

中等专业学校教学用书

电机学

宫淑华 编

煤炭工业出版社

内 容 简 介

“电机学”是根据煤炭工业部1981年7月大同会议通过的煤炭中等专业学校电气化专业“电机学”课程教学大纲编写的。课程教学时数为120学时（包括实验）。

全书包括直流电机、变压器、异步电机、同步电机及其他用途电机五篇。书中注意加强基本概念、基本分析方法和基本技能的培养和训练，所用各电机的技术数据和型号均是国产新系列。

本书作为煤炭中等专业学校电气化专业教材，还可供有关专业的师生、工程技术人员和工人同志作参考书。

责任编辑：胡 玉 雁

中等专业学校教学用书

电 机 学

宫淑华 编

*

煤炭工业出版社 出版

（北京安定门外和平北路16号）

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $18^{1/4}$

字数 424 千字 印数1—5,350

1984年6月第1版 1984年6月第1次印刷

书号15035·2618 定价2.00元

8

前 言

本教材是根据煤炭工业部1981年7月大同会议通过的煤炭中等专业学校电气化专业《电机学》课程教学大纲编写的。

全书共分五篇，即直流电机、变压器、异步电机、同步电机及其它用途电机，课程的教学时数为120学时（包括实验在内）。本书可供有关专业的师生、工程技术人员及工人同志参考。

《电机学》是一门专业基础课，理论性和实践性都比较强。为了使學生牢固地掌握本专业所必须的基本理论和基本技能，书中注意加强基本概念、基本分析方法和基本技能的培养和训练。书中所用各电机的技术数据和型号均是国产新系列。

本书在内容叙述上，力求通俗易懂，由浅入深地阐明问题。对于一些理论性较强的内容（如变压器、异步机的运行状态分析，异步电机的特性分析等），注意数学分析与物理概念相结合。此外，为了便于读者深入学习，还适当地编入一些选读的内容（如异步电机的圆图等），在书中用小字体排版。读者可根据需要取舍。

考虑到中专的特点，应加强实践性教学环节，使所学的理论更好地指导实践。书中的电机绕组、电机的运行特性和起动、调速、反转等内容，都必须通过电机实习建立感性认识，并通过电机的教学实验验证理论。

为了启发学生对所学的内容进行独立思考、加深理解、掌握重点，在各章之后列有小结、思考题和习题。

在编写过程中，得到各级领导的关心，兄弟学校有关老师和北京电机总厂汪春保同志提出不少宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编写水平有限，书中内容欠妥和错误之处可能不少，欢迎读者批评指正。

编 者

1982年11月

主要符号表

a ——直流电机电枢绕组的支路对数;
 B ——磁感应强度 (磁通密度);
 B_σ ——气隙磁感应强度 (气隙磁密);
 B_m ——磁密最大值;
 C ——电容;
 C_e, C_M ——电势常数、转矩常数;
 E, E_m ——电势 (交流为有效值)、电势最大值;
 E_0, E_a ——主电势 (空载电势)、电枢电势;
 E_1, E_2 ——原、副方 (或定、转子) 电势;
 $E_{\sigma 1}, E_{\sigma 2}$ ——原、副方 (或定、转子) 漏磁电势;
 E'_2 —— E_2 的折算电势;
 E_{ad} ——直轴电枢反应电势;
 E_{aq} ——交轴电枢反应电势;
 e ——电势的瞬时值;
 F_f ——激磁磁势;
 F_a ——电枢磁势;
 F_{ad} ——直轴电枢磁势;
 F_{aq} ——交轴电枢磁势;
 F_1, F_2 ——原、副方 (或定、转子) 磁势;
 F_σ ——气隙磁势;
 f ——频率、力、磁势瞬时值;
 f_1, f_2 ——定、转子频率;
 f_N ——额定频率;
 I ——电流 (交流为有效值), 负载电流;
 I_0 ——空载电流;
 I_1, I_2 ——原、副方 (或定、转子) 电流;
 I'_2 —— I_2 的折算电流;
 I_a ——电枢电流;
 I_f ——激磁电流 (直流机、同步机等);
 I_k ——短路电流或堵转电流;
 I_m ——变压器或异步电机的激磁电流;
 I_N ——额定电流;
 I_{St} ——起动电流;
 i ——电流的瞬时值;
 K ——系数、变压器的变比、换向片数;
 k_e ——异步电机定、转子的电势比;
 k_f ——异步电机定、转子的电流比;
 k_d ——绕组的分布系数;

