极。它也是由换向极铁芯和套装在铁芯上的换向极绕组构成。一般换向极的铁芯用整块钢板制成，对换向性能要求较高的电机，换向极铁芯则用1~1.5mm厚的钢片叠压而成。换向极绕组与电枢绕组串联，一般由扁铜线绕成，由于通过的电枢电流较大，因此换向极绕组导线截面较大，匝数较少。为防止磁路饱和，换向极与转子间的气隙较大，且该气隙可以调整。换向极的极数与主磁极的极数相同。

(3) 机座与端盖。机座起支撑电机并构成相邻磁极间磁的通路的作用，故又称为磁轭。机座一般用铸钢或用薄钢板焊接成圆形或多边形，如图1-3所示。机座有两种形式，一种称为整体机座，另一种称为叠片机座。整体机座用导磁效果较好的铸钢材料制成，这种机座同时起到导磁和支撑固定的作用。叠片机座的磁轭和机座是分开的，磁轭由薄钢板冲片叠压而成，机座只起到支撑固定作用，所以可用普通钢板制成。叠片机座主要用于主磁通变化快、调速范围要求大的场合。

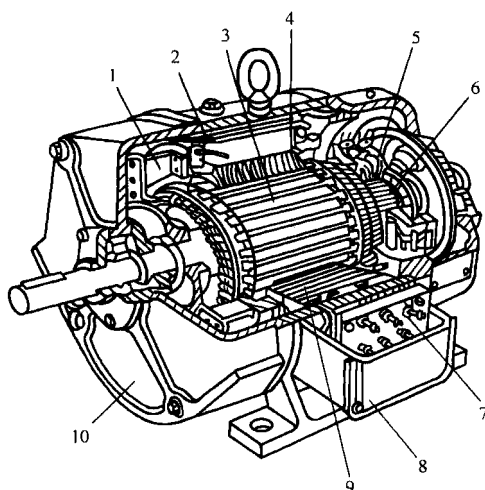


图 1-1 直流电机的结构图

1—风扇；2—机座；3—电枢；4—主磁极；5—刷架；
6—换向器；7—接线板；8—出线盒；
9—换向极；10—端盖

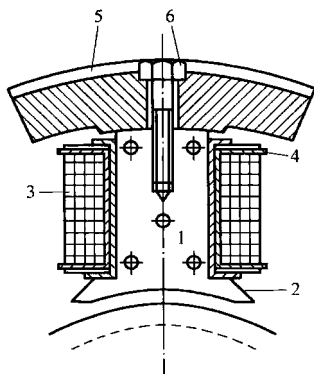


图 1-2 直流电机主磁极

1—主磁极铁芯；2—极靴；3—励磁绕组；
4—绕组绝缘；5—机座；6—螺栓

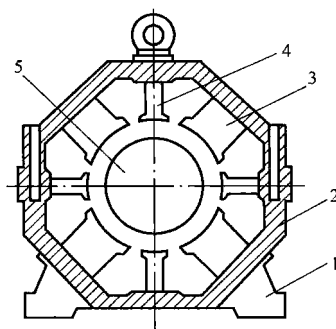


图 1-3 多边形机座示意图

1—机座；2—磁轭；3—主磁极；
4—换向极；5—电枢

机座的两端各有一个端盖，用于保护电机和防止触电。

(4) 电刷装置。直流电机通过电刷装置使电枢和外电路连通，将直流电压、电流引入或引出电枢绕组。电刷装置主要由电刷、刷握、刷杆及刷杆座等部件组成，如图1-4所示。电刷一般由石墨和铜粉压制烧焙而成，放在刷握中，用压紧弹簧压在换向器的表面上。刷握固定在刷杆上，通过钢丝辫把电刷和电刷杆相连，用以引入或导出电流。每个刷杆装有若干

个刷握和相同数目的电刷，并把这些电刷并联成为电刷组。电刷组的数目可以用刷杆数表示，刷杆数与电机的主磁极数相等。正常运行时，电刷杆相对于换向器表面有一个正确的位置，调整电刷杆的位置，就同时调整了各电刷组在换向器上的位置。

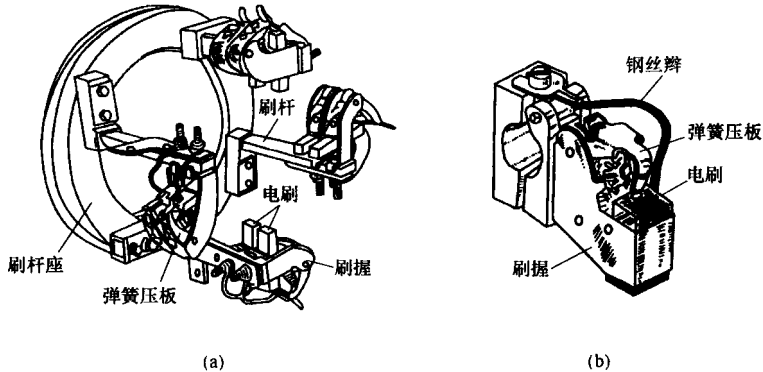


图 1-4 电刷装置

2. 转子

转子又称为电枢，其作用是在主磁场的作用下产生感应电动势和电流，并产生电磁转矩，从而实现机电能量转换。转子由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、风扇、转轴等组成。

(1) 电枢铁芯。电枢铁芯的作用是构成电机的磁路和安放电机绕组。通过电枢铁芯的磁通是交变的，为降低涡流损耗和磁滞损耗，电枢铁芯通常用 0.35mm 或 0.5mm 厚的冲有齿、槽的硅钢片叠装而成。为了加强散热能力，电枢铁芯上沿轴向开有通风孔；对于容量较大的电机，电枢铁芯沿轴向分成数段，每段长 40~100mm，段与段之间空出 8~10mm 的径向通风道。需说明的是，这些轴向通风道是由铁芯叠片上预留的通风孔叠压而形成的。

(2) 电枢绕组。电枢绕组是实现机电能量转换的关键部件，其作用是在磁场作用下，产生感应电动势和电磁转矩，从而实现机电能量的转换。通常小型直流电机的电枢绕组用圆导线制成元件，嵌放在铁芯槽内；较大容量的电机则用矩形截面的导线预先做成元件，嵌放在铁芯槽内。每个元件的引线端头按一定的规律与换向片连接。元件的槽内部分的上、下层之间及与铁芯之间垫以绝缘，并用绝缘的槽楔把元件压紧在槽中。元件的槽外部分用绝缘带或无纬玻璃丝带绑扎和固定。

(3) 换向器。换向器又称为整流子。对于直流发电机来说，它的主要作用是把电枢绕组中感应的交流电转变为电刷两端输出的直流电；对于直流电动机来说，它将电源输入的直流电转换为电枢绕组中的交流电。换向器的结构如图 1-5 所示。换向器由换向片组合而成，是直流电机的关键部件，也是最薄弱的部分。

换向片的底部做成燕尾形状。各换向片叠成圆筒形套入钢套筒上，相邻换向片间以云母片作为绝缘，换向片下部的燕尾嵌在 V 形钢环内，换向片与 V 形钢环之间用 V 形云母片绝缘，整个装置最后由螺旋压圈压紧，固定在转轴的一端。

1.1.2 直流电机的工作原理

1. 直流发电机的工作原理

直流发电机是根据导体在磁场中切割磁力线运动，从而在导体中产生感应电动势的电磁