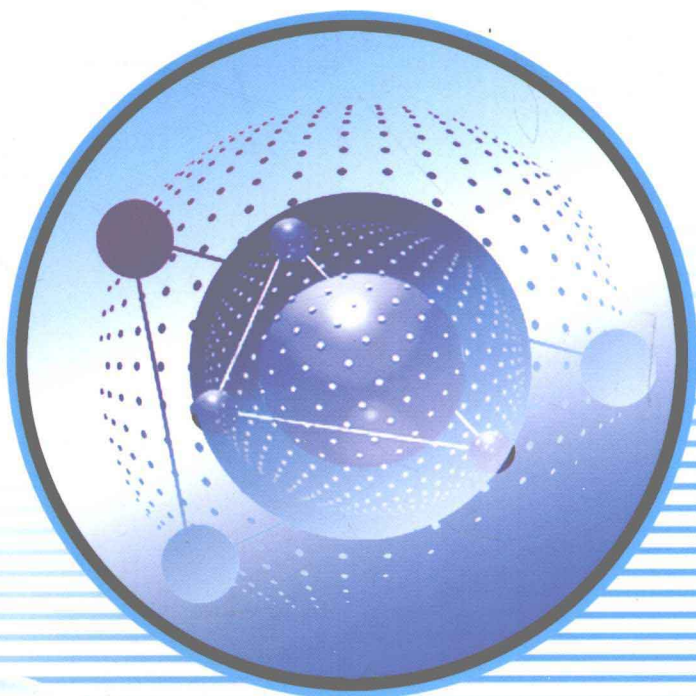


职业教育机电类规划教材

# 电机及拖动基础

胡幸鸣 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

职业教育机电类规划教材

# 电机及拖动基础

主编 胡幸鸣

参编 陈佳新 赵双全 何巨兰

主审 徐 虎



机械工业出版社

本书中主要叙述直流电机、变压器、三相异步电动机（专指感应电动机，下同）工作原理和结构特点及其电磁关系和能量关系，着重分析他励直流电动机和三相异步电动机的机械特性以及它们起动、调速和制动的原理及相关计算；简要分析单相异步电动机、同步电动机和控制电机的特点、工作原理及运行特性；简要介绍电动机容量选择的基本知识和方法；对交直流串励电动机、锥型电动机、直线电动机、微型同步电动机等实用或新颖的电动机也有所介绍。为便于复习提高，有关节末有小结、章末附有思考题与习题。

书中，注重职业应用型特色，减少繁琐的数学推导，增强物理概念清晰的图解分析，简化一些复杂的计算，多举一些结合生产实际和应用的例题，力求深入浅出，通俗易懂；同时又注意扩大知识面，介绍一些实用和新颖的电机等。

本书适用于职业院校工业企业电气自动化专业，也适用于机电一体化、数控技术应用等电类专业学生。本书也可作为职工大学和高职学校的教材。

本书的图形符号、文字符号、量和单位及相关电机标准均采用国家最新标准。

## 图书在版编目（CIP）数据

电机及拖动基础 / 胡幸鸣主编. —北京：机械工业出版社，2000.10（2008.6重印）  
职业教育机电类规划教材  
ISBN 978-7-111-07132-7

I. 电... II. 胡... III. ①电机-专业学校-教材 ②电力传动-专业学校-教材 IV. TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2000）第 71028 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：高倩 贡克勤 版式设计：霍永明

责任校对：孙志筠 责任印制：杨曦

三河市宏达印刷有限公司印刷

2008 年 6 月第 1 版第 12 次印刷

184mm×260mm·17 印张·410 千字

45001-48000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-07132-7

定价：22.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379182

封面无防伪标均为盗版

## 前 言

本书是机电类“九五”规划教材，是根据新制定的中等专业学校《电机及拖动基础》课程教学大纲编写的。其内容有直流电机、直流电机的电力拖动、变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、其它用途的电动机、控制电机、电动机容量的选择等八章。每章附有思考题与习题，便于复习提高和加深理解。

本教材是一门技术基础课，适用于工业企业电气自动化专业，同时也适用于机电一体化、数控技术应用等电类专业。本教材内容是《电机原理》与《电力拖动基础》两本教材内容的有机结合，是在学习《电工基础》等课程的基础上进行授课，并为《工厂电气控制设备》、《调速系统》和《工厂供电》等后继课程打好基础。通过本课程的学习，能掌握一般直流电机、变压器、三相异步电动机的工作原理和结构特点及其电磁关系和能量关系，掌握他励直流电动机和三相异步电动机的起动、调速和制动的工作原理及相关计算。并对单相异步电动机、同步电动机和控制电机的特点、工作原理及运行特性等也有所了解。同时可初步具备选择、使用和维护电机的基础能力。

本书的特点是：注重应用，利用图解分析，减少了繁琐的数学推导，简化了一些复杂的计算，多举了一些结合生产实际和应用的例题，力求深入浅出，通俗易懂；同时又注意扩大知识面，介绍了一些实用和新型的电机等。

本书由胡幸鸣任主编并编写绪论及第四、五章，陈佳新编写第三、六章、附录，赵双全编写第七、八章，何巨兰编写第一、二章。

本书由徐虎高级讲师主审。参加审稿的有管运生、李林、郭环球、许孔扬等老师。编者对他们提出的宝贵意见和建议、对他们的辛勤劳动和热情帮助表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

