



面向21世纪机电及电气类专业高职高专规划教材



电机及拖动基础

■ 主 编 孟宪芳 主 审 刘保录



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪机电及电气类专业高职高专规划教材

电机及拖动基础

主 编 孟宪芳

副主编 陆玉福

参 编 张小洁 张 玲

主 审 刘保录

西安电子科技大学出版社

2006

内 容 简 介

本书主要讲述直流电机、变压器和三相异步电动机的运行原理和工作特性；着重分析直流电动机和三相异步电动机的机械特性及其启动、制动和调速的方法、原理、特点及应用，其中还介绍了三相异步电动机的新技术——软启动；简要分析单相异步电动机、直线异步电动机、同步电动机的工作原理及应用；简要分析常用控制电机的结构特点、工作原理和特性；简要介绍电动机容量选择的基本知识和方法。

本书在总体框架上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“必需、够用”为度，以“应用”为目的，加强实用性；在阐述方法上深入浅出、通俗易懂，降低了理论的难度。

本书可作为高职高专等同类院校的电气技术、工业电气自动化、自动控制、机电一体化等电气类专业的教材。

★本书配有电子教案，有需要的老师可与出版社联系，免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动基础/孟宪芳主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.1

面向 21 世纪机电及电气类专业高职高专规划教材

ISBN 7-5606-1617-8

I. 电… II. 孟… 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. ①TM3 ②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 145402 号

策 划 马乐惠

责任编辑 王 瑛 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 15.375

字 数 357 千字

印 数 1~4000 册

定 价 17.00 元

ISBN 7-5606-1617-8/TM·0022

XDUP 1909001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜，谨防盗版。

面向 21 世纪

机电及电气类专业高职高专规划教材

编审专家委员会名单

主 任：李迈强

副主任：唐建生 李贵山

机电组

组 长：唐建生（兼）

成 员：（按姓氏笔画排列）

王春林	王周让	王明哲	田 坤	宋文学
陈淑惠	张 勤	李 伟	吴振亭	李 鲤
徐创文	殷 铖	傅维亚	巍公际	

电气组

组 长：李贵山（兼）

成 员：（按姓氏笔画排列）

马应魁	卢庆林	冉 文	申凤琴	全卫强
张同怀	李益民	肖 珑	杨柳春	汪宏武
柯志敏	赵虎利	戚新波	韩全立	解建军

前 言

随着社会经济的发展和科学技术的进步,生产领域的技术含量在不断提高。为了满足新时期社会对高层次技术型人才的要求,编者根据高等职业技术教育电气类系列教材编委会会议精神及高职电气类专业“电机及拖动基础”教学大纲编写了本书。本书可作为高职高专、成人高校、民办高校、电大等同类院校的电气技术、工业电气自动化、自动控制、机电一体化等电气类专业的教材。

本书共分为8章,内容包括直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、其他交流电动机、控制电机、电力拖动系统中电动机的选择等。

本书在总体框架上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“必需、够用”为度,以“应用”为目的,加强实用性。同时,编者结合职业院校的现状和自己多年的教学经验,摒弃了把本科教材浓缩为高职高专教材的弊端,降低了理论知识的难度,但仍保持教材内容的相对连贯性和稳定性,内容安排深入浅出,语言叙述通俗易懂,便于教师教学和学生自学。书中带“*”的内容可根据实际情况选学。每章开始有学习目标,便于学生把握重点;章末有小结,有助于学生复习总结。每章备有大量精选的思考与练习题,便于学生掌握基本内容。附录中还有学习本课程所需要的基础知识,便于学生补习基础。

随着自动控制理论、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已远远少于三相异步电动机的应用,因此本教材在内容体系上改变了其他教材直流发电机特性和直流电动机特性并重、直流电动机拖动与三相异步电动机拖动并重的状况,突出了三相异步电动机及其应用。另外,简要分析单相异步电动机、直线异步电动机和同步电动机的工作原理及应用;简要分析常用控制电机的结构特点、工作原理和特性。同时,对高深的理论内容,删除繁琐的数学推导,利用图解法分析;对大量的公式,推导从简,着重分析其物理意义和应用方法。

本书由孟宪芳任主编,并编写绪论以及第4、5、7、8章与附录等内容;陆玉福任副主编,并编写第2、6章;张小洁编写第1章;张玲编写第3章。全书由孟宪芳统稿。刘保录副教授主审了全稿,在此谨表诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者提出宝贵意见,以便修改。

编 者

2005年8月1日

欢迎选购西安电子科技大学出版社教材类图书

~~~~~ 国家级、部级重点教材 ~~~~

计算机系统结构(第三版)(统编)	22.00
离散数学(第三版)(统编)(乔维声)	16.00
雷达对抗原理(统编)	15.00
雷达原理(第三版)	23.00
通信网的安全——理论与技术	42.00
模拟电子线路基础(傅丰林)	16.00
移动通信(第三版)(统编)(郭梯云)	26.00
智能控制理论和方法	18.00

