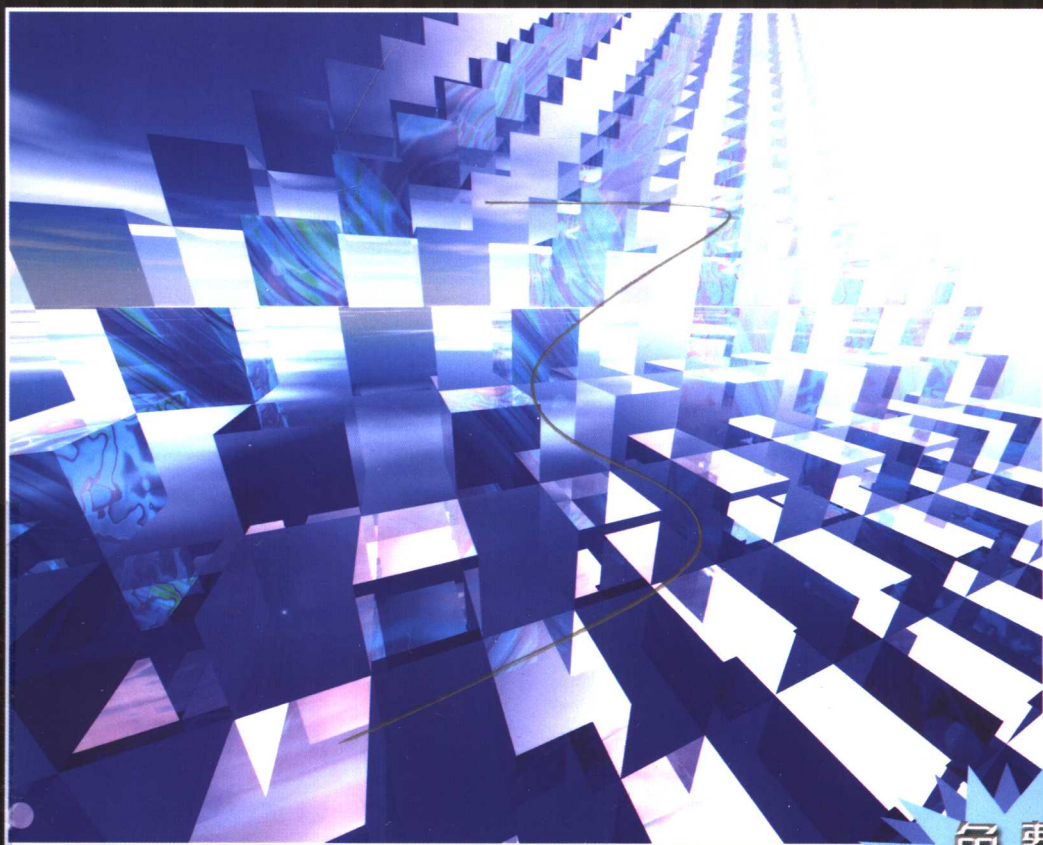




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电机及拖动基础

汤天浩 主编



免费  
电子课件

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，针对自动化、电气工程、机械和电子工程等非电机专业大学本科学学生编写。为适应当前教育改革和学科发展的需要，将原《电机学》与《电力拖动基础》两门课程的主要内容合并为《电机及拖动基础》。全书分为4篇，共13章。第1篇是全书的基础，分别阐述了电机的基本原理，包括电磁感应、机电能量转换和旋转电机的基本概念、结构与模型；电力拖动动力学基础，包括电力拖动系统的运动方程、稳态和动态分析等内容。在此基础上，第2篇专门分析和讨论了直流电机及拖动，包括：电机的原理、结构和运行特性，电机的起动、制动和调速等问题；第3篇为交流电机及拖动，包括了变压器、异步电机和同步电机的原理、结构、运行特性和交流传动等问题。第4篇介绍了电机的选择和校验，以及特种电机。

本书适用于普通高等学校本科非电机专业，亦可作为职工大学、夜大以及大专院校有关专业的教材，也可供有关工程技术人员阅读和参考，其中部分较深入的内容可作为研究生学习和研究的参考资料。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师发邮件至：wbj@mail.machininfo.gov.cn 索取或登录 <http://www.cmpedu.com/> 下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动基础/汤天浩主编. —北京：机械工业出版社，2008.3  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-23573-6

