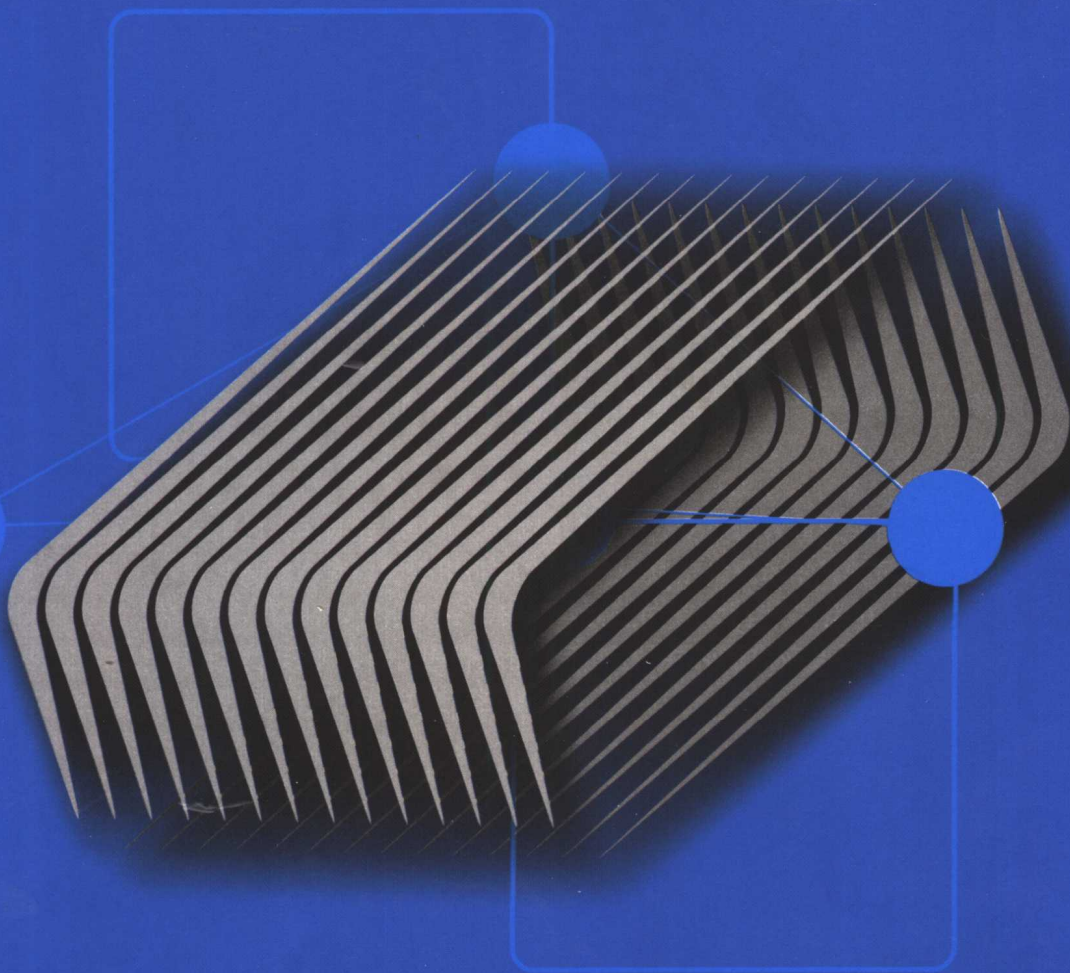




教育部高职高专规划教材  
Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuan Guihua Jiaocai