~~~~~ 计算机提高普及类 ~~~~

计算机应用基础(第三版)(丁)	19.00
计算机组装与维护(高职)(杜飞明)	22.00
计算机组装与维护实用教程 (第二版)(高职)	29.00
《新编计算机应用基础》 (Windows 2000&Office 2002)(第二版)	22.00
《新编计算机应用基础(第二版)》 实践技能训练与案例分析	12.00
计算机应用基础(Windows 2000 &Office 2002版)(教育部高职)	23.00
《计算机应用基础》实践技能训练 与案例分析(教育部高职)	11.00
计算机应用基础上机与实习指导(第三版)	12.00
计算机软件技术基础教程	21.00
计算机综合能力实训教程(高职)	10.00
办公自动化技术及应用教程	22.00
办公自动化设备的使用和维护 (第二版)(高职)	18.00
网络办公自动化技术及应用(高职)	21.00

~~~~~ 计算机网络类 ~~~~

Internet基础与使用(第二版)(高职)	13.00
Internet基础与使用(第二版)(中专)	12.00
计算机网络安全(高职)	15.00
网络安全技术(高职)	17.00
网络安全与保密	24.00
网络信息安全技术	17.00
网站建设与维护(崔良海)	18.00
网站建设与维护(廖常武)	19.00
Internet技术及其应用教程	15.00
计算机图形图像与网页制作(高职)	19.00
互联网实用技术与网页制作(高职)	14.00

局域网组建、管理与维护(高职)	20.00
综合布线技术(高职)	18.00
计算机网络技术导论	16.00
计算机网络(第二版)(袁家政)	26.00
计算机网络技术(刘敬涵)	20.00
计算机网络(第二版)(蔡皖东)	18.00
计算机网络(第二版)(雷振甲)	21.00
计算机网络工程	20.00
计算机网络实验教程	14.00
计算机组网实验教程	23.00
计算机网络学习辅导及习题详解	23.00
网络工程设计与实践	29.00
网络应用程序设计	21.00
现代网络技术	24.00
网络计算	19.00

~~~~~ 计算机技术类 ~~~~

计算机系统结构(陈智勇)	22.00
计算机系统设计——概念与技术(洪龙)	18.00
计算机组成原理 与系统结构实验教程(杨小龙)	12.00
计算机系统安全	22.00
电子政务理论与实务	20.00
电子商务概论	17.00
电子商务基础与应用(第四版)(含盘)	34.00
数据结构(C)(第二版)(杨秀金)	20.00
《数据结构》算法实现及解析 ——配合严蔚敏的《数据结构》(C语言版) (含光盘)(第二版)	35.00
数据结构——使用C++语言(第二版)	23.00
数据结构(高职)(周岳山)	15.00
计算方法与实习(高职)	11.00
算法设计与分析	15.00
编译原理教程	15.00
《编译原理教程》习题解析与上机指导	12.00
编译原理基础	13.00
《编译原理基础》习题与上机题解答	10.00
编译原理学习指导	19.00
《离散数学》习题解答	16.00
离散数学(蔡英)	19.00
《离散数学》学习指导书	16.00
离散数学(马光思)	22.00