## 主要符号表

$A$ ——表面传热系数 (散热系数)	$f_N$ ——额定频率
$a$ ——直流电机电枢绕组并联支路对数; 交流电机绕组并联支路数	$H$ ——磁场强度; 扬程
$B$ ——磁通密度 (磁密)	$h$ ——高度
$B_{av}$ ——平均磁通密度	$I$ ——电流 (交流为有效值)
$B_m$ ——磁通密度最大值	$I_a$ ——直流电机电枢电流
$B_\delta$ ——气隙磁通密度	$I_C$ ——控制电流
$b$ ——宽度; 弧长	$I_{2s}$ ——异步电动机旋转时转子电流
$C$ ——常数; 电容量; 热容量	$I_f$ ——励磁电流
$C_e$ ——电动势常数	$I_N$ ——额定电流
$C_T$ ——转矩常数	$I_0$ ——空载电流
$D$ 或 $d$ ——直径	$I_k$ ——短路电流
$E$ ——感应电动势 (交流为有效值)	$I_{st}$ ——起动电流
$E_a$ ——电枢电动势	$i$ ——电流的瞬时值
$E_m$ ——交流电动势最大值	$i_k$ ——换向电流
$E_\sigma$ ——漏电动势	$i_a$ ——直流电机电枢支路电流
$E_{2s}$ ——异步电动机旋转时转子电动势	$J$ ——转动惯量
$E_1$ ——异步机定子绕组基波电动势; 变压器一次绕组电动势	$j$ ——电流密度
$E_2$ ——变压器二次绕组电动势; 异步电动机转子绕组静止时的电动势	$K$ ——换向片数; 系数
$E_\nu$ —— $\nu$ 次谐波电动势	$k$ ——电压比; 系数
$e$ ——电动势瞬时值; 合成控制信号	$k_e$ ——电动势比
$e_a$ ——换向元件中的电枢反应电动势	$k_i$ ——电流比
$e_x$ ——电抗电动势	$k_N$ ——绕组因数
$F$ ——磁通势 (或称磁动势); 力	$L$ ——自感; 电感
$F_+$ ——正序磁通势	$L_{\sigma_l}$ ——漏电感
$F_-$ ——负序磁通势	$l$ ——长度; 导体有效长度
$F_a$ ——电枢磁通势	$m$ ——级数; 相数; 质量
$F_f$ ——励磁磁通势	$N$ ——电枢总导体数; 匝数; 拍数
$F_m$ ——脉振磁通势幅值	$N_y$ ——线圈 (元件) 匝数
$F_0$ ——空载磁通势	$n$ ——转速
$F_\delta$ ——气隙磁通势	$n_1$ ——同步转速
$F_{Fe}$ ——铁磁材料的磁通势	$n_N$ ——额定转速
$f$ ——频率; 力; 磁通势瞬时值	$P$ ——功率
	$P_{em}$ ——电磁功率
	$P_L$ ——负载功率
	$P_m$ ——全 (总) 机械功率
	$P_N$ ——额定功率

- $P_1$ ——输入功率  
 $P_2$ ——输出功率  
 $p$ ——损耗功率；极对数  
 $p_{Cu}$ ——铜耗  
 $p_{Fe}$ ——铁耗  
 $p_k$ ——短路损耗  
 $p_m$ ——机械损耗  
 $p_0$ ——空载损耗  
 $p_s$ ——杂散损耗  
 $Q$ ——热量；无功功率；流量  
 $R$  或  $r$ ——电阻  
 $R_a$ ——电枢回路总电阻  
 $R_{bk}$ ——制动电阻  
 $R_f$ ——励磁回路总电阻  
 $R_L$ ——负载电阻  
 $R_m$ ——磁阻； $m$  级起动总电阻  
 $R_p$ ——外接电阻  
 $R_{pa}$ ——电枢调节电阻  
 $R_{pf}$ ——磁场调节电阻  
 $R_{st}$ ——起动电阻  
 $r_a$ ——电枢绕组电阻  
 $r_f$ ——励磁绕组电阻  
 $r_m$ ——励磁电阻  
 $S$ ——元件数；视在功率  
 $S_N$ ——额定视在功率；变压器的额定容量  
 $s$ ——转差率  
 $s_m$ ——临界转差率  
 $s_N$ ——额定转差率  
 $T$ ——电磁转矩；时间常数；周期  
 $T_1$ ——原动机转矩；输入转矩  
 $T_2$ ——输出转矩  
 $T_L$ ——负载转矩  
 $T_N$ ——额定转矩  
 $T_0$ ——空载转矩  
 $T_{st}$ ——起动转矩  
 $t$ ——时间；齿距  
 $U$ ——电压（交流为有效值）  
 $U_\phi$ ——相电压  
 $u$ ——电压瞬时值；虚槽数  
 $u_k$ ——阻抗电压、短路电压的相对值  
 $v$ ——线速度  
 $W$ ——能量（储能）  
 $X$ ——电抗  
 $X_a$ ——电枢反应电抗  
 $X_m$ ——励磁电抗  
 $X_k$ ——短路电抗  
 $X_l$ ——同步电抗  
 $y$ ——节距；合成节距  
 $Z$ ——电机槽数；阻抗  
 $Z_L$ ——负载阻抗  
 $Z_m$ ——励磁阻抗  
 $Z_k$ ——短路阻抗  
 $Z_r$ ——转子齿数  
 $Z_u$ ——电枢总虚槽数  
 $\alpha$ ——角度；信号系数；旋转角  
 $\alpha_e$ ——有效信号系数  
 $\alpha_{Fe}$ ——铁耗角  
 $\beta$ ——负载系数；角度  
 $\eta$ ——效率  
 $\eta_{max}$ ——最大效率  
 $\eta_N$ ——额定效率  
 $\theta$ ——温度；功率角；失调角  
 $\theta_s$ ——步距角  
 $\lambda$ ——波长；转矩倍数  
 $\lambda_m$ ——最大转矩倍数（过载能力）  
 $\mu$ ——磁导率  
 $\nu$ ——相对速度；谐波次数  
 $\tau$ ——极距；温升  
 $\tau_N$ ——额定温升  
 $\Phi$ ——磁通  
 $\Phi_0$ ——主磁通  
 $\Phi_1$ ——基波磁通  
 $\Phi_m$ ——主磁通最大值  
 $\Phi_o$ ——漏磁通  
 $\phi$ ——磁通瞬时值  
 $\psi$ ——磁链  
 $\Omega$ ——机械角速度  
 $\Omega_1$ ——同步角速度  
 $\omega$ ——电角速度；角频率  
 $\varphi$ ——相位角；功率因数角