# 电机及拖动基础

浙江机电职业技术学院 胡幸鸣 主编



机械工业出版社  
China Machine Press



教育部高职高专规划教材

# 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

本书是教育部高职高专规划教材,主要叙述直流电机、变压器、三相异步电动机的工作原理;着重分析直流电动机、三相异步电动机的机械特性以及起动、调速和制动的电力拖动原理和应用,并介绍三相异步电动机的软起动和斩波调速等新技术;简要分析单相异步电动机、同步电动机和控制电机的工作原理;简要介绍电动机容量选择的基本知识和方法。本书降低了理论难度,突出理论知识的应用和实践能力的培养,适用于高职高专等同类院校的电气技术及自动化、机电一体化技术、数控技术应用等专业。

### 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, 2002. 6

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-111-10222-3

I. 电… II. 胡… III. ①电机—高等学校:技术学校—教材②电力传动—高等学校:技术学校—教材  
IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第026690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:于宁 贡克勤 版式设计:冉晓华 责任校对:魏俊云

封面设计:鞠杨 责任印制:闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年1月第1版·第2次印刷

787mm×1092mm<sup>1/16</sup>·13.75印张·340千字

定价:20.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

## 出版说明

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来，在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下，各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看，具有高职高专教育特色的教材极其匮乏，不少院校尚在借用本科或中专教材，教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此，1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》（以下简称《基本要求》）和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》（以下简称《培养规格》），通过推荐、招标及遴选，组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师，成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍，并在有关出版社的积极配合下，推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种，用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间，在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上，充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验，解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题；然后再用2~3年的时间，在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上，通过研究、改革和建设，推出一大批教育部高职高专教育教材，从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求，充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的，适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

# 前 言

本书是教育部高职高专规划教材。随着计算机技术和电力电子技术的发展，当今工业上直流电机的应用远远少于三相异步电动机的应用，因此本书在内容体系上突出三相异步电动机的应用。一改以往直流发电机特性和直流电动机特性并重，直流他励电动机拖动与三相异步电动机拖动并重的状况。同时全书对高深理论内容，利用图解分析，删除繁琐的数学推导；对大量公式，采用推导从简，注重分析物理意义和应用的方法。

为此本书较一般的同类书有如下特点：①对直流电机的电枢绕组，只在直流电机基本结构中的电枢绕组中介绍相关内容；对直流发电机，只介绍其基本工作原理；②对电力拖动系统的运动方程式内容删繁就简，补充运动方程式中的转矩正、负的规定及判断电力拖动系统运动状态的内容；对他励直流电动机的制动和调速采用定性分析用机械特性，定量计算用基本方程式的方法，简化计算；③避开繁杂的变压器参数推导过程，对变压器的空载等效电路先出图再出平衡方程式；④三相异步电动机中旋转磁场用图解法阐述其特点，避开复杂的磁通势公式推导；对交流绕组的感应电动势中的绕组因数以推导从略，从物理意义上进行解释的方法出现；⑤三相异步电动机的拖动中，增加笼型电动机软起动、绕线转子异步电动机的斩波调速等新技术内容；对复杂的制动计算进行简化；⑥三相同步电动机V形曲线的叙述方法从调节功率因素的角度出发，而不需要以三相同步电动机的电动势平衡方程式和相量图等为基础；⑦除了对控制电机的介绍外，对直线电动机、交直流串励电动机、锥型电动机、微型同步电动机、等新颖或实用的电动机也有所介绍。

本书的总体框架体现了高职高专教学改革的特点，突出理论知识的应用和实践能力的培养，以应用为目的，以必须、够用为度，加强实用性。全书与传统教材比较，虽然降低了理论难度，但仍保持教材内容的相对连贯性和稳定性，同时注重教材内容有一定的前瞻性，摒弃了把本科教材浓缩的弊端，力求深入浅出，通俗易懂，便于教学和学生自学。