离散数学(乔维声)	21.00	3DS MAX 6.0实用教程(高职)	23.00
软件工程(第二版)	22.00	~~~~~微机与控制类~~~~~	
软件工程与数据库概论	14.00	微型计算机原理与应用(第二版)(本科)	33.00
信息系统分析与设计(卫红春)	19.00	《微型原理及应用》(第二版)学习指导	18.00
信息系统分析与设计(高职)(卫红春)	18.00	微型计算机原理(第四版)	29.00
信息系统分析与设计(第二版)(陈圣国)	14.00	《微型计算机原理》(第四版)学习指导书	14.00
人工智能技术导论(第二版)	18.00	《微型计算机原理》学习与实验指导	18.00
~~~~~计算机辅助技术类~~~~~		微型计算机原理及接口技术(新世纪)	25.00
电子工程制图(含习题集)(高职)	25.00	微型计算机原理与组成	20.00
工程制图(含习题集)(高职)	22.00	80X86 微机原理与接口技术	26.00
计算机绘图(第二版)(许社教)	25.00	单片机原理及接口技术	15.00
DSP应用技术(高职)	25.00	单片机应用实训教程(高职)	22.00
现代DSP技术	22.00	新编单片机原理与应用(第二版)	22.00
电子电路CAD程序及其应用(高职)	16.00	可编程序控制器原理及应用(第二版)	22.00
电子线路CAD实用教程(第二版)	22.00	计算机控制技术(高职)(温希东)	12.00
电子工艺与电子CAD(高职)	14.00	计算机外部设备(第二版)	17.00
电子电路EDA技术	15.00	微机外围设备的使用与维护(高职)	19.00
EDA技术及应用(第二版)	24.00	~~~~~数据库及计算机语言类~~~~~	
EDA技术综合应用实例与分析	22.00	数据库原理(第二版)(郭盈发)	16.00
EDA技术与数字系统设计(高职)	14.00	数据库原理(高荣芳)	18.00
数字电路EDA设计(高职)	19.00	Visual FoxPro 6.0数据库原理与应用	
~~~~~操作系统类~~~~~		(高职)	21.00
计算机操作系统(第二版)(颜)	17.00	基于VFP和SQL的数据库技术及应用	16.00
计算机操作系统(修订版)(汤)	24.00	SQL Server 2000应用基础与实训教程	
《计算机操作系统》学习指导与题解	16.00	(高职)	19.00
计算机操作系统(王津)	16.00	Oracle数据库SQL和PL/SQL实例教程	
计算机操作系统(孙)	15.00	(高职)	17.00
计算机操作系统(方敏)	28.00	数据库技术及应用(高职)	14.00
计算机操作实训教程(张)	18.00	网络数据库技术及应用(高职)	20.00
操作系统教程——Linux实例分析(孟)	21.00	QBASIC程序设计教程	20.00
Linux操作系统实用教程(高职)	20.00	程序设计与C语言	23.00
Linux实训指导教程(高职)	13.00	《程序设计与C语言》学习指导	16.00
~~~~~图形处理类~~~~~		C语言程序设计实例教程(高职)(丁爱萍)	18.00
多媒体技术及应用(王坤)	21.00	C语言程序设计案例教程(高职)(李培金)	18.00
多媒体软件设计技术(第二版)	20.00	C++程序设计(陈圣国)	14.00
多媒体技术与应用(第二版)(傅献祯)	16.00	C++程序设计语言	20.00
多媒体技术教程(杨安琪)	20.00	《C++程序设计语言》经典题解与实验指导	13.00
多媒体技术基础及其应用(吕辉)	22.00	新编C语言程序设计教程(第二版)	22.00
计算机图形学(张义宽)	20.00	《新编C语言程序设计教程(第二版)》	
计算机图形学(丁爱玲)	14.00	习题解答与实验指导	15.00
计算机图形学(研究生系列)(璩柏青)	26.00	C++Builder 6.0 程序设计(高职)	19.00
计算机图形学——图形的计算与显示原理	22.00	Visual Foxpro 6.0 程序设计教程(丁)	22.00
数字图像处理	20.00	Visual Basic 程序设计(第二版)	20.00
		Visual Basic·NET程序设计教程(高职)	18.00

现代光学(研究生系列)	18.00	计算机数据通信教程(张燕)	15.00
红外物理(研究生系列)	20.00	纠错码——原理与方法(王新梅)	35.00
常用低压电器与可编程序控制器	22.00	编码理论	19.00
可编程逻辑器件原理、开发与应用	22.00	数字通信原理与技术(第二版)	25.00
可编程逻辑器件原理及应用(朱明程)	23.00	现代通信新技术	20.00
多传感器数据融合及其应用(研究生系列)	18.00	现代交换技术	20.00
毕业设计指导(电类)(高职)	28.00	程控交换技术实用教程(高职)(李正吉)	11.00
~~~~~通信与自动控制类~~~~~			
《通信电子线路(第二版)》学习指导	25.00	程控数字交换原理学习指导与习题解析	12.00
光纤通信(方强)	15.00	自动控制原理(赵四化)	16.00
光纤通信(张宝富)	18.00	自动控制原理(薛安克)	19.00
光纤通信(刘增基)	15.00	《自动控制原理》学习指导与题解(方斌)	22.00
卫星通信	12.00	自动控制原理及其应用(高职)	15.00
移动通信(章坚武)	16.00	智能化仪器原理及应用(曹建平)	16.00
蜂窝移动通信技术	23.00	楼宇自动化(高职)	14.00
移动通信技术(高职)	18.00	电梯原理及逻辑排故(高职)	22.00
数字通信系统(强世锦)	17.00	~~~~~家用电器与机电类~~~~~	
数字通信原理与技术(第二版)	25.00	电视原理与系统(赵坚勇)	16.00
数字通信原理(黎洪松)	25.00	电视原理与电视机检修(高职)	16.00
通信原理与通信技术	23.00	电视机原理与技术(李林和)	20.00
《通信原理与通信技术》学习指导	22.00	数字电视技术	20.00
多媒体通信技术(王汝言)	23.00	电器原理与技术(裴昌幸)	24.00
现代通信系统	24.00	调音技术(高职)	16.00
通信电路(沈伟慈)	18.00	音响技术	13.00
通信电源(高职)	14.00	现代音响与调音技术	19.00
通信系统(修订版)(王秉钧)	22.00	工程力学(皮)	12.00
现代通信系统导论(高职)	18.00	机械工程基础(李茹)	26.00
现代通信网概论	25.00	机械设计基础(赵冬梅)	21.00
现代通信理论与技术导论	25.00	机械设计基础(张京辉)	24.00
现代通信技术与网络应用	23.00	机械基础(周家泽)	17.00
现代通信新技术	20.00	机械 CAD/CAM 技术(方新)	20.00
现代通信原理与技术	26.00	计算机辅助机械设计(秦汝明)	19.00
通信工程专业英语	12.00	数控机床原理与编程(陈富安)	20.00
微波技术与天线	17.00	数控加工与编程(高职)	19.00
锁相技术	14.80	机电一体化技术	17.00
计算机通信网(沈)	24.00	电切削加工技术(高职)(詹)	13.00
计算机通信网(修订版)(刘后铭)	18.00	液压与气动技术(朱梅)	19.00
		特种加工技术(周旭光)	10.00

~~~~~  
 欢迎来函索取本社最新书目和教材介绍, 欢迎投稿!

从邮局或银行汇款邮购者, 汇款单上务必写清收书人姓名、地址、邮编、电话。款到后我社将挂号发书, 加收5元包装邮寄费(一次购书30元以上者可免收邮费)。

通信地址: 西安市太白南路2号      西安电子科技大学出版社发行部      邮 编: 710071

电 话: (029) 88201467

传 真: (029) 88213675

主 页: <http://www.xduph.com>

E-mail: [xdupfxb@pub.xaonline.com](mailto:xdupfxb@pub.xaonline.com)

# 目 录

|                                |          |                             |           |