k_p ——绕组的短距系数、放大系数;
 k_{W1}, k_{W2} ——定、转子绕组系数;
 $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ ——原、副方 (或定、转子) 的漏电感;
 l ——长度、导体有效长度;
 M ——转矩、电磁转矩;
 M_N ——额定转矩;
 M_{max} ——最大转矩;
 M_{st} ——起动转矩;
 M_0 ——空载转矩;
 M_1, M_2 ——输入、输出转矩;
 M_L, M_{r2} ——负载转矩;
 M_k ——堵转转矩;
 M_j ——机械转矩;
 m ——相数;
 W ——匝数;
 W_1, W_2 ——原、副方 (或定、转子) 绕组的匝数;
 W_f ——激磁绕组匝数;
 W_a ——电枢绕组支路匝数、元件匝数;
 N ——导体根数;
 n ——转速;
 n_1, n_n ——同步转速;
 n_N ——额定转速;
 n_0 ——空载转速;
 P ——功率 (交流为有功功率)、极对数;
 P_N ——额定功率;
 P_M ——电磁功率;
 P_2' ——产生的机械功率;
 P_1, P_2 ——输入、输出功率;
 p_0 ——空载功率;
 P_{cu1}, P_{cu2} ——原、副方 (或定、转子) 铜损耗;
 P_{Fe} ——铁损耗;
 p_σ ——杂散损耗;
 Q ——无功功率、热量;
 q ——每极每相槽数;
 R ——电阻、绝缘电阻、电位器;
 R_a, r_a ——电枢电阻、电枢绕组电阻;
 R_f, r_f ——激磁电阻、激磁绕组电阻;
 R_p ——调节电阻;

R_{St} ——起动电阻;
 R_m ——磁阻;
 R_L, R_{fz} ——负载电阻;
 r ——电阻、绕组的内电阻;
 r_1, r_2 ——原、副方(或定、转子)电阻;
 r_2' ——为 r_2 的折算电阻;
 r_s ——串激绕组电阻;
 r_m ——激磁电阻;
 s ——转差率、视在功率、截面积;
 s_N ——额定转差率;
 s_m ——临界转差率;
 T ——周期、时间常数;
 T_k ——换向周期;
 t ——时间;
 U ——电压(交流为有效值);
 U_N ——额定电压;
 U_1, U_2 ——原、副方(或定、转子)电压;
 U_k ——短路电压;
 U_f ——激磁电压;
 u ——电压的瞬时值;
 x ——电抗;
 x_a ——电枢反应电抗;
 $x_{\sigma 1}, x_{\sigma 2}$ ——原、副方(或定、转子)漏电抗;
 x_{ad} ——直轴电枢反应电抗;
 x_{aq} ——交轴电枢反应电抗;
 x_d ——直轴同步电抗;
 x_q ——交轴同步电抗;
 x_s ——同步电抗;
 x_m ——激磁电抗;
 x_k ——短路电抗;
 x_c ——容抗;
 $X'_{\sigma 2}$ ——副方或转子漏电抗的折算值;
 y ——绕组节距、合成节距;
 y_1, y_2 ——第一、二节距;
 y_k ——换向节距;
 Z ——槽数、复阻抗;
 Z_m ——激磁阻抗(复数);

$Z_{\sigma 1}, Z_{\sigma 2}$ ——原、副方(或定、转子)漏阻抗(复数);
 $z'_{\sigma 2}$ ——副方或转子漏阻抗的折算值(复数);
 Z_k ——短路阻抗;
 Z_L ——负载阻抗;
 α ——角度、槽距角、系数;
 β ——角度、系数;
 γ ——电导率;
 δ ——气隙长度;
 η ——效率;
 η_N ——额定效率;
 η_{max} ——最大效率;
 θ ——角度、温度、功率角、失调角;
 λ ——系数、过载能力;
 μ ——导磁率;
 τ ——极距;
 Φ ——磁通、每极磁通、合成磁通;
 Φ_0 ——空载磁通、直流电机(同步电机)的主磁通;
 Φ_m ——主磁通的最大值;
 Φ_a ——电枢磁通;
 $\Phi_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2}$ ——原、副方(或定、转子)漏磁通;
 Φ_{ad}, Φ_{aq} ——直轴、交轴电枢反应磁通;
 Φ ——磁通瞬时值;
 φ ——相位角、功率因数角;
 φ_1, φ_2 ——原、副方(或定、转子)功率因数角;
 φ_0 ——空载功率因数角;
 φ_k ——短路功率因数角;
 ψ ——磁链、相位角;
 ψ_2 ——副方或转子功率因数角;
 ψ_0 —— e 与 i 的相位角;
 ω_j ——机械角速度;
 ω_1 ——同步角速度;
 ω ——电角速度(角频率)。