本书适用于高职高专、成人高校、民办高校、电大等同类院校的电气技术、电气自动化、机电一体化技术、数控技术应用等电类专业。

本书由胡幸鸣担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。

本书由徐虎担任主审。感谢戴一平为本书提供的三相异步电动机软起动等资料。

欢迎使用本教材的师生提出宝贵意见。

编者

## 主要符号表

$A$ ——表面传热系数（散热系数）	$I$ ——电流（交流为有效值）
$a$ ——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；加速度	$I_a$ ——直流电机电枢电流
$B$ ——磁通密度（磁密）	$I_c$ ——控制电流
$B_\delta$ ——气隙磁通密度	$I_{2s}$ ——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
$E_o$ ——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	$j$ ——电流密度
$E_1$ ——异步电动机定子绕组基波电动势；变压器一次绕组电动势	$k$ ——电压比；系数
$E_2$ ——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	$k_e$ ——电动势比
$e$ ——电动势瞬时值；合成控制信号	$k_i$ ——电流比
$e_a$ ——换向元件中的电枢反应电动势	$k_N$ ——绕组因数
$e_x$ ——电抗电动势	$L$ ——自感；电感
$e_k$ ——换向极电动势	$L_o$ ——漏电感
$F$ ——磁通势（或称磁动势）；力	$l$ ——长度；导体有效长度
$F_+$ ——正序磁通势	$M$ ——电动机
$F_-$ ——负序磁通势	$m$ ——起动级数；相数；质量
$F_a$ ——电枢磁通势	$N$ ——电枢总导体数；匝数；拍数
$F_f$ ——励磁磁通势	$n$ ——转速
$F_m$ ——脉振磁通势幅值	$n_0$ ——理想空载转速
$F_0$ ——空载磁通势	$n_1$ ——同步转速
$F_\delta$ ——气隙磁通势	$n_N$ ——额定转速
$F_{Fe}$ ——铁磁材料的磁通势	$P$ ——功率
$f$ ——频率；力；磁通势瞬时值	$P_{em}$ ——电磁功率
$f_N$ ——额定频率	$P_L$ ——负载功率
$G$ ——发电机	$P_m$ ——全（总）机械功率
$GD^2$ ——飞轮力矩	$P_N$ ——额定功率
$H$ ——磁场强度，扬程	$P_1$ ——输入功率
$h$ ——高度	$P_2$ ——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  
 $p_s$ ——附加损耗  
 $Q$ ——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  
 $S$ ——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  
 $T_{max}$ ——最大电磁转矩  
 $T_N$ ——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  
 $U_k$ ——阻抗电压、短路电压的相对值  
 $U_c$ ——控制电压  
 $u_f$ ——励磁电压  
 $v$ ——线速度  
 $W$ ——能量（储能）  
 $X$ ——电抗  
 $X_m$ ——励磁电抗  
 $X_k$ ——短路电抗  
 $y$ ——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  
 $z$ ——电机槽数  
 $z_r$ ——转子齿数  
 $\alpha$ ——角度；信号系数；旋转角；槽距角  
 $\alpha_c$ ——有效信号系数  
 $\alpha_{Fc}$ ——铁耗角  
 $\beta$ ——斜率、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  
 $\nu$ ——转速相对值  
 $\tau$ ——极距；温升；转矩相对值  
 $\tau_N$ ——额定温升  
 $\Phi$ ——磁通  
 $\Phi_0$ ——空载主磁通  
 $\Phi_1$ ——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  
 $\Delta U \%$ ——电压变化率  
 $\Delta U_b$ ——电刷压降