|--------------------------------|----------|-----------------------------|-----------|
| 绪论 .....                       | 1        | 思考与练习题 .....                | 27        |
| 0.1 电机概述 .....                 | 1        |                             |           |
| 0.1.1 电机的主要类型 .....            | 1        |                             |           |
| 0.1.2 电机及电力拖动技术在国民经济中的作用 ..... | 2        |                             |           |
| 0.2 本课程的性质、内容与学习方法 .....       | 2        |                             |           |
| <b>第1章 直流电机</b> .....          | <b>4</b> | <b>第2章 直流电动机的电力拖动</b> ..... | <b>29</b> |
| 1.1 直流电机的基本工作原理 .....          | 4        | 2.1 电力拖动系统的运动方程式 .....      | 29        |
| 1.1.1 直流发电机的基本工作原理 .....       | 4        | 2.1.1 单轴电力拖动系统的运动方程式 .....  | 30        |
| 1.1.2 直流电动机的基本工作原理 .....       | 5        | 2.1.2 电力拖动系统的运动状态分析 .....   | 31        |
| 1.2 直流电机的基本结构与铭牌 .....         | 6        | 2.2 生产机械的负载转矩特性 .....       | 32        |
| 1.2.1 直流电机的基本结构 .....          | 6        | 2.2.1 恒转矩负载特性 .....         | 32        |
| 1.2.2 直流电机的铭牌 .....            | 10       | 2.2.2 恒功率负载特性 .....         | 32        |
| 1.2.3 直流电机的主要系列 .....          | 11       | 2.2.3 通风机型负载特性 .....        | 33        |
| 1.3 直流电机的磁场 .....              | 12       | 2.3 他励直流电动机的机械特性 .....      | 33        |
| 1.3.1 直流电机的励磁方式 .....          | 12       | 2.3.1 他励直流电动机的机械特性方程式 ..... | 33        |
| 1.3.2 直流电机的空载磁场和磁化曲线 .....     | 13       | 2.3.2 他励直流电动机的固有机械特性 .....  | 34        |
| 1.3.3 负载磁场和电枢反应 .....          | 15       | 2.3.3 他励直流电动机的人为机械特性 .....  | 35        |
| 1.4 直流电机的基本公式 .....            | 16       | 2.3.4 电力拖动系统稳定运行的条件 .....   | 36        |
| 1.4.1 直流电机的电枢电动势 .....         | 16       | 2.4 他励直流电动机的启动和反转 .....     | 37        |
| 1.4.2 直流电机的电磁转矩 .....          | 16       | 2.4.1 他励直流电动机的启动 .....      | 38        |
| 1.4.3 直流电机的电磁功率 .....          | 17       | 2.4.2 他励直流电动机的反转 .....      | 40        |
| 1.5 直流电动机的基本方程式 .....          | 18       | 2.5 他励直流电动机的调速 .....        | 40        |
| 1.5.1 电动势平衡方程式 .....           | 18       | 2.5.1 调速指标 .....            | 41        |
| 1.5.2 转矩平衡方程式 .....            | 19       | 2.5.2 他励直流电动机的调速方法 .....    | 42        |
| 1.5.3 功率平衡方程式 .....            | 19       | 2.6 他励直流电动机的制动 .....        | 47        |
| 1.6 直流电动机的工作特性 .....           | 21       | 2.6.1 能耗制动 .....            | 47        |
| 1.6.1 他励直流电动机的工作特性 .....       | 21       | 2.6.2 反接制动 .....            | 50        |
| 1.6.2 串励直流电动机的工作特性 .....       | 22       | 2.6.3 回馈制动 .....            | 53        |
| * 1.7 直流电机的换向 .....            | 23       | 小结 .....                    | 54        |
| 1.7.1 直流电机的换向过程 .....          | 24       | 思考与练习题 .....                | 55        |
| 1.7.2 影响换向的电磁原因 .....          | 24       |                             |           |
| 1.7.3 改善换向的方法 .....            | 25       | <b>第3章 变压器</b> .....        | <b>57</b> |
| 小结 .....                       | 26       | 3.1 变压器的基本工作原理和基本结构 .....   | 57        |
|                                |          | 3.1.1 变压器的基本工作原理 .....      | 57        |

|                                   |           |                                    |            |
|-----------------------------------|-----------|------------------------------------|------------|
| 3.1.2 变压器的应用和分类 .....             | 58        | 4.3.2 交流绕组的排列和连接 .....             | 104        |
| 3.1.3 变压器的基本结构 .....              | 59        | 4.3.3 异步电动机的感应电动势 .....            | 108        |
| 3.1.4 变压器的铭牌与主要系列 .....           | 62        | 4.4 三相异步电动机的空载运行 .....             | 109        |