目 录

主要符号表

绪论	1
----------	---

第一篇 直流电机

第一章 直流电机的基本原理与基本结构	3
第一节 直流电机的工作原理	3
第二节 直流电机的基本结构与分类	6
第三节 直流电机的铭牌数据与国产直流电机简介	9
小结	11
思考题	13
第二章 直流电机的电枢绕组	14
第一节 电枢绕组的构成	14
第二节 单叠绕组	15
第三节 单波绕组	18
第四节 电枢绕组的电磁转矩与感应电势	19
小结	21
思考题	22
习题	23
第三章 直流电机的电枢反应与换向	24
第一节 电枢反应	24
第二节 换向	26
小结	29
思考题	29
第四章 直流发电机	31
第一节 直流发电机的能量守恒关系	31
小结	32
第二节 他激直流发电机	33
第三节 并激直流发电机	36
小结	42
思考题	42
习题	42
第五章 直流电动机	44
第一节 直流电动机的能量守恒关系与稳定运行条件	44
小结	48
第二节 他激直流电动机	49
第三节 串激直流电动机	52

小结	56
第四节 直流电动机的起动、调速与反转	56
小结	64
思考题	65
习题	66

第二篇 变 压 器

第六章 变压器的用途、分类与基本结构	67
第一节 变压器的用途与分类	67
第二节 变压器的基本结构	69
第三节 变压器的铭牌数据与国产变压器简介	73
小结	75
思考题	75
习题	75
第七章 变压器的基本原理	76
第一节 变压器的工作原理	76
第二节 变压器的主磁通	77
第三节 各物理量正方向的规定	80
小结	81
思考题	81
习题	81
第八章 变压器运行状态的分析	82
第一节 变压器的空载运行	82
小结	85
第二节 变压器的有载运行	86
小结	94
第三节 变压器的短路试验	96
小结	100
思考题	100
习题	101
第九章 变压器的工作特性	103
第一节 外特性	103
第二节 效率特性	105
第三节 变压器的温升与过负载	107
小结	108
思考题	108
习题	108
第十章 三相变压器	109
第一节 三相变压器的磁路系统	109
第二节 三相变压器的联接组别	110
小结	117
第三节 三相变压器运行状态的分析	118

第四节	变压器的并联运行	121
小结	.....	124
思考题	.....	124
习题	.....	125
附录	三相变压器极性组别的测定	126
第十一章	特种变压器	130
第一节	矿用变压器	130
第二节	互感器	132
第三节	自耦变压器	135
第四节	整流变压器	139
第五节	脉冲变压器	139
第六节	电焊变压器	141
第七节	三绕组变压器	142
小结	.....	143
思考题	.....	143
习题	.....	143

第三篇 异步电机

第十二章	异步电机的用途、分类与基本结构	145
第一节	异步电机的用途与分类	145
第二节	异步电动机的基本结构	146
第三节	异步电动机的铭牌数据与国产中、小型异步电动机简介	148
小结	.....	152
思考题	.....	152
附录	异步电动机定子绕组首、末端的测定	152
第十三章	异步电动机的基本原理	154
第一节	旋转磁场	154
第二节	异步电动机的工作原理	157
第三节	转差率	157
小结	.....	158
思考题	.....	159
习题	.....	159
第十四章	三相交流绕组	160
第一节	三相交流绕组的基本原理	160
第二节	常见的几种绕组型式	162
小结	.....	171
第三节	绕组的磁势	171
第四节	绕组的电势	175
小结	.....	178
思考题	.....	179
习题	.....	179
第十五章	异步电动机运行状态的分析	180

第一节	异步电动机的空载运行	180
第二节	异步电动机的有载运行	185
第三节	异步电动机的短路试验	192
小结		193
思考题		194
习题		195
第十六章	异步电动机的功率、转矩平衡关系	196
第一节	功率平衡关系	196
第二节	转矩平衡关系	197
小结		199
思考题		200
习题		200
第十七章	异步电动机的 $M-s$ 曲线与机械特性曲线	201
第一节	$M-s$ 曲线	201
第二节	异步电动机的转矩实用公式	205
第三节	机械特性曲线	208
小结		209
思考题		210
习题		210
第十八章	异步电动机的工作特性与圆图	211
第一节	工作特性	211
第二节	圆图	212
小结		216
思考题		217
习题		217
第十九章	异步电动机的起动、调速与反转	218
第一节	鼠笼式异步电动机的起动	218
第二节	特殊鼠笼式异步电动机的起动	224
第三节	绕线式异步电动机的起动	226
小结		228
第四节	异步电动机的调速	230
小结		233
第五节	异步电动机的反转	234
思考题		234
习题		234

第四篇 同步电机

第二十章	同步电机的基本结构原理	236
第一节	同步电机的基本结构	236
第二节	同步电机的基本原理	238
小结		244
思考题		245

习题	245
第二十一章 同步电动机的运行特性与起动	247
第一节 同步电动机的电路分析	247
第二节 功角特性与机械特性	250
第三节 同步电动机的功率因数与U形曲线	252
第四节 同步电动机的工作特性与起动方法	255
第五节 同步电机的铭牌数据与国产同步电动机简介	256
小结	258
思考题	259
习题	259