# 目 录

出版说明

前言

主要符号表

绪论 .....	1
<b>第一章 直流电机</b> .....	<b>3</b>
第一节 直流电机的基本工作原理与结构 .....	3
第二节 直流电机的磁场 .....	12
第三节 电磁转矩和电枢电动势 .....	15
第四节 直流电动机的运行原理 .....	17
第五节 直流电机的换向 .....	22
思考题与习题 .....	24
<b>第二章 直流电动机的电力拖动</b> .....	<b>26</b>
第一节 电力拖动系统的运动方程式 .....	26
第二节 生产机械的负载转矩特性 .....	28
第三节 他励直流电动机的机械特性 .....	30
第四节 他励直流电动机的起动和反转 .....	34
第五节 他励直流电动机的制动 .....	37
第六节 他励直流电动机的调速 .....	46
第七节 串励和复励直流电动机 .....	50
思考题与习题 .....	53
<b>第三章 变压器</b> .....	<b>55</b>
第一节 变压器的基本工作原理和结构 .....	55
第二节 单相变压器的空载运行 .....	61
第三节 单相变压器的负载运行 .....	64
第四节 变压器参数的测定 .....	70
第五节 变压器的运行特性 .....	73
第六节 三相变压器 .....	77
第七节 其他用途的变压器 .....	85
思考题与习题 .....	89
<b>第四章 三相异步电动机</b> .....	<b>91</b>
第一节 三相异步电动机的基本工作原理和结构 .....	91
第二节 三相异步电动机的定子绕组和感应电动势 .....	101
第三节 三相异步电动机的空载运行 .....	109
第四节 三相异步电动机的负载运行 .....	111
第五节 三相异步电动机的功率及转矩平衡方程式 .....	118
第六节 三相异步电动机的参数测定与工作特性 .....	120



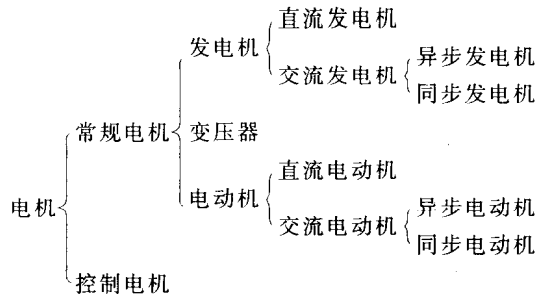
思考题与习题	123
<b>第五章 三相异步电动机的电力拖动</b>	125
第一节 三相异步电动机的电磁转矩表达式	125
第二节 三相异步电动机的机械特性	129
第三节 三相异步电动机的起动	131
第四节 三相异步电动机的制动	139
第五节 三相异步电动机的调速	148
思考题与习题	159
<b>第六章 其他用途的电动机</b>	161
第一节 单相异步电动机	161
第二节 三相同步电动机	166
第三节 其他电动机	169
思考题与习题	174
<b>第七章 控制电机</b>	175
第一节 概述	175
第二节 伺服电动机	176
第三节 测速发电机	184
第四节 步进电动机	188
第五节 自整角机和旋转变压器简介	195
思考题与习题	198
<b>第八章 电动机容量的选择</b>	199
第一节 电动机容量选择的基本知识	199
第二节 电动机容量选择的基本方法	203
思考题与习题	210
<b>附录 用“时钟表示法”确定三相变压器的联结组</b>	211
<b>参考文献</b>	212

# 绪 论

## 一、电机、电力拖动技术在国民经济中的作用

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。电机的品种繁多，按其功能用途来分类，可以分为常规电机和控制电机两大类。



在电力工业中，产生电能的发电机和对电能进行变换、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，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。

同样以电动机为动力，拖动生产机械的拖动方式——电力拖动，具有许多其他拖动方式（如蒸汽机、内燃机、水轮机等）无法比拟的优点。

电力拖动具有优良的性能，起动、制动、反转和调速的控制简单方便、快速性好且效率高。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，电力拖动已成为现代工农业中最广泛采用的拖动方式。而且随着自动控制理论不断发展，半导体器件的采用，以及数控技术和计算机技术的发展与采用，电力拖动装置的特性品质的大大提高，极大地提高了劳动生产率和产品质量，提高了生产机械运转的准确性、可靠性、快速性，提高了电力拖动系统的自动化控制，所以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

本课程是电气自动化、电气技术、机电一体化等电类专业的一门专业基础课。

《电机及拖动基础》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和电力拖动的基本原理等，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、调速和反转的电力拖动基本原理和相关计算方法;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、用途和工作原理。