| 3.2 单相变压器的空载运行 .....              | 64        | 4.4.1 空载运行时的物理情况 .....             | 109        |
| 3.2.1 空载运行时的物理状况 .....            | 64        | 4.4.2 电动势平衡方程式和等效<br>电路 .....      | 110        |
| 3.2.2 感应电动势和漏电动势 .....            | 65        | 4.5 三相异步电动机的负载运行 .....             | 110        |
| 3.2.3 空载电流和空载损耗 .....             | 66        | 4.5.1 负载运行时的物理情况 .....             | 110        |
| 3.2.4 电动势平衡方程式和等效电路 .....         | 66        | 4.5.2 负载运行时的基本方程式 .....            | 112        |
| 3.2.5 空载运行时的相量图 .....             | 67        | 4.5.3 负载运行时的等效电路 .....             | 113        |
| 3.3 单相变压器的负载运行 .....              | 67        | 4.6 三相异步电动机的功率和转矩 .....            | 117        |
| 3.3.1 负载运行时的物理状况 .....            | 68        | 4.6.1 功率转换过程 .....                 | 118        |
| 3.3.2 负载运行时的基本方程式 .....           | 68        | 4.6.2 功率平衡方程式 .....                | 118        |
| 3.3.3 负载运行时的等效电路 .....            | 69        | 4.6.3 转矩平衡方程式 .....                | 119        |
| 3.4 变压器参数的测定 .....                | 72        | 4.7 三相异步电动机的工作特性 .....             | 120        |
| 3.4.1 空载试验 .....                  | 72        | 4.8 三相异步电动机参数的测定 .....             | 122        |
| 3.4.2 短路试验 .....                  | 73        | 4.8.1 空载试验 .....                   | 122        |
| 3.5 变压器的运行特性 .....                | 75        | 4.8.2 堵转试验 .....                   | 124        |
| 3.5.1 变压器的外特性和电压变化率 .....         | 76        | 小结 .....                           | 125        |
| 3.5.2 变压器的损耗和效率特性 .....           | 76        | 思考与练习题 .....                       | 126        |
| 3.6 三相变压器 .....                   | 78        |                                    |            |
| 3.6.1 三相变压器的磁路系统 .....            | 79        |                                    |            |
| 3.6.2 三相变压器的电路系统——<br>连接组 .....   | 80        |                                    |            |
| 3.7 其他常用变压器 .....                 | 84        |                                    |            |
| 3.7.1 自耦变压器 .....                 | 84        |                                    |            |
| 3.7.2 仪用互感器 .....                 | 85        |                                    |            |
| 小结 .....                          | 87        |                                    |            |
| 思考与练习题 .....                      | 88        |                                    |            |
| <b>第4章 三相异步电动机</b> .....          | <b>91</b> |                                    |            |
| 4.1 三相异步电动机的基本工作原理 .....          | 92        |                                    |            |
| 4.1.1 三相定子绕组的旋转磁场和<br>旋转磁动势 ..... | 92        |                                    |            |
| 4.1.2 三相异步电动机的基本工作<br>原理 .....    | 95        |                                    |            |
| 4.2 三相异步电动机的基本结构和铭牌 .....         | 96        |                                    |            |
| 4.2.1 三相异步电动机的基本结构 .....          | 96        |                                    |            |
| 4.2.2 三相异步电动机的铭牌 .....            | 100       |                                    |            |
| 4.2.3 三相异步电动机的主要系列<br>简介 .....    | 101       |                                    |            |
| 4.3 三相异步电动机的定子绕组和<br>感应电动势 .....  | 102       |                                    |            |
| 4.3.1 交流绕组的基本知识 .....             | 102       |                                    |            |
|                                   |           | <b>第5章 三相异步电动机的电力<br/>拖动</b> ..... | <b>129</b> |
|                                   |           | 5.1 三相异步电动机的电磁转矩<br>表达式 .....      | 129        |