第五篇 其它用途的电机

第二十二章 单相异步电动机	261
第一节 单相异步电动机的工作原理	261
第二节 单相异步电动机的主要类型与起动方法	263
小结	267
思考题	267
习题	267
第二十三章 控制电机	268
第一节 交磁放大机	268
第二节 自整角机	271
第三节 测速发电机	274
小结	278
思考题	279
习题	279
参考文献	279

绪 论

一、电机的主要类型

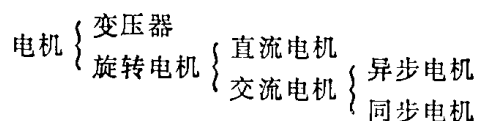
电机是进行能量转换和讯号变换的电磁机构。它的分类方法很多，一般来讲，可分为变压器和旋转电机两大类。它们的功能各不相同。

变压器是静止的电气设备，用来将一种电压的交流电能转变为另一种电压的交流电能。

旋转电机有机械旋转部分，可作为发电机或电动机两种运行方式，它们本身是可逆的。发电机将机械能转换为电能，电动机将电能转换为机械能。按照电流的不同，旋转电机又可分为交流电机、直流电机。交流电机又可分为异步电机和同步电机。

各种控制电机的功能与一般电机有所不同，它们在自动控制系统中作为检测、放大和执行元件。若按电流分类，也可归入以上各类中。

以上分类可归纳如下：



二、电机在国民经济中的作用及发展概况

目前，电能是我国国民经济各部门中动力的主要来源。电能的产生、变换、传输、分配、使用和控制等，都必须利用电机来完成。在电力工业中，发电机和变压器是发电厂和变电所中的主要设备；在工业企业中，电动机是各种生产机械的拖动机械；在自动控制系统中，还利用各种各样的微型控制电机作为检测、放大和执行元件。

建国三十年来，我国基本上建立了自己的电机工业体系，有了统一的国家标准和统一的电机、变压器系列。能够制造成套的大、中型火力发电和水力发电设备及各种类型的电机，基本上能够满足国民经济各部门的需要，而且有些产品已达到国际先进水平。新系列与旧系列相比，具有效率高、重量轻、体积小等特点。单机容量不断提高，1965年以来，我国已相继制成了125和300兆瓦双水内冷汽轮发电机；目前，正在设计的600兆瓦双水内冷汽轮发电机也即将投入生产。

水轮发电机和电力变压器的发展也很迅速。目前，我国制造的双水内冷水轮发电机，容量为300兆瓦；大型电力变压器的容量为360兆伏安，电压为330千伏。在直流电机方面，目前已能生产可控硅整流器供电直流电动机。直流电机的容量一般为12000~14000千瓦，电压在1000伏左右。

随着四个现代化的发展，生产自动化的程度不断提高，各种类型的控制电机^①也在迅速发展。这类电机的型式很多，如交磁放大机、自整角机、测速发电机等。它们的发展方向是进一步提高精确度，以满足各种不同要求。

^① 微型控制电机的容量只有几瓦或几十瓦，体积只有十几毫米；在结构方面已出现印刷电路电机和电子电机，作控制元件用。

国外一些工业发达的国家，电机工业的发展较为迅速。目前美国已生产出单机容量为1140兆瓦的两极汽轮发电机和700兆瓦的水轮发电机；苏联已生产出1200兆瓦的两极汽轮发电机和640兆瓦的水轮发电机；日本、英国、法国、瑞典和西德等也能生产500~1000兆瓦的两极汽轮发电机。有些国家正在试制和生产1000~1500兆瓦四极汽轮发电机。

三、课程的性质、目的要求与学习方法

本课程是煤炭电气化专业的一门专业基础课，要求在学完《高等数学》和《电工原理》课程之后进行。

本课程主要研究电机的基本理论问题，在学完之后应达到要求：

1. 基础理论方面 能够运用电磁原理，矢量图、符号法、等值电路、富氏级数等来分析电机的工作原理和运行性能。

2. 实际技能方面 学会正确使用各种常用变压器和交直流电机，掌握其接线方法和操作方法，并学会运用电机理论分析和处理生产实际问题，学会电机实验的方法，通过现场实习熟悉电机的维护和检修。