5) 掌握电机及拖动实验的基本方法和技能,能选择、使用和维护与实验相关的仪器设备。

本课程既有基础性又有专业性。它是运用《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《电机与拖动基础》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、电路和磁路定律、力学、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,并运用所学的理論对电机的运行性能、电动机各运转状态等作相关计算。学习过程中,对电机结构要结合实物弄清各主要部件的组成和作用;要从物理概念上去理解和记忆有关公式而不要死记硬背;要从物理意义上去弄懂各章节例题的解题步骤,并学会举一反三;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、拖动问题的异同点等,运用总结对比的方法,融会贯通,加深理解;要学会运用工程观点和工程方法将实际问题的主要矛盾找出,加以简化和进行分析。为了提高课堂教学效果,课前应预习,这样一是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学生的理解和运算能力。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，如龙门刨床、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 直流电机的基本工作原理与结构

### 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  $B_r$  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：

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

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。

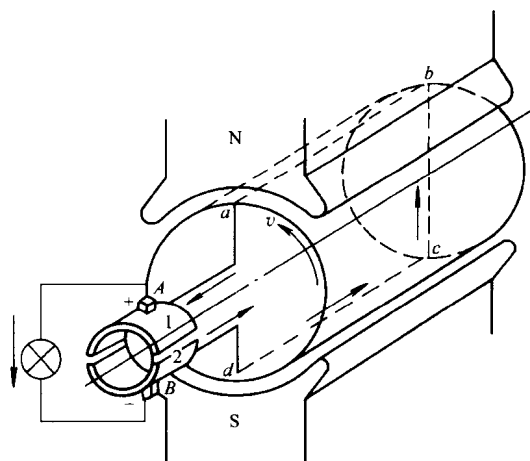


图 1-1 直流发电机的工作原理模型

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。

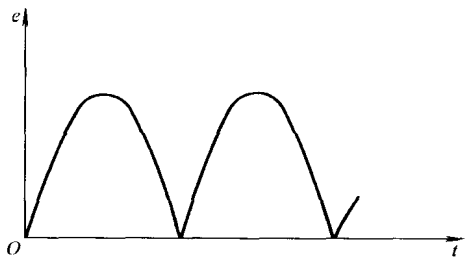


图 1-2 一个线圈时电刷两端电动势的波形

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。

## 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 极面下时，流经线圈的电流方向必须改变，这样

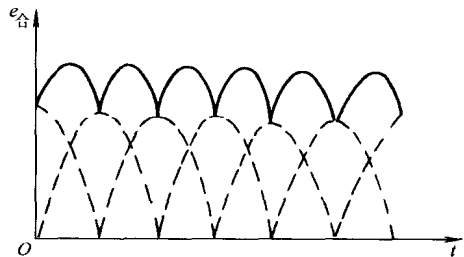


图 1-3 四个线圈均匀分布时电刷两端的电动势波形

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。

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，把直流发电机线圈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