# 目 录

前言

主要符号表

绪论	1
第一章 直流电机	4
第一节 直流电机的基本原理与结构	4
第二节 直流电机的电枢绕组	14
第三节 直流电机的磁场	20
第四节 电磁转矩和电枢电动势	23
第五节 直流电动机的运行原理	25
第六节 直流发电机的运行原理	30
第七节 直流电机的换向	36
思考题与习题	39
第二章 直流电动机的电力拖动	41
第一节 电力拖动系统的运动方程式	41
第二节 生产机械的负载转矩特性	44
第三节 他励直流电动机的机械特性	45
第四节 他励直流电动机的起动和反转	51
第五节 他励直流电动机的制动	54
第六节 他励直流电动机的调速	64
第七节 串励和复励直流电动机	68
思考题与习题	72
第三章 变压器	75
第一节 变压器的基本工作原理和结构	75
第二节 单相变压器的空载运行	81
第三节 单相变压器的负载运行	86
第四节 变压器参数的测定	93
第五节 变压器的运行特性	96
第六节 三相变压器	100
第七节 其它用途的变压器	110
思考题与习题	114
第四章 三相异步电动机	118
第一节 三相异步电动机的基本工作原理和结构	118
第二节 三相异步电动机的定子绕组	128
第三节 交流绕组的感应电动势	135

第四节 三相异步电动机的空载运行	140
第五节 三相异步电动机的负载运行	143
第六节 三相异步电动机的功率及转矩平衡方程式	151
第七节 三相异步电动机的参数测定	152
第八节 三相异步电动机的工作特性	155
思考题与习题	157
第五章 三相异步电动机的电力拖动	160
第一节 三相异步电动机的电磁转矩表式	160
第二节 三相异步电动机的机械特性	164
第三节 三相异步电动机的起动	168
第四节 三相异步电动机的制动	180
第五节 三相异步电动机的调速	189
思考题与习题	201
第六章 其他用途的电动机	204
第一节 单相异步电动机	204
第二节 三相同步电动机	211
第三节 其他电动机	217
思考题与习题	224
第七章 控制电机	225
第一节 概述	225
第二节 伺服电动机	226
第三节 测速发电机	234
第四节 步进电动机	238
第五节 自整角机和旋转变压器简介	244
思考题与习题	248
第八章 电动机容量的选择	249
第一节 电动机容量选择的基本知识	249
第二节 选择电动机容量的基本方法	253
思考题与习题	260
附录 用“时钟表示法”确定三相变压器的联结组	262
参考文献	263

# 绪 论

## 一、电机、电力拖动技术在国民经济中的作用发展概况

电能是现代能源中应用最广的二次能源，它的生产、变换、传送、分配、使用和控制都较为方便经济，而要实现电能的生产、变换和使用等都离不开电机。

电机是一种利用电磁感应定律和电磁力定律，将能量或信号进行转换或变换的电磁机械装置。它主要是指发电机、变压器和电动机。在电力工业中，产生电能的发电机以及对电能进行变换、传输与分配的变压器是电站和变电所的主要设备。在机械、冶金、纺织、石油、煤炭和化工及其他工业企业中，人们利用电动机把电能转换成机械能，去拖动机床、起重机、轧钢机、电铲、搅拌机等各种生产机械，从而满足生产工艺过程的要求；在交通运输业中，需要大量的牵引电动机和船用、航空电机；随着农业机械化的发展，电力排灌、播种、收割等农用机械中，也都需要规格不同的电动机；在航天、航空和国防科学等领域的自动控制技术中，各种各样的控制电机作为检测、随动、执行和解算元件；在品种繁多的家用电器中，也离不开功能各异的小功率电动机……。因此，电机在国民经济的各个领域起着重要的作用。

电机工业的发展，同国民经济和科学技术的发展有密切相关，它的历史至今尚不到 200 年。从 1831 年法拉第发现电磁感应现象起，到本世纪初的具备各种电机基本型式为止，是电机工业的发展初期。电机工业的近代发展时期是在本世纪，在初期阶段的实践基础上，总结了设计、制造和运行经验，对电机理论探讨进一步深化，材料、设计、制造工艺不断改进，经济指标日益提高，运行性能不断改善。

我国的电机工业，从新中国成立以来的 50 年间，建立了独立自主的完整体系。早在 1965 年我国就研制成功当时世界上第一台 125kW 双水内冷汽轮发电机，显示了我国电机工业的迅速掘起。近些年来，随着对电机新材料的研究并在电机设计、制造工艺中利用计算机技术，普通电机的性能更好、运行更可靠；而控制电机的高可靠性、高精度、快速响应使控制系统完成各种人工无法完成的快速复杂的精巧运动。目前我国电机工业的学者和工程技术人员，正在对电机的新原理、新结构、新系列、新工艺、新材料、新的运行方式和调速方法，进行更多的探索、研究和试验工作，并取得了可喜的成绩。

上面简述了电机在国民经济中的作用和发展概况。对于应用各种电动机拖动各种生产机械的电力拖动技术，其发展概况如下。

最初，电力拖动代替了蒸汽或水力的拖动。当时电动机拖动生产机械的是通过天轴实现的，即由一台电动机拖动一组生产机械，称为“成组拖动”。这种拖动方法中，电动机远离生产机械，它通过车间里的大量天轴、传动带、带轮等机械传动系统去带动各种生产机械运行。因而拖动系统效率低且时常发生故障。

为了克服上述缺点，自 20 世纪 20 年代以来，广泛采用“单电动机拖动系统”，即一台生产机械由一台单独的电动机拖动。这样电动机与生产机械在结构上配合密切，可以用电气调节每台生产机械的转速，从而进一步简化机械结构，而且易于实现生产机械运转的自动化。



但是，如果一台电动机拖动具有多个工作机构的生产机械时，则生产机械内部仍将保留复杂的机械传动机构。因此，自30年代起广泛采用了“多电动机拖动系统”，即每一个工作机构用单独的电动机拖动，这样生产机械的机械结构可大为简化。例如具有三个主轴的龙门铣床用三台电动机拖动，每台电动机拖动一个主轴运动。某些生产机械的生产过程长而连续，如造纸、印刷、纺织、轧制等机械，也都采用多电动机拖动系统。因为这些机械一般由多个部分组成，每一部分可由单独电动机拖动。