3. 掌握各种常用电机的电路计算。

本课程是今后学习《电力拖动》和《矿山供电》等课程的基础。在学习本课程时，读者可根据自己的情况采用不同的方法。但对初学者来讲，建议在学习中注意以下几点：

1. 学习电机结构应结合实物弄清各主要部件的组成和作用。

2. 学习基本原理应以弄清电磁关系为主，注意各种电机的共同点与不同点，运用总结对比的方法，加深理解。

3. 注意数学分析与物理概念的结合，对于数学公式的推导，要弄清前因后果，不要死记硬背。

4. 注意理论结合实际，在实验、实习中应多动脑动手。

第一篇 直流电机

通常所指的直流电机是带有换向器的电机。在它内部的感应电势是交变的，通过换向器的作用把交流变为直流。

直流电机包括直流电动机和直流发电机。直流电动机与交流电动机相比，它具有优良的起动特性和调速特性。因而，对于起动和调速性能要求较高的生产机械，如轧钢机、矿井卷扬机、电力机车、大型电铲、大型车床等，多采用直流电动机拖动。虽然直流电机具有制造工艺复杂、成本高、电刷和换向器之间易产生火花、维护困难等缺点，但由于它的优点突出，所以仍得到广泛应用。

直流发电机可作为直流电动机和同步电机励磁机的直流电源，还可作为电解、电镀、充电等设备的直流电源。近年来，随着电子技术的迅速发展，二极管整流设备以及可控硅整流设备的大量使用，它们有可能代替直流发电机。二者相比，用直流发电机作电源供电的质量和可靠性都较高，因此，直流发电机仍在某些场合中采用。

第一章 直流电机的基本原理与基本结构

第一节 直流电机的工作原理

一、直流发电机的工作原理

图1-1 a 为交流发电机的工作原理图，图1-1 b 为直流发电机的工作原理图。它们的共同之处是：都有一对固定的磁极，和一个可以转动的线圈abcd（称为电枢）。当原动机拖动线圈以一定的速度在磁场中逆时针方向旋转时，根据电磁感应原理，线圈中将有感应电势产生，其方向用右手定则确定。在图中所示的位置，线圈的ab边处于N极面下，产生的感应电势方向从b指向a；线圈的cd边处于S极面下，产生的感应电势方向从d指向c。从整个线圈来看，电势的方向从 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ；反之，当ab边转到S极面下，cd边转到N极面下时，每个边的感应电势方向都要随之改变，于是，整个线圈的感应电势方向应从 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。如果线圈转一转，线圈中的感应电势就变化一周。假设电枢圆周的磁感应强度B按正弦规律分布，线圈中的感应电势也按正弦规律变化，图1-2为感应电势的波形图。

由此可见，直流发电机在线圈内部和交流发电机一样，产生的感应电势是交变的。即线圈ad两端的极性是交变的。

在图1-1中直流发电机与交流发电机的不同之处是：交流发电机的轴上装置两个彼此绝缘的滑环，线圈的a、d两个出线端分别接在两个滑环上。当电枢旋转时，依靠滑环与固定不动的电刷（如图中A和B）之间滑动接触，将线圈与外电路的负载接通。由于a、