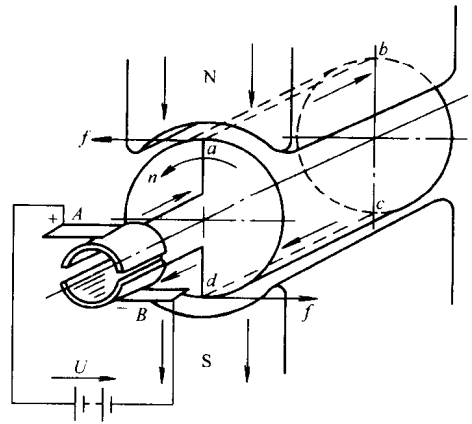


图 1-4 直流电动机工作原理模型

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。

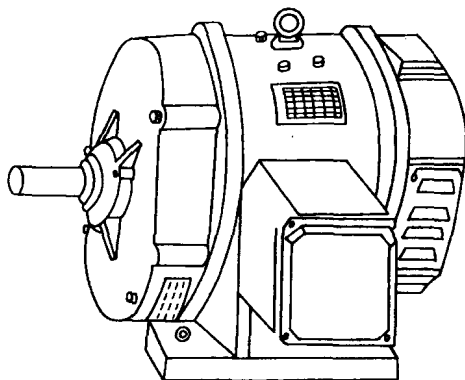


图 1-5 直流电机外形图

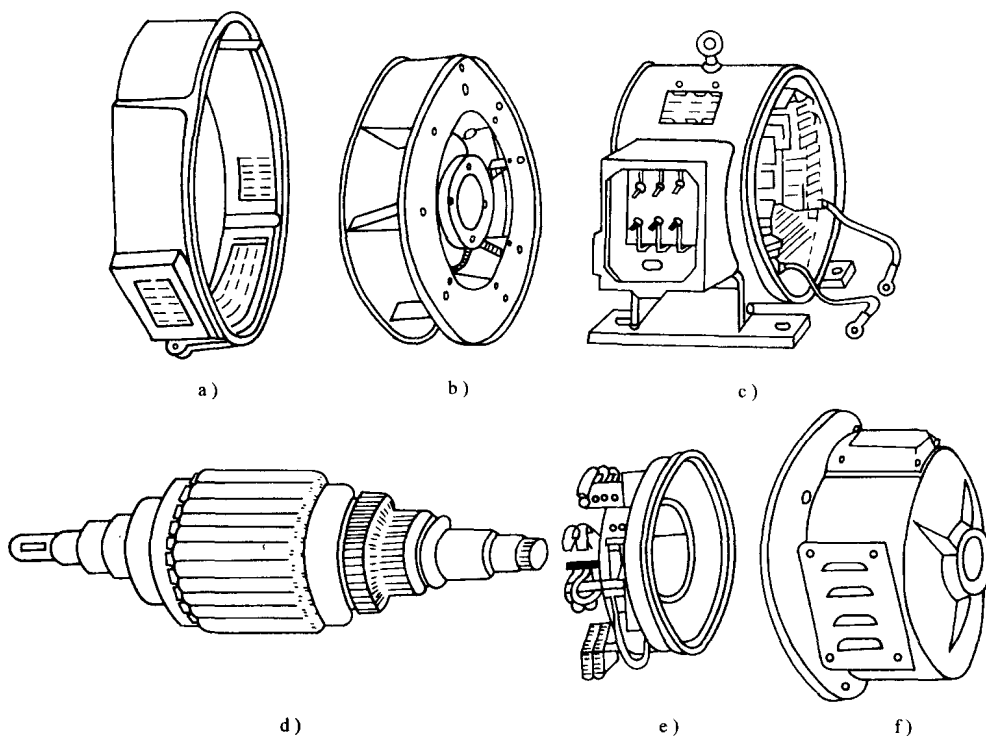


图 1-6 直流电机主要部件图

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。主磁极总是N、S两极成对出现。我们用 $p$ 表示电机的极对数，图1-7中的 $p=2$ ，即有2对主磁极，常称为4极电机。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（详见本章第五节）。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。