|                                   |           | 5.1.1 电磁转矩的物理表达式 .....             | 129        |
|                                   |           | 5.1.2 电磁转矩的参数表达式 .....             | 130        |
|                                   |           | 5.1.3 电磁转矩的实用表达式 .....             | 132        |
|                                   |           | 5.2 三相异步电动机的机械特性 .....             | 132        |
|                                   |           | 5.2.1 固有机械特性 .....                 | 133        |
|                                   |           | 5.2.2 人为机械特性 .....                 | 134        |
|                                   |           | 5.3 三相异步电动机的启动 .....               | 136        |
|                                   |           | 5.3.1 三相笼型异步电动机的启动 .....           | 136        |
|                                   |           | 5.3.2 三相绕线转子异步电动机的<br>启动 .....     | 142        |
|                                   |           | 5.4 三相异步电动机的制动 .....               | 144        |
|                                   |           | 5.4.1 能耗制动 .....                   | 144        |
|                                   |           | 5.4.2 反接制动 .....                   | 146        |
|                                   |           | 5.4.3 回馈制动 .....                   | 148        |
|                                   |           | 5.5 三相异步电动机的调速 .....               | 150        |
|                                   |           | 5.5.1 变极调速 .....                   | 150        |
|                                   |           | 5.5.2 变频调速 .....                   | 153        |
|                                   |           | 5.5.3 改变转差率调速 .....                | 156        |

|                            |     |                             |     |
|----------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| 小结 .....                   | 160 | 7.3.2 交流测速发电机 .....         | 199 |
| 思考与练习题 .....               | 161 | 7.4 自整角机 .....              | 201 |
| <b>第 6 章 其他交流电动机</b> ..... | 164 | 7.4.1 力矩式自整角机的工作原理 .....    | 201 |
| 6.1 单相异步电动机 .....          | 164 | 7.4.2 控制式自整角机的工作原理 .....    | 203 |
| 6.1.1 单相绕组异步电动机的           |     | 7.5 旋转变压器 .....             | 204 |
| 工作原理 .....                 | 164 | 7.5.1 正余弦旋转变压器的工作           |     |
| 6.1.2 两相绕组异步电动机的           |     | 原理 .....                    | 204 |
| 机械特性 .....                 | 165 | 7.5.2 线性旋转变压器的工作原理 .....    | 205 |
| 6.1.3 单相异步电动机的主要类型和        |     | 小结 .....                    | 206 |
| 启动方法 .....                 | 166 | 思考与练习题 .....                | 207 |
| 6.1.4 单相异步电动机的应用 .....     | 168 | <b>第 8 章 电力拖动系统中电动机的</b>    |     |
| 6.2 三相同步电动机 .....          | 169 | <b>选择</b> .....             | 208 |
| 6.2.1 三相同步电动机的基本结构 .....   | 170 | 8.1 电动机种类、电压、转速和结构          |     |
| 6.2.2 三相同步电动机的工作原理 .....   | 171 | 形式的选择 .....                 | 208 |
| 6.2.3 三相同步电动机的相量图与         |     | 8.1.1 电动机种类的选择 .....        | 208 |
| 电磁功率 .....                 | 171 | 8.1.2 电动机电压等级的选择 .....      | 209 |
| 6.2.4 同步电动机的 V 形曲线及功率      |     | 8.1.3 电动机额定转速的选择 .....      | 209 |
| 因数调节 .....                 | 172 | 8.1.4 电动机结构形式的选择 .....      | 209 |
| 6.2.5 同步电动机的启动 .....       | 173 | 8.2 电动机容量选择的基本知识 .....      | 210 |
| * 6.3 单相(微型)同步电动机 .....    | 174 | 8.2.1 电动机的温升和绝缘 .....       | 210 |
| 6.3.1 永磁式微型同步电动机 .....     | 175 | 8.2.2 电动机的发热和冷却 .....       | 211 |
| 6.3.2 磁阻式(反应式)同步电动机 .....  | 175 | 8.3 电动机容量选择的基本方法 .....      | 214 |
| 6.3.3 磁滞式同步电动机 .....       | 176 | 8.3.1 连续工作制电动机容量的           |     |
| * 6.4 直线异步电动机 .....        | 177 | 选择 .....                    | 214 |