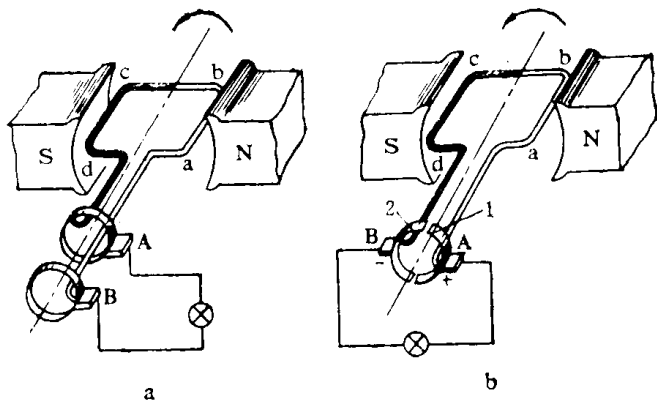


图 1-1 发电机的工作原理
a—交流发电机；b—直流发电机

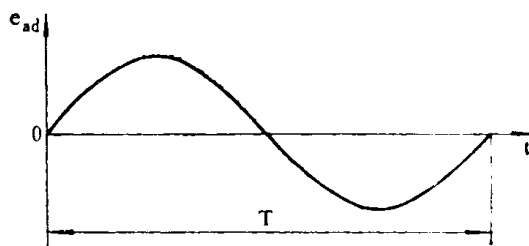


图 1-2 线圈中感应电势的波形图

d 两端的极性是交变的，因此，电刷 A、B 之间的电压也是交变的（波形见图1-2）。直流发电机的轴上装有一个换向器，最简单的换向器由两个彼此绝缘的半圆形换向片组成，线圈的 a、d 两个出线端分别接到1、2两个换向片上。在如图1-1 b 所示的位置时，电刷 A 与换向片 1 接触，也就是和经过 N 极面下的导线 ab 相连接；电刷 B 与换向片 2 接触，也就是和经过 S 极面下的导线 cd 相连接。这时感应电势的方向从电刷 B $\rightarrow$ 2 $\rightarrow$ d $\rightarrow$ c $\rightarrow$ b $\rightarrow$ a $\rightarrow$ 1 $\rightarrow$ 电刷 A，则电刷 A 的极性为正，电刷 B 的极性为负。当电枢转过一定的角度之后，导线 ab 转到 S 极面下，导线 cd 转到 N 极面下，换向片 1、2 也随之交换位置。这时，电刷 A 与换向片 2 接触，即与经过 N 极面下的导线 cd 相连，电刷 B 与换向片 1 接触，即与经过 S 极面下的导线 ab 相连。这时感应电势的方向从电刷 B $\rightarrow$ 1 $\rightarrow$ a $\rightarrow$ b $\rightarrow$ c $\rightarrow$ d $\rightarrow$ 2 $\rightarrow$ 电刷 A。可见，电刷 A、B 的极性仍未改变。

综上所述，尽管在直流发电机线圈内部的感应电势是交变的，但是由于换向器的作用，使得电刷 A 始终与经过 N 极面下的导线相连，电刷 B 始终和经过 S 极面下的导线相连接；因此，电刷 A、B 端的电势是直流电势（方向不变），此即换向器把交流电变为直流电的原理。若线圈中的感应电势为正弦波，电刷两端的电势，如图1-3所示。设线圈旋转的电角速度为 ω ，当 $0 < \omega t < \pi$ 时，线圈中的感应电势为正、电刷两端的感应电势也为正；当 $\pi < \omega t < 2\pi$ 时，线圈中的感应电势为负，电刷两端的感应电势仍为正。由于电枢表面各点磁感应强度的分布不均匀，故感应电势的大小不同，这种仅大小改变而方向不变的电势、称为脉动直流电势。

如果在电枢上装有在空间相隔 90° 的四个线圈，这些线圈的出线端接到四个换向片上，以构成一个闭合回路，电刷两端的电势为两个线圈电势之和，其波形如图1-4中实线所示。此时所得电势虽然仍是脉动的，但与图1-3相比电势脉动程度已大为减低。

依此类推，如果将线圈数与换向片数再增加一倍，则电刷之间电势的脉动程度就更小。在实际电机中，线圈数和换向片数都很多，这些线圈与换向片之间按一定的规律连接，便可得到符合实际要求的恒定直流电势。

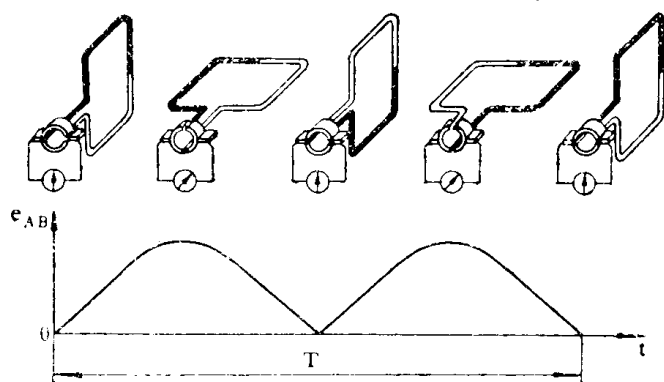


图 1-3 一个线圈的脉动直流电势

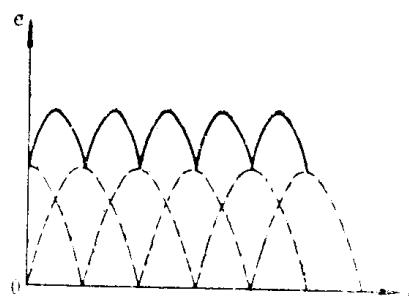


图 1-4 四个线圈时的脉动直流电势

二、直流电动机的工作原理

图1-5为简单的直流电动机,它的结构与直流发电机相同。根据直流电机的可逆性,将电刷A接到电源的正极,电刷B接到电源的负极,如图中a所示的位置,电流便从电源的正极流出,经过电刷A与换向片A'而流入电动机线圈,电流方向为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$,然后再经过换向片B'与电刷B流回电源的负极。根据电磁力定律,导线ab与cd在磁场中受到电磁力的作用,其方向可用左手定则确定,如图中所示。这两个电磁力形成的电磁转矩,使电动机逆时针方向旋转。