随着生产的发展，对上述单电动机拖动系统及多电动机拖动系统提出了更高的要求：如要求提高加工精度与工作速度，要求快速起动、制动及反转，实现在很宽范围内调速及整个生产过程自动化等。要完成这些任务，除电动机外，必须要有自动控制设备，组成自动化的电力拖动系统。而这些高要求的拖动系统随着自动控制理论不断发展，半导体器件和电力电子技术的采用，以及数控技术和计算机技术的发展与采用，正在不断地完善和提高。如我国上海宝钢的生产线，从原料进厂、配料、冶炼到产品出厂都是自动化的，而且达到高速、优质、高效率地生产。

综上所述，电力拖动技术发展至今，它具有许多其它拖动方式（如蒸汽机、内燃机、水轮机等）无法比拟的优点。它起动、制动、反转和调速的控制简单方便、快速性好且效率高，而且电动机的类型很多，具有各种不同的运行特性，可以满足各种类型的生产机械的要求。电力拖动系统各参数的检测、信号的变换与传送方便，易于实现最优控制。因此，电力拖动成为现代工农业电气自动化的基础。

## 二、本课程的内容、任务、特点及学习方法

本课程是工业电气自动化、机电一体化等电类专业的一门技术基础课。

《电机及拖动基础》课程内容，是工业电气自动化、机电一体化等专业学生必须学习和掌握的电机与电力拖动系统的基本理论。该课程是“电机原理”和“电力拖动基础”两大部分内容的有机结合。它是在学习《物理》、《电工基础》等课程的基础上，通过讲授直流电机、变压器、交流电机和控制电机的基本理论并联系工程实际问题等，以期达到下列要求：

①熟悉常用的直流电机、变压器、三相异步电动机的基本结构，掌握它们的工作原理和基本理论（电磁关系、能量转换关系、运行特性等）。

②掌握直流电动机、三相异步电动机的机械特性及各种运转状态的基本理论。

③掌握直流电动机、三相异步电动机起动、制动、调速和反转的基本原理，掌握电动机起、制动和调速电阻的计算方法；具有选择电力拖动方案所需的基础知识。

④了解单相异步电动机、同步电动机及几种常用控制电机的特点、工作原理、运行性能和用途。

⑤掌握电机实验的基本方法和技能，能选择、使用和维护与电机实验相关的仪器设备。

本课程既有基础性又有专业性。运用《物理》、《电工基础》等基础课的基本理论来分析研究各类电机内部的电磁物理过程，从而得出各类电机的一般规律及其各异的特性。但它与《物理》、《电工基础》等基础课的性质不同。在《电机及拖动基础》课程中，不仅有理论的分析推导，磁场的抽象叙述，而且还要用基本理论去分析研究比较复杂的又往往带有有机、电、磁综合性的工程实际问题。这是学习本课程的特点，也是难点。

因此，为了学好本课程，必须理解和掌握电和磁的基本概念，熟练运用电磁感应和电磁力定律、电路定律、磁路定律、安培全电流定律、力学、运动学、机械制图等已学过的知

识，理解和掌握各类电机的基本电磁关系和能量转换关系，并运用所学的理论对电机的运行性能、电动机各运转状态等作相关计算。学习过程中，要注意各种电机的结构的异同点、电磁关系的异同点、能量转换关系的异同点、运行特性的异同点等，运用总结对比的方法，融会贯通，加深理解。为了提高课堂教学效果，课前应预习，这样一是可对相关的已学知识进行回顾和补遗，二是对将要学到的内容浏览一遍，对新的名词术语和相关内容有所了解，便于有的放矢地听课；课后应及时复习和小结（教材的章节后大多有小结）及选择适当的思考题和计算题作为课外作业，以巩固理论知识提高理解和运算能力。此外，需进行必要的实验和实习，一是对基本原理和理论进行验证，二是培养学生独立工作能力，提高实验操作技能和动手能力。

《电机及拖动基础》将为后续课程《自动控制理论》、《调速系统》、《工厂电气控制设备》等作基础准备，为日后工作中对电力拖动设备的技术管理和生产第一线的选配、安装调试、操作、维护与检修电力拖动设备打下良好基础。

# 第一章 直流电机

直流电机是通以直流电流的电机是，电能和机械能相互转换的旋转电机之一。将机械能转换为电能的是直流发电机，将电能转换为机械能的是直流电动机。

与交流电机相比，直流电机结构复杂，成本高，运行维护较困难。但直流电动机具有良好的调速性能、较大的起动转矩和过载能力等很多优点，在起动和调速要求较高的生产机械中，如金属切削机床、轧钢机、电力机车、起重机、造纸及纺织行业等机械中，仍得到广泛的应用。由于电力电子技术的迅速发展，作为直流电源的直流发电机已逐步被晶闸管整流装置所取代。但在电镀、电解行业中仍继续得以应用。

本章主要分析直流电机的基本工作原理、结构和运行特性。

## 第一节 直流电机的基本原理与结构

### 一、直流电机的基本工作原理

#### 1. 直流发电机的基本工作原理

直流发电机的工作原理是基于电磁感应原理，在磁感应强度为  $B_x$  的磁场中，一根长度为  $l$  的导体以匀速  $v$  作垂直切割磁力线的运动时，则在导体中产生感应电动势，其值的大小按法拉第定律来计算

$$e = B_x l v \quad (1-1)$$

图 1-1 为直流发电机的工作原理模型。图中 N、S 是一对在空间固定不动的磁极（可以是永久磁铁，也可以是电磁铁）， $abcd$  是安装在可以转动的圆柱体（导磁材料制成的）上的一个线圈，（整个转动部分称为转子或电枢），线圈两端分别接到两个相互绝缘的半圆形铜环（称为换向片，这两个换向片就构成了最简单的换向器）1 和 2 上，换向片分别与固定不动的电刷 A 和 B 保持滑动接触，这样，旋转着的线圈可以通过换向片、电刷与外电路接通。