(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。

(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1-8为电刷装置结构图。

## 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，电枢铁心通常用厚度有0.5mm，表面涂绝缘的圆形硅钢冲片叠压而成。冲片圆周外缘均

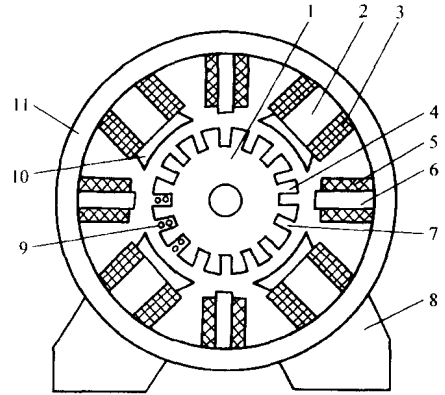


图 1-7 直流电机的径向剖面示意图

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）

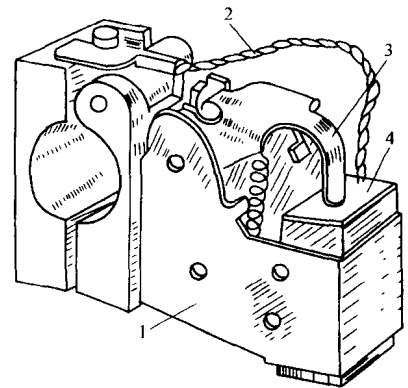


图 1-8 电刷装置

1—刷握 2—铜丝辫  
3—压紧弹簧 4—电刷



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 1-9a 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。

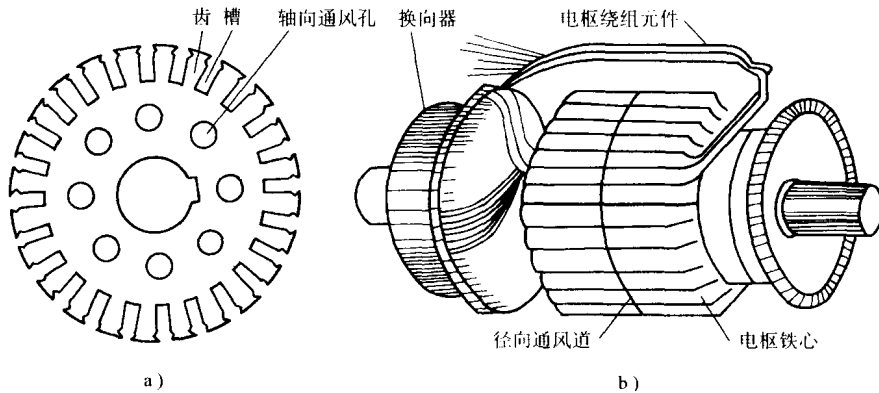


图 1-9 电枢铁心

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（又称绕组元件）按一定的规律联接而成。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（线圈的直导线部分，因切割磁场而中感应电动势的有效部分）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 1-10 所示。每个线圈两有效边的引出端都分别按一定的规律焊接到换向器的换向片上。电枢绕组线圈间的联接方法有叠绕组、波绕组、混合绕组等。其中单叠绕组、单波绕组的联接示意图如图 1-11 所示。从参考文献 1 可知，不同联接规律的电枢绕组有不同的并联支路对数  $a$ 。如单叠绕组是每个主极下的线圈串联成一条支路，电机共有  $2p$  个极，就有  $2p$  条支路，即  $p$  对支路；单波绕组是所有相同极性下的线圈串联成一条支路，电机共有 N、S 两种极性，故有 2 条支路，即一对支路。用公式表示为

$$\text{单叠绕组} \quad a = p$$

$$\text{单波绕组} \quad a = 1$$

单叠绕组一般适用于较大电流的直流电机，单波绕组一般适用于较高电压的直流电机。

注意线圈与铁心槽之间及上、下层有效边之间均应绝缘，槽口处沿轴向打入绝缘材料制成的槽楔将线圈压紧并防止它在旋转时飞出。

(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。

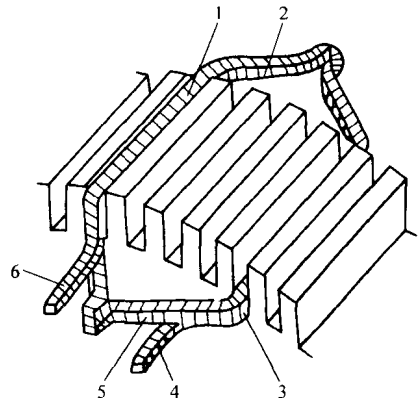


图 1-10 线圈在槽内安放示意图

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