当导线ab转到S极面下,导线cd转到N极面下时,流经导线的电流方向必须改变,这

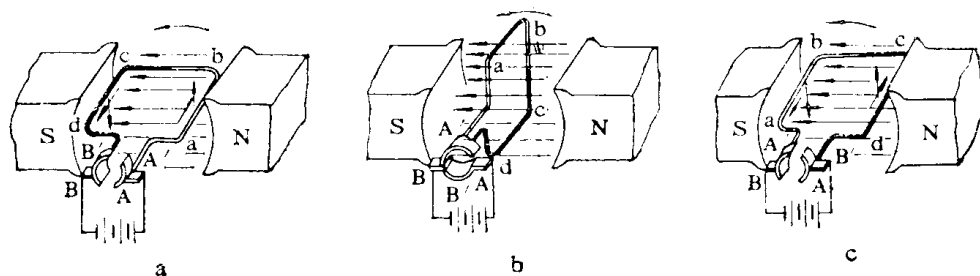


图 1-5 直流电动机的工作原理

样导线所受的电磁力方向才能不变,从而保持电动机沿着一个固定的方向旋转。

如何才能使导线中的电流方向改变呢?这个任务将由换向器来完成。从图中c可以看出,原来电刷A通过换向片A'与经过N极面下的导线ab相连,现在电刷A通过换向片B'与经过N极面下的导线cd相连;原来电刷B通过换向片B'与经过S极面下的导线cd相连,现在电刷B通过换向片A'与经过S极面下的导线ab相连。线圈中的电流方向改为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$,用左手定则判断电磁力和电磁转矩的方向与图1-5a相同,线圈仍逆时针方向旋转。

综上所述可知,不论是直流发电机还是直流电动机,换向器可以使正电刷A始终与经过N极面下的导线相连,负电刷B始终与经过S极面下的导线相连,故电刷之间的电压是直流电,而线圈内部的电流则是交变的。所以换向器是直流电机中的关键部件。

第二节 直流电机的基本结构与分类

一、基本结构

直流电机的结构型式是多种多样的，图1-6为国产Z₂系列直流电机的剖面图。由图可见，直流电机的所有部件可以分为固定的和转动的两大部分。固定不动部分称为定子；转动部分称为转子。定子与转子之间因有相对运动，固留有一定的空气隙，一般小型电机的气隙为0.7~5毫米，大型电机为5~10毫米左右。

下面介绍定、转子中各主要部件的构造和作用。

(一) 定子

定子由主磁极、换向磁极、机座、电刷架等组成。

1. 主磁极 主磁极的作用是产生主磁场。它由主磁极铁芯和激磁绕组两部分组成，主磁极铁芯一般用0.5~1.5毫米厚的低碳钢板冲片叠压而成，小电机也有采用整块铸钢磁极。图1-7是主磁极的形状，铁芯下部做成弧形，称为极掌，极掌的形状可以保证气隙中的磁感应强度按照一定规律分布。激磁绕组用绝缘铜线绕成，经过浸渍处理，然后套在磁极铁芯上；对于容量较大的电机，须先将激磁绕组绕在绝缘材料制成的框架上，然后连框架一同套在磁极铁芯上。