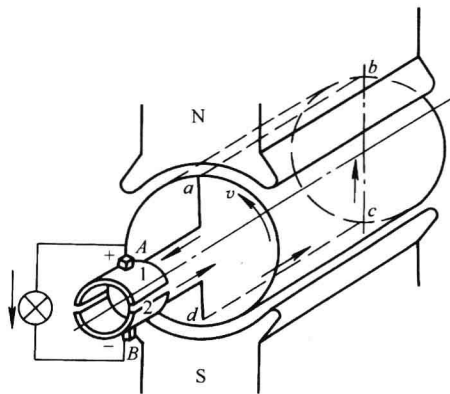


图 1-1 直流发电机的工作原理模型

当原动机拖着电枢以一定的速度在磁场中逆时针旋转时，根据电磁感应原理，线圈边  $ab$  和  $cd$  切割磁力线产生感应电动势，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 极下，产生的感应电动势从  $b$  指向  $a$ ；线圈的  $cd$  边处于 S 极下，产生的感应电动势从  $d$  指向  $c$ 。从整个线圈来看，电动势的方向为  $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ；反之，当  $ab$  边转到 S 极下， $cd$  边转到 N 极下时，每个边的感应电动势方向都要随之改变，于是，整个线圈的感应电动势方向变为  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。所以线圈中的感应电动势是交变的。假设磁场在电枢圆周上按正弦规律分布， $B_x$

$= B_m \sin \alpha$ ，则

$$e = B_x l v = B_m l v \sin \alpha$$

表明线圈中的感应电动势按正弦规律变化。

那么如何在电刷上得到直流电动势呢？这就要靠换向器的作用了。在图 1-1 所示瞬间线圈的  $ab$  边处于 N 极下，电动势的方向从  $b$  向  $a$  引到电刷 A，所以电刷 A 的极性为正。当线圈转过  $180^\circ$ ，线圈  $ab$  边与  $cd$  边互换位置，使  $cd$  边处于 N 极下时，于是  $cd$  边与电刷 A 接触，其电动势的方向是从  $c$  向  $d$  引到电刷 A，电刷 A 的极性仍为正。同理可分析出电刷 B 的极性为负。进一步观察可以发现，电刷 A 总是与旋转到 N 极下的导体接触，所以电刷 A 总是正极性。而电刷 B 总是与旋转到 S 极下的导体接触，所以电刷 B 总是负极性，故在电刷 A、B 之间得到如图 1-2 所示的直流电动势。

**例 1-1** 如果图 1-1 中直流发电机顺时针旋转，电刷两端的电动势极性有何变化？还有什么因素会引起同样的变化？

**解** 在图 1-1 所示位置，当直流发电机顺时针旋转时，用右手定则判定线圈中感应电动势的方向为  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ，通过换向片与电刷的滑动接触，则电刷 B 极性为正，电刷 A 极性为负。所以，直流发电机改变电枢旋转方向可以改变输出电动势的极性。

由右手定则可知，决定感应电动势方向的因素有两个：一是导体运动方向（电枢转向），二是磁场极性。所以，改变磁场的极性也可使直流发电机电刷两端输出的电动势极性改变。

显然，图 1-2 所示的直流发电机模型的输出电动势波形脉动幅度太大。如果在电枢圆周上均匀分布四个线圈，这些线圈的出线端接到四个换向片上，并构成闭合回路，则电刷两端的电动势为四个线圈电动势的叠加，其波形如图 1-3 中实线所示。可见电动势的脉动幅度已大为减小。依次类推，电枢上分布的线圈越多，电动势的脉动幅度越小。所以在实际发电机中，有许多个线圈均匀分布在发电机转子表面，它们按一定规律连接起来，构成电枢绕组（详见本章第三节）。

## 2. 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是基于电磁力定律的。若磁场  $B_x$  与导体互相垂直，且导体中通以电流  $i$ ，则作用于载流导体上电磁力  $f$  为

$$f = B_x l i \quad (1-2)$$

图 1-4 是直流电动机的工作原理模型。电刷 A、B 两端加直流电压  $U$ ，在图示的位置，电流从电源的正极流出，经过电刷 A 与换向片 1 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 2 与电刷 B 流回电源的负极。根据电磁力定律，线圈边  $ab$  与  $cd$  在磁场中分别受到电磁力的作用，其方向可用左手定则确定，如图中所示。此电磁力形成的电磁转矩，使电动机逆时针方向旋转。当线圈边  $ab$  转到 S 极面下、 $cd$  转到 N 极面下

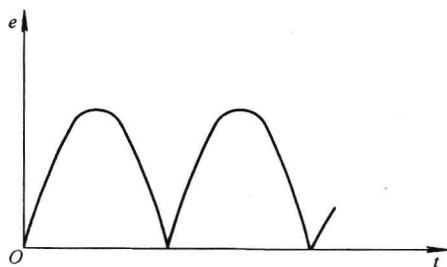


图 1-2 一个线圈时电刷两端电动势的波形

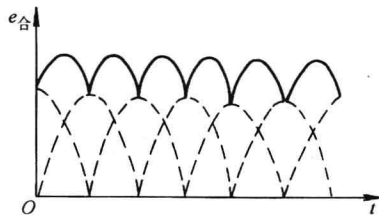


图 1-3 四个线圈均匀分布时电刷两端的电动势波形

时，流经线圈的电流方向必须改变，这样导体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。

如何才能使导体中的电流方向改变呢？这个任务将由换向器来完成。从图中可以看出，原来电刷 A 通过换向片 1 与经过 N 极面下的导体  $ab$  相连，现在电刷 A 通过换向片 2 与经过 N 极面下的导体  $cd$  相连；原来电刷 B 通过换向片 2 与经过 S 极面下的导体  $cd$  相连，现在电刷 B 通过换向片 1 与经过 S 极面下的导体  $ab$  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未变，电枢仍逆时针方向旋转。

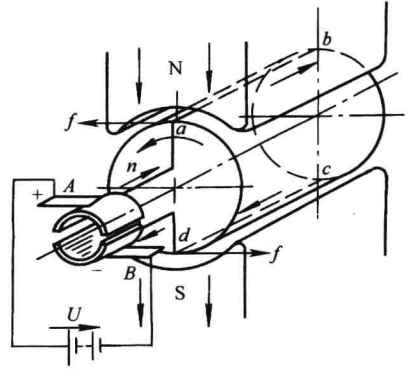


图 1-4 直流电动机工作原理模型

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 极面下的导体相连，负电刷 B 始终与经过 S 极面下的导体相连，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换向的关键部件。通过换向器和电刷的作用，把直流发电机电枢中的交变电动势整流成电刷间方向不变的直流电动势；把直流电动机电刷间的直流电流变成线圈内的交变电流，以确保电动机沿恒定方向旋转。