| 6.4.1 直线异步电动机的工作原理 .....   | 178 | 8.3.2 短时工作制电动机容量的           |     |
| 6.4.2 直线异步电动机的结构形式 .....   | 178 | 选择 .....                    | 216 |
| 小结 .....                   | 180 | 8.3.3 断续周期工作制电动机容量的         |     |
| 思考与练习题 .....               | 181 | 选择 .....                    | 218 |
| <b>第 7 章 控制电机</b> .....    | 182 | 8.3.4 选择电动机容量的统计法和          |     |
| 7.1 伺服电动机 .....            | 182 | 类比法 .....                   | 219 |
| 7.1.1 直流伺服电动机 .....        | 183 | 小结 .....                    | 220 |
| 7.1.2 交流伺服电动机 .....        | 186 | 思考与练习题 .....                | 220 |
| 7.2 步进电动机 .....            | 190 | <b>附录 本课程中常用的基础知识</b> ..... | 222 |
| 7.2.1 三相磁阻式步进电动机的结构和       |     | 附录 A 磁场及其基本物理量 .....        | 222 |
| 工作原理 .....                 | 190 | 附录 B 安培定律及电磁感应定律 .....      | 224 |
| 7.2.2 步进电动机的运行特性 .....     | 194 | 附录 C 常用铁磁材料及其特性 .....       | 225 |
| 7.2.3 步进电动机的应用 .....       | 197 | 附录 D 磁路的概念和基本定律 .....       | 229 |
| 7.3 测速发电机 .....            | 198 | <b>参考文献</b> .....           | 235 |
| 7.3.1 直流测速发电机 .....        | 198 |                             |     |

# 绪 论

## 0.1 电 机 概 述

电机是一种利用电磁感应定律和安培力定律将能量或信号进行转换或变换的电磁机械装置。

### 0.1.1 电机的主要类型

电机的种类繁多，按其功能分类，可分成常规电机和控制电机，具体分类如图 0.1 所示。

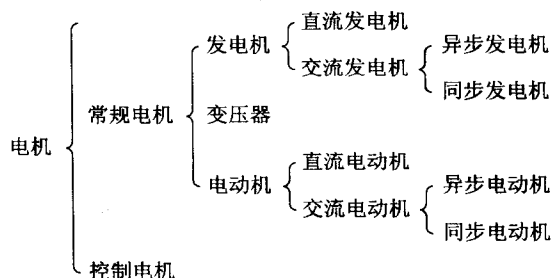


图 0.1 电机的分类

常规电机的主要任务是完成能量的转换。其功能如下：

发电机——将机械能转换成电能输出。

电动机——将电能转换成机械能输出，主要用于电力拖动系统中，带动生产机械运转。

变压器——将一种电压等级的交流电能变换成同频率的另一种电压等级的交流电能。

控制电机的主要任务是完成控制信号的传递和转换，通常用于自动控制系统中，作检测、校正及执行元件使用。其主要包括交、直流伺服电动机，步进电动机，交、直流测速发电机，自整角机，旋转变压器等。其种类繁多，不胜枚举。各类电机的功能如下：

伺服电动机——将控制电压信号转换成转轴上的角位移或角速度输出，作执行元件。

步进电动机——将电脉冲信号转换成转轴上的角位移或线位移输出，作执行元件或驱动元件。

测速发电机——将转速信号转换成电压信号输出，主要作检测元件。

### 0.1.2 电机及电力拖动技术在国民经济中的作用

在国民经济生产中,电机工业是机械工业的一个重要组成部分,电机是机电一体化中机和电的结合部位,是机电一体化的一个很重要的基础,电机可称为电气化的心脏。电机对国民经济的发展起着重要的作用,并随着国民经济和科学技术的发展而不断发展。

电机的发展又与电能的发展紧密联系在一起。电能是现代社会一种最主要的能源,这主要是由于它的生产和变换比较经济,传输和分配比较容易,使用和控制比较方便,而要实现电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制都离不开电机。

在电力工业中,发电机和变压器是电站和变电所的主要设备。在电站,利用发电机可将原始能源(如:水力、风力、热力、化学能、太阳能、核能等)转换为电能。在变电所,电能远距离传输前,利用升压变压器把发电机发出的低压交流电变换成高压交流电,而电能供给用户使用前,利用降压变压器把来自高压电网的高电压变换成低电压后才能安全使用。在机械、冶金、化工等工业企业中,大量应用电动机把电能转换为机械能,去拖动机床、起重机、轧钢机、电铲、抽水机、鼓风机等各种生产机械。在现代化农业生产中,电力排灌、播种、收割等农用机械都需要规格不同的电动机去拖动。在交通运输业中,电车、地铁、电动自行车、电梯、飞机、轮船等也需要各种电动机。在医疗器械及家用电器中也离不开功能各异的小功率电动机。在工业、航天和国防科学等领域的自动控制技术中,各式各样小巧灵敏的控制电机被广泛地作为检测、放大、执行和解算元件。

在现代工业、农业、交通运输等各行业,为了实现生产工艺过程的各种要求,需要广泛采用各种各样的生产机械,其中,一部分生产机械采用气动或液压拖动,而大多数生产机械都采用电动机拖动即电力拖动。

电力拖动具有其他拖动方式无法比拟的优点。第一,电力拖动比以蒸汽、水力、压缩空气等为动力的拖动效率高,且电动机与被拖动机械的连接简便;第二,电力拖动所用的电动机类型很多,不同的电动机具有不同的运行特性,可满足不同生产机械的需要;第三,电力拖动系统各参数的检测、信号的变换与传送方便,易于实现自动控制。因此,电力拖动已成为现代工农业中最广泛的拖动方式,而且随着近代电力电子技术和计算机技术的发展以及自动控制理论的应用,电力拖动控制装置的特性品质正在得到不断的提高,从而可提高生产机械运转的准确性、可靠性、快速性和生产过程的自动化程度,便于提高劳动生产率和产品质量,所以电力拖动也是实现工业电气自动化的基础,在国民经济发展中发挥着越来越重要的作用。现在,一些工厂企业的生产过程正从单机、局部自动化发展到全盘、综合自动化,已经出现了大批自动生产线,而且一些自动化车间和自动化工厂已经在我国出现。

## 0.2 本课程的性质、内容与学习方法

本课程是工业电气自动化、电气技术、机电一体化等电类专业的一门重要的专业基础课,既有基础性又有专业性。

“电机及拖动基础”是“电机原理”和“电力拖动基础”两门课程内容的有机结合，主要分析研究直流电机、变压器、三相异步电动机的基本理论及其电力拖动的基本规律，简单介绍常用交流电机、常用控制电机的原理及应用和电力拖动系统电动机容量的选择问题。

本课程主要是运用“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“电机及拖动基础”课程中，不仅有理论的分析推导、磁场的抽象描述，而且还要用基本理论去分析研究比较复杂的带有机、电、磁综合性的工程实际问题，这是本课程的特点，也是学习的难点。因此，必须要有一个良好的学习方法，才能学好本课程。这里提供以下学习方法供大家参考：

(1) 学习之前，必须理解和掌握电和磁的基本概念，熟练运用电磁感应定律、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。

(2) 学习过程中，对于电机结构，要弄清各主要部件的组成和作用；对于有关公式，要从物理概念上去理解和记忆，不要死记硬背；本课程涉及电机的类型较多，要注意各种电机结构的异同点、电磁关系和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；分析实际问题时，要运用工程的观点和方法，突出主要矛盾，忽略次要矛盾，从而简化实际问题的分析和计算。

(3) 为了提高课堂教学效果，课前应预习，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，对新的名词和术语及相关内容有所了解，便于有的放矢地听课；课后应及时复习和小结，并选做适当的思考与练习题，以巩固所学的理论知识，提高理解和应用能力。