一般所指的激磁绕组是各主磁极上激磁绕组串联之后的总称。当激磁电流的大小和方向改变时，气隙中主磁通的大小和方向也随之改变。

2. 换向磁极 换向磁极为位于两个主磁极之间的小磁极，其作用是改善换向。换向极也是由铁芯和套在铁芯上的绕组组成（见图1-8）。换向极铁芯用整块钢或厚钢板制成，

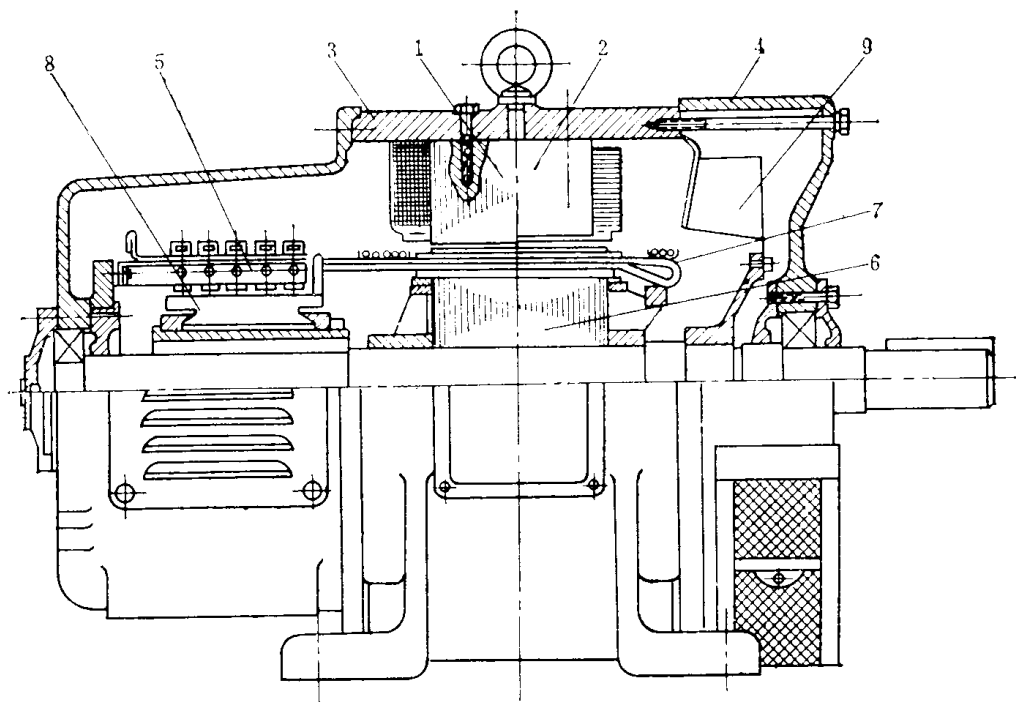


图 1-6 国产Z₂型直流电机的剖面图

1—主磁极；2—换向极；3—机座；4—端盖；5—电刷装置；6—电枢铁芯；7—电枢绕组；
8—换向器；9—风扇

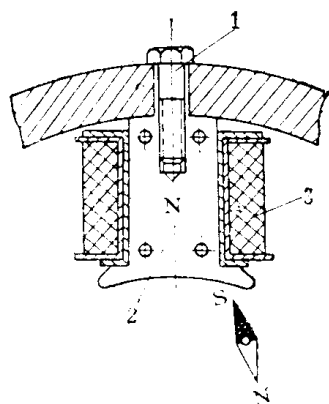


图 1-7 主磁极

1—固定主磁极的螺丝；2—主磁极铁芯；3—励磁绕组

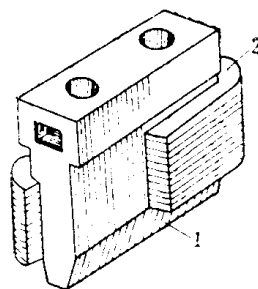


图 1-8 换向磁极

1—铁芯；2—换向绕组

容量较大的电机也用薄钢片叠成。换向极绕组与电枢绕组串联。

3. 机座 机座一方面用来固定主磁极、换向磁极和端盖等，另一方面作为电机磁路的一部分。其导磁部分称为磁轭，磁轭下部的支撑部分称为底脚，以便与基础固定。机座两端各有一个端盖，端盖上装有轴承，为端盖式轴承，用来支持转子。如果端盖的直径超过1米时，采用座式轴承。端盖式轴承均采用滚珠或滚柱轴承；座式轴承一般采用滑动轴承，有时也采用滚动轴承。

4. 电刷装置 电刷装置是把直流电压，直流电流引入或引出电枢绕组的装置。

电刷装置由刷杆座、刷杆、刷握、电刷及弹簧等组成。电刷主要是用石墨等做成的导电块，放在刷握中的刷盒内，用弹簧将它压紧在换向器上。刷握用螺钉夹紧在刷杆上，电刷和刷握之间用铜丝编成的软线相连接，刷杆装在刷杆座上，它们彼此绝缘。小容量的刷杆座固定在端盖上，大容量的则固定在机座上（见图1-9）。

此外，当电流较大时，在每一刷握上常装有一排并列的电刷，成为一电刷组。电刷组的数目一般等于主磁极的数目，各电刷组在换向器上是对称放置的。

（二）转子

转子由电枢铁芯、电枢绕组、换向器和转轴等组成。

1. 电枢铁芯 电枢铁芯的作用一方面安放电枢绕组，另一方面是磁路的一部分。它由0.5毫米厚的硅钢片叠压而成。钢片沿着轴向叠装以减少磁滞和涡流损失，提高电机效率。在大容量的电机中，钢片沿轴向分成几段，段间留有通风沟，以加强电机的冷却。

直流电机的电枢铁芯常采用开口槽，小容量的电机也有用梯形槽。

2. 电枢绕组 电枢绕组的作用是产生感应电势和电磁转矩，从而实现功率转换。因此，它是电机的重要部分。电枢绕组由许多线圈组成，这些线圈用绝缘铜线绕成，经过成型、绝缘、浸渍等处理，然后依次嵌放在槽内。线圈与铁芯之间还有槽绝缘，槽口可用非磁性槽楔封闭。伸出槽外的端接部分用玻璃丝带或钢丝扎紧。

3. 换向器 换向器是直流电机的关键部件，它将发电机电枢绕组中的交流电变成直流电，送至外电路；或将外电路的直流电变成交流电送入电动机的电枢绕组中。换向器的型式很多，它与电机的容量与转速有关。常用的换向器如图1-10所示。它是由许多燕尾形的铜片（即换向片）组装而成，片间用0.6~1毫米厚的云母片绝缘，形如圆筒。两端用两