**例 1-2** 电动机拖动的生产设备常常需要作正转和反转的运动，例如龙门刨床工作台的往复运动，电力机车的前行和倒退，这就要求电动机能正转和反转。图 1-4 的直流电动机怎样才能顺时针旋转呢？

**解** 对图 1-4 而言，电动机顺时针旋转需获得一个顺时针方向的电磁转矩，由左手定则可知：电磁力的方向取决于磁场极性和导体中电流的方向，所以直流电动机获得反转的方法有两个：一是改变磁场极性；二是改变电源电压的极性使流过导体的电流方向改变。应注意，二者只能改变其一，否则，直流电动机的转向不变。

### 3. 电机的可逆原理

观察图 1-1 和图 1-4 可以发现，直流发电机和电动机工作原理模型的结构完全相同，那么电机内部有无相同之处呢？

(1) 直流发电机 当发电机带负载以后，例如图 1-1 中电刷两端接一灯泡，就有电流流过负载，同时也流过线圈，其方向与感应电动势方向相同。根据电磁力定律，载流导体  $ab$  和  $cd$  在磁场中会受力的作用，形成的电磁转矩方向为顺时针，与转速方向相反。这意味着，电磁转矩阻碍发电机旋转，是制动转矩。

为此，原动机必须用足够大的拖动转矩来克服电磁转矩的制动作用，以维持发电机的稳定运行。此时发电机从原动机吸取机械能，转换成电能向负载输出。

(2) 直流电动机 从图 1-4 中可知，当电动机旋转起来后，导体  $ab$  和  $cd$  切割磁力线，产生感应电动势，用右手定则判断出其方向与电流方向相反。这意味着，此电枢电动势是一反电动势，它阻碍电流流入电动机。

所以，直流电动机要正常工作，就必须施加直流电源以克服反电动势的阻碍作用，把电流灌入电动机。此时电动机从直流电源吸取电能，转换成机械能输出。

综上所述，无论发电机还是电动机，由于电磁的相互作用，电枢电动势和电磁转矩是同

时存在的。从原理上说发电机和电动机两者并无本质差别，只是外界条件不同而已。一台电机，既可作为发电机运行，又可作为电动机运行，这就是直流电机的可逆原理。可逆原理同样也适用于交流电机。

## 二、直流电机的基本结构

由上述直流电机的工作原理可以知道，直流电机的结构由两个主要部分组成：① 静止部分（称为定子），主要用来产生磁通；② 转动部分（称为转子，通称电枢），是机械能变为电能（发电机）、或电能变为机械能（电动机）的枢纽。在定转子之间，有一定的间隙称为气隙。

图 1-5 是一台直流电机外形图，图 1-6 是直流电机的主要部件图，图 1-7 是直流电机剖面图。下面简要介绍直流电机主要部件结构及其作用。

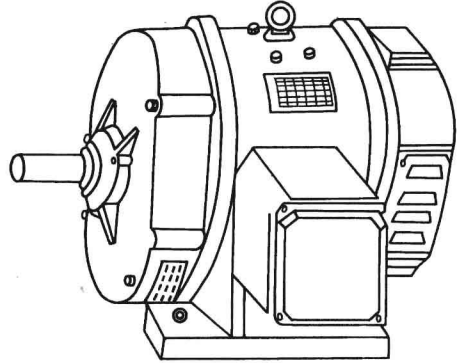


图 1-5 直流电机外形图

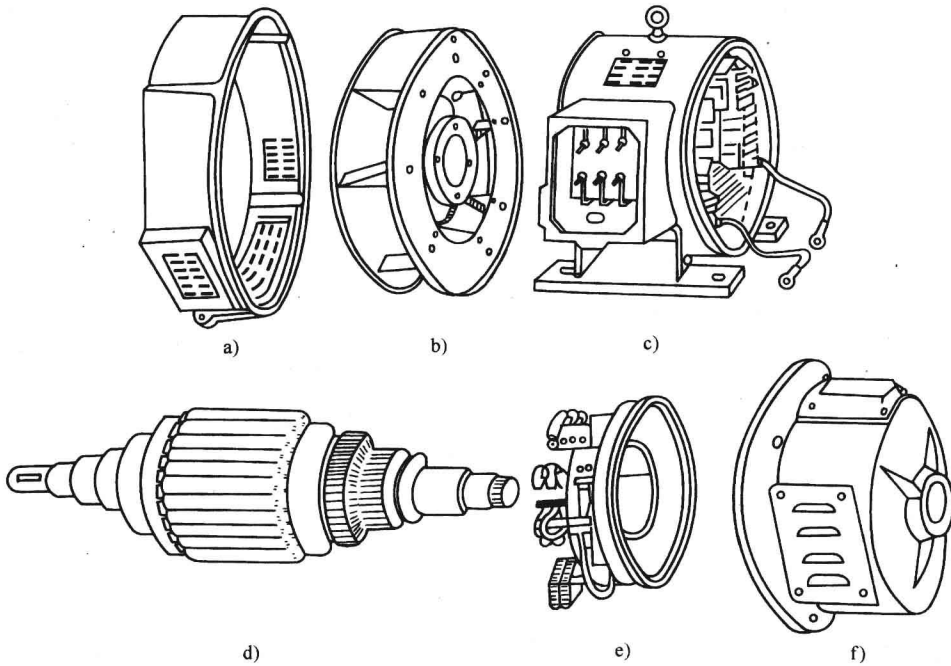


图 1-6 直流电机主要部件图

a) 前端盖 b) 风扇 c) 定子 d) 转子 e) 电刷装置 f) 后端盖

### 1. 定子部分

(1) 主磁极 主磁极由磁极铁心和励磁绕组组成。当励磁绕组中通入直流电流后，铁心中即产生励磁磁通，并在气隙中建立励磁磁场。励磁绕组通常用圆形或矩形的绝缘导线制成一个集中的线圈，套在磁极铁心外面。磁极铁心一般用 1~1.5mm 厚的低碳钢板冲片叠压铆接而成，主磁极铁心柱体部分称为极身，靠近气隙一端较宽的部分称为极靴，极靴与极身交界处形成一个突出的肩部，用以支撑住励磁绕组。极靴沿气隙表面处作成弧形，使极下气隙磁