(4) 必须进行必要的实验和实习，一是对基本理论进行验证，二是培养和提高学生的实验操作技能和工作能力。

“电机及拖动基础”课程将为后续课程——“工厂电气控制设备”、“电力电子技术”、“自动控制理论”、“调速系统”等的学习作基础知识准备，为日后工作中对电力拖动设备的技术管理和生产第一线选配、安装调试、操作、维护与检修电力拖动设备打下良好的基础。

# 第1章 直流电机

## 【学习目标】

- (1) 熟练掌握直流电机的基本工作原理。
- (2) 熟悉直流电机的基本结构,理解铭牌数据的含义。
- (3) 理解直流电机的励磁方式、磁场的产生及电枢反应。
- (4) 理解和掌握感应电动势、电磁转矩、电磁功率等基本公式。
- (5) 掌握他励直流电动机运行时的基本方程式,熟悉工作特性。
- (6) 了解直流电机的换向。

直流电机是将直流电能与机械能进行相互转换的旋转电机,将机械能转换为电能的是发电机,将电能转换为机械能的是电动机。

直流电机与交流电机相比,直流电机结构复杂,成本高,维修不便,而且有换向问题。但直流电动机具有良好的启动性能和调速性能,所以它仍被广泛应用于启动和调速要求较高的生产机械中,如起重机、矿井提升设备、电力机车、龙门刨床、轧钢机等。在自动控制系统中,小容量的直流电动机应用也很广泛。直流发电机则作为各种直流电源使用。目前,由晶闸管整流元件组成的直流电源正逐步取代直流发电机,但因直流发电机的供电质量较好,故在一些特殊工作场所仍被应用,如作为大型同步发电机的励磁电源以及在电解、电镀和某些化工工业中的应用。

本章主要介绍直流电机的基本工作原理、结构和运行特性。

## 1.1 直流电机的基本工作原理

### 1.1.1 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定律。电磁感应定律告诉我们,在均匀磁场中,当导体切割磁感应线时,导体中就有感应电动势产生。若磁感应线、导体及其运动方向三者相互垂直,则导体中产生的感应电动势  $e$  的大小为

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

式中:  $B_x$ ——磁感应强度或磁通密度(T 或  $\text{Wb}/\text{m}^2$ );

$l$ ——导体切割磁感应线的有效长度(m);

$v$ ——导体与磁场的相对切割速度(m/s);

$e$ ——导体上的感应电动势(V)。

由式(1-1)可知,对于长度一定的导体来说,导体中感应电动势的大小由导体所在处的磁感应强度和导体切割磁场的速度所决定,而感应电动势的方向可由右手定则来确定。

图 1-1 是一台最简单的直流发电机的工作原理图。N 和 S 是一对固定的磁极,两磁极之间有一个可以转动的圆柱体铁心,称为电枢。在电枢表面的槽内放置了一个电枢线圈  $abcd$ ,线圈的两端分别接到相互绝缘的两个圆弧形铜片(称为换向片)上,由换向片构成的圆柱体称为换向器,换向片分别与固定不动的电刷 A 和 B 保持滑动接触,这样,线圈  $abcd$  可以通过换向片和电刷与外电路接通。电枢铁心、电枢绕组和换向器构成的整体称为转子或电枢。电枢在原动机拖动下转动,把机械能转变为电能供给接在两电刷间的负载。

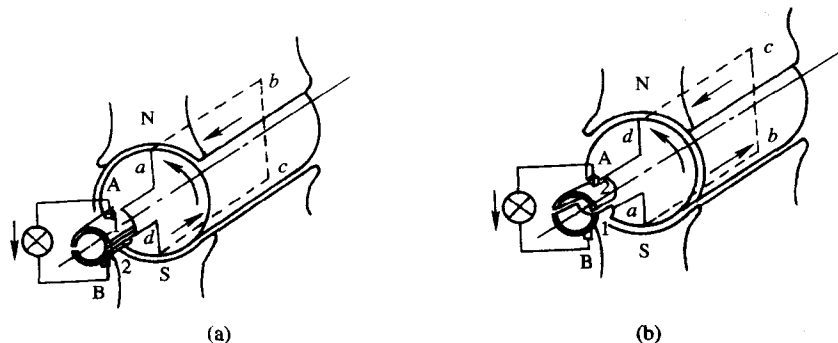


图 1-1 直流发电机的工作原理图

(a)  $ab$  边在 N 极下,  $cd$  边在 S 极上的电动势方向; (b) 转子转过  $180^\circ$  后的电动势方向

在图 1-1(a)中,电枢逆时针恒速旋转时,根据电磁感应定律可知,线圈的  $ab$ 、 $cd$  两边将因切割磁感应线而产生感应电动势,由右手定则可以判断出感应电动势的方向为  $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ,电刷 A 为正极,电刷 B 为负极。外电路上的电流方向是由正极 A 流出,经负载流向负极 B。

当电枢转过  $180^\circ$  之后,如图 1-1(b)所示,此时线圈的电动势方向变为  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ,电刷 A 原来与换向片 1 接触,现在变为与换向片 2 接触,电刷 B 原来与换向片 2 接触,现在变为与换向片 1 接触,这样电刷 A 仍为正极,电刷 B 仍为负极。以上分析表明,当原动机拖动电枢线圈旋转时,线圈中的感应电动势方向不断改变,而通过换向器和电刷的作用,在电刷 A、B 间输出的电动势的方向是不变的,即为直流电动势。若在电刷 A、B 间接上负载,发电机就能向负载提供直流电能,这就是直流发电机的工作原理。

### 1.1.2 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是基于安培定律的。若均匀磁场  $B_x$  与导体相互垂直,且导体中通以电流  $i$ ,则作用于载导体上的电磁力  $F$  为

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

式中:  $l$ ——导体的有效长度(m);

$i$ ——导体中的电流(A);

$F$ ——导体所受的电磁力(N)。

由式(1-2)可知,对于长度一定的导体来说,所受电磁力的大小由导体所在处的磁感应强度和通过导体的电流所决定,而电磁力的方向可由左手定则来确定。

如果在图 1-1(a)、(b)中去掉原动机和电刷两端所接的负载,在 A、B 两电刷间施加一直流电源,就成为一台最简单的直流电动机,如图 1-2 所示。

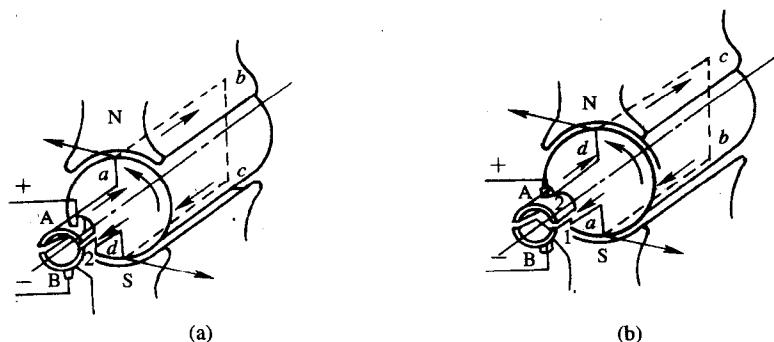


图 1-2 直流电动机的工作原理图

(a)  $ab$  边在 N 极下,  $cd$  边在 S 极上的电流方向; (b) 转子转过  $180^\circ$  后的电流方向

如图 1-2(a)所示,当  $ab$  边在 N 极下,  $cd$  边在 S 极上,电流从电刷 A、换向片 1、线圈边  $ab$  和  $cd$ ,最后经换向片 2 及电刷 B 回到电源的负极时,线圈中的电流方向为  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。根据左手定则可知,此瞬间导体  $ab$  所受电磁力向左,导体  $cd$  所受电磁力向右,这样就在线圈  $abcd$  上产生一个转矩,称为电磁转矩,使电枢沿逆时针方向旋转。

当电枢转过  $180^\circ$  之后,如图 1-2(b)所示,此时电流流经的途径是通过电刷 A、换向片 2、线圈边  $dc$  和  $ba$ ,最后经换向片 1 及电刷 B 回到电源的负极。线圈中的电流方向为  $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 。因此线圈中的电流改变了方向,但这时两个线圈边所受电磁力的方向仍使电枢沿逆时针方向旋转。

从以上分析可知,一个线圈边从一个磁极范围转到相邻异性磁极范围时,通过线圈的电流方向就改变一次,而电枢的转动方向仍保持不变。改变线圈中电流的方向是由换向器和电刷来完成的。

实际的直流电动机中,有许多线圈牢固地嵌在电枢铁心槽中。当线圈(导体)中通过电流时,处在磁场中的导体因受到电磁力而运动,即带动整个电枢旋转,通过转轴便可带动工作机械。这就是直流电动机的基本工作原理。

综上所述,可以看出:一台直流电机既可以作为电动机运行,又可以作为发电机运行,这主要取决于不同的外部条件。若将直流电源加在电刷两端,电机就能将直流电能转换为机械能,作电动机运行;若用原动机拖动电枢旋转,输入机械能,电机就将机械能转换为直流电能,作发电机运行。这种运行状态的可逆性称为直流电机的可逆运行原理。实际的直流发电机和直流电动机,因为设计制造时考虑了长期作为发电机或电动机运行性能方面的不同要求,在结构上稍有区别,所以并不像理论上分析的那样完全可逆。

## 1.2 直流电机的基本结构与铭牌

### 1.2.1 直流电机的基本结构

直流电机在结构上主要由两部分组成:① 静止部分,即定子;② 转动部分,即转子或