通密度分布更合理。整个主磁极用螺杆固定在机座上。图 1-8 为直流电机主磁极的结构图。

主磁极总是 N、S 两极成对出现。各主磁极的励磁绕组通常是相互串联连接，连接时要能保证相邻磁极的极性按 N、S 交替排列。

(2) 换向极 换向极也是由铁心和换向极绕组组成，当换向极绕组通过直流电流后，它所产生的磁场对电枢磁场产生影响，目的是为了改善换向，使电刷与换向片之间火花减小（详见本章第七节）。换向极绕组总是与电枢绕组串联，它的匝数少、导线粗。换向极铁心通常都用厚钢板叠制而成，用螺杆安装在相邻两主磁极之间的机座上。直流电机功率很小时，换向极可以减少为主磁极数的一半，甚至不装置换向极。图 1-9 为换向极的结构。

(3) 机座 机座的作用之一是把主磁极、换向极、端盖等零部件固定起来，所以要求它有一定的机械强度。它的另一个作用是让励磁磁通经过，是主磁路的一部分（机座中磁通通过的部分称为磁轭），因此，又要求它有较好的导磁性能，机座一般为铸钢件或由钢板焊接而成。对于某些在运行中有较高要求的微型直流电机，主磁极、换向极和磁轭用硅钢片一次冲制叠压而成，此时，机座只起固定零部件的作用。

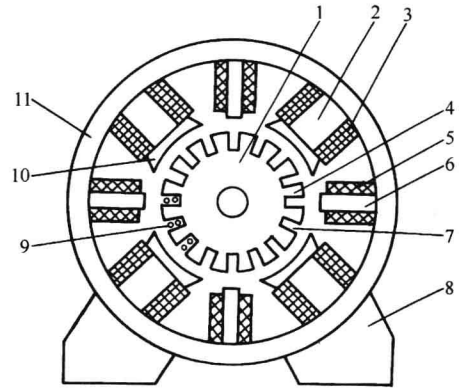
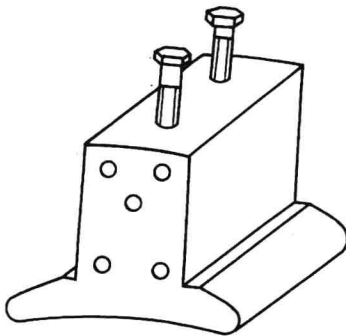
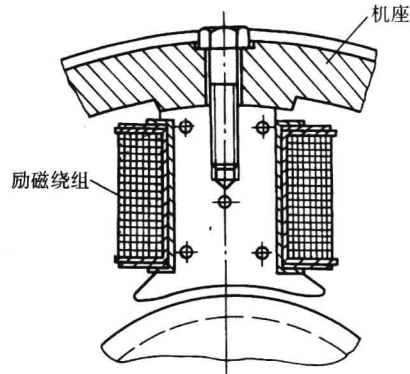


图 1-7 直流电机的径向剖面示意图

- 1—电枢铁心 2—主磁极 3—励磁绕组
- 4—电枢齿 5—换向极绕组 6—换向极铁心
- 7—电枢槽 8—底座 9—电枢绕组
- 10—极掌（极靴） 11—磁轭（机座）



a)



b)

图 1-8 直流电机主磁极结构

a) 主磁极铁心 b) 主磁极固定在机座上

(4) 电刷装置 电刷的作用是将旋转的电枢与固定不动的外电路相连，把直流电压和直流电流引入或引出。因此，它与换向片既要有紧密的接触，又要有良好的相对滑动。电机中常用一套电刷装置来保证它的作用。电刷装置由电刷及弹簧、刷握、刷杆、刷杆座等组成。电刷是用石墨等做成的导电块，放置在刷盒内，用弹簧将它压紧在换向器上。刷握固定在刷杆上，容量大的电机，同一刷杆上可并接一组刷握和电刷。一般刷杆数与主磁极数相等。由于电刷有正、负极之分，因此刷杆必须与刷杆座绝缘。电刷组在换向器表面应对称分布，刷

杆座可与端盖或机座相连接。整个电刷装置可以移动，用以调整电刷在换向器上的位置。图 1-10 为电刷装置结构图。

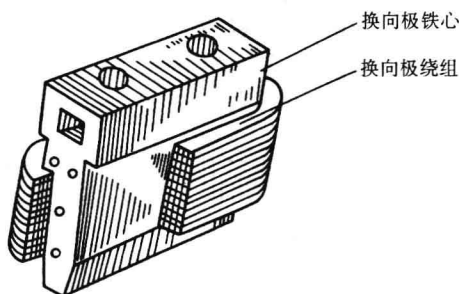


图 1-9 换向极的结构

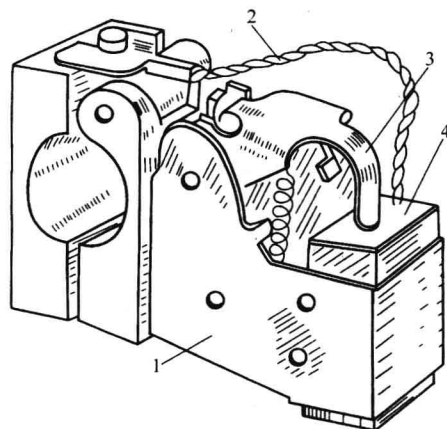


图 1-10 电刷装置

1—刷握 2—铜丝辫 3—压紧弹簧 4—电刷

## 2. 转子部分

(1) 电枢铁心 电枢铁心是主磁路的一部分，同时也要安放电枢绕组。由于电机运行时，电枢与气隙磁场间有相对运动，铁心中也会产生感应电动势而出现涡流和磁滞损耗。为了减少损耗，电枢铁心通常用 0.5mm 厚表面涂绝缘的圆形硅钢冲片叠压而成。冲片圆周外缘均匀地冲有许多齿和槽，槽内可安放电枢绕组，有的冲片上还冲有许多圆孔，以形成改善散热的轴向通风孔，图 1-11a 为电枢铁心冲片的形状。电机容量较大时，电枢铁心的圆柱体还分隔成几段，每段间隔约 10mm 左右，以形成径向的通风道。

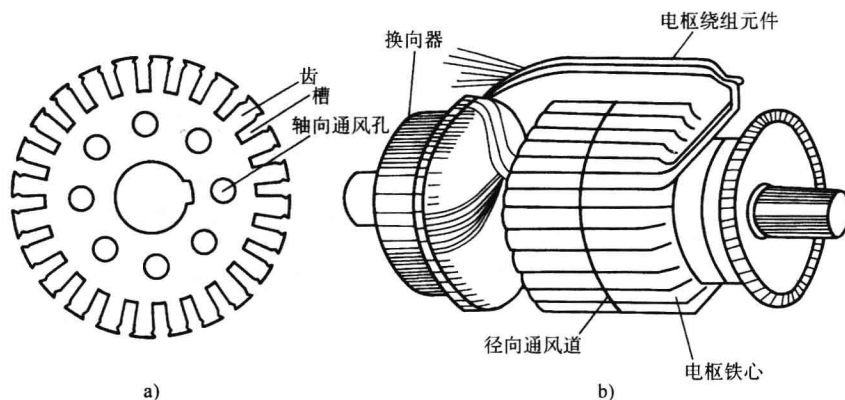


图 1-11 电枢铁心

a) 电枢铁心冲片 b) 电枢铁心及转子

(2) 电枢绕组 电枢绕组是直流电机电路的主要部分，它的作用是产生感应电动势和流过电流而产生电磁转矩实现机电能量转换，是电机中重要部件。电枢绕组由许多个线圈按一定的规律连接而成。这种线圈通常用高强度聚酯漆包线绕制而成，它的一条有效边嵌入某个槽中的上层，另一有效边则嵌入另一槽中的下层，如图 1-12 所示。绕组与铁心槽之间及



上、下层有效边之间均应绝缘，如图 1-13 所示。槽口处沿轴向打入绝缘竹片或环氧酚醛玻璃布板制成的槽楔将线圈压紧并防止它在运行时飞出。同样，端接线也要用玻璃丝带扎紧。线圈的两个端头按一定的规律焊接在换向片上。

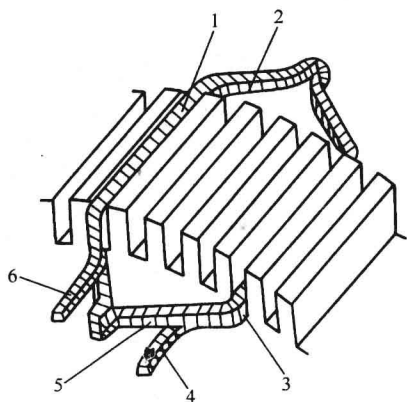


图 1-12 线圈在槽内安放示意图

1—上层有效边 2、5—端接部分 3—下层有效边  
4—线圈尾端 6—线圈首端

(3) 换向器 换向器的作用是与电刷一起将直流电动机输入的直流电流转换成电枢绕组内的交变电流，或是将直流发电机电枢绕组中的交变电动势转换成输出的直流电压。

换向器是一个由许多燕尾状的梯形铜片间隔云母片绝缘排列而成的圆柱体，每片换向片的一端有高出部分，上面铣有线槽，供电枢绕组引出端焊接用。所有换向片均放置在与它配合的具有燕尾状槽的金属套筒内，然后用 V 形钢环和螺纹压圈将换向片和套筒紧固成一体。换向片组与套筒、V 形钢环之间均要用云母环绝缘，如图 1-14 所示。这样的换向器称为金属套筒式换向器。

现代小型直流电机已广泛采用热压塑料代替金属套筒，这种塑料热压成形紧固的换向器，称为塑料换向器。

### 3. 气隙

气隙是电机磁路的重要部分。它的路径虽然很短，但由于气隙磁阻远大于铁心磁阻，(一般小型电机的气隙为 0.7~5mm，大型电机为 5~10mm 左右)，对电机性能有很大的影响。在拆装直流电机时应予以重视。

### 三、直流电机的铭牌数据

每一台电机上都有一块铭牌，上面列出一些具体的数据，称为额定值。这是电机制造厂

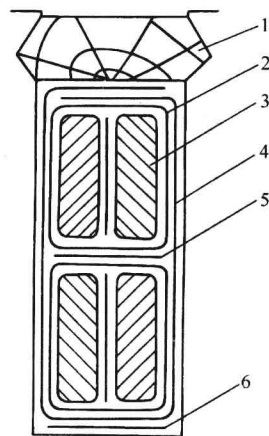


图 1-13 电枢槽内的绝缘

1—槽楔 2—线圈绝缘 3—导体  
4—槽绝缘 5—层间绝缘 6—槽底绝缘

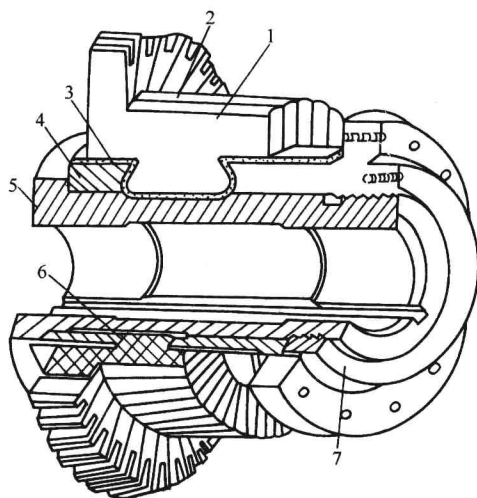


图 1-14 直流电机换向器

1—换向片 2—云母片 3—V形云母套筒  
4—V形钢环 5—钢套 6—绝缘套筒  
7—螺旋压圈