I. 电… II. 汤… III. ①电机—高等学校—教材②电力传动—高等学校—教材 IV. TM3 TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第024983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：王保家 责任校对：陈延翔

封面设计：张 静 责任印制：洪汉军

北京振兴源印务有限公司印刷厂印刷

2008年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·19.25印张·449千字

标准书号：ISBN 978-7-111-23573-6

定价：30.00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) 88379727

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书包括了原《电机学》和《电力拖动基础》两门课程的主要内容，适合非电机专业的各专业学习电机原理与拖动基础之用，也可供有关专业师生、工程技术人员和其他人员参考。

本教材的编写始终贯彻以电机基本原理及电力拖动基础知识为主线的指导思想，在内容方面以电力拖动系统中使用最为广泛的电机及拖动形式为重点，既参考和吸收了现有教材的精华，也融入了编者的见解和思考。在编写过程中，从选材、内容安排到阐述方法等方面都作了一些新的尝试。本书有别于其他同类教材的特点是：

1. 作为全书的理论基础，第1篇集中介绍了基本电磁规律，机电能量转换原理，旋转电机的基本结构、模型和工作原理，以及电机发热等各种电机所共有的基本原理和知识，为后续章节从基本电机模型和机电能量转换原理来分析具体电机奠定了理论基础。

2. 作为电力拖动系统的共同基础，在第1篇的第4章除了介绍电力拖动系统的运动方程、机械负载的转矩特性等传统内容外，新增加了电力拖动系统稳态分析和动态分析的内容，并在动态分析中集中讨论了电机的转矩、电流和发热等动态过程的一般过渡状态，以便于在后续章节分析电机的起动、制动和调速的动态过程。

3. 在有关磁路的章节中，强调了气隙磁场的作用，增强了线性磁路分析，由此自然引出等效电路的概念和方法；介绍了非线性磁路分析的基本方法和计算机模拟的基本思路，试图为研究和分析变压器和电机的磁场提供更为清晰的思路。

4. 在变压器章节新增了并联等效电路模型和新型电磁材料、新型变压器的有关内容，以适应电磁材料新的发展和应用。

5. 在介绍交流电机理论之前，将交流电机的电枢绕组、电动势以及脉振磁动势和旋转电机等交流电机的共性问题集中进行分析和讨论，有助于更好地学习和理解交流异步电机和同步电机的结构和原理。

6. 在电机原理部分主要阐述电机的基本概念、结构和原理，简化了繁琐的磁场绕组连接等内容，着重从模型电机出发建立电机的基本方程和等效电路，进而分析电机的基本特性。引入计算机仿真方法，通过计算机模拟，更为直观地表现电机内部的磁场分布。

7. 在电力拖动部分则强调基本原理的实际应用，主要分析电动机在起动、制动和调速状态的静态和动态特性，并适当说明了电动机在这些工作状态下的简单控制方法。删除了过去复杂的起动电阻计算等内容，新增了采用电力电子变流器实现电动机软起动等内容。

8. 为适应当前电机发展的趋势，新增了特种电机及其新发展的内容，以拓展视野，并为实际应用提供多种可能的选择。

全书共分为13章，其中有些较深内容的章节上加了“\*”号，主要内容的教学约为54~72学时，各学校可根据各自教学大纲的需要选择内容和安排教学。本书试图突破传





统的教学模式,按照由电机模型得到等效电路,然后推出电机方程,再分析电机特性这样的思路组织课程内容和进行教学。作为全书的基础,第1篇集中了有关电磁定律、磁路分析、机电能量变换、电机模型及有关电力拖动的基本概念等基本知识,希望能为后续章节的学习奠定理论基础。但由于第2章和第3章主要是从机电能量转换角度来建立电机的转矩方程,与传统教材有较大差异,建议任课老师可根据教学要求、课程学时数和学生程度有所选择,也可跳过这两章,直接进入后续章节。最后一章的内容可根据应用需求而选择。

本书由上海海事大学汤天浩教授主编,参加编写的有上海海事大学谢卫教授、镇江船艇学院窦金生教授。汤天浩编写了第1、2篇并负责全书的统稿;谢卫编写了第3篇的8~10章、第4篇的13章,并负责全书的修改和电子课件的编撰;窦金生教授编写了第11章。特别是本书荣幸地邀请到中国电源学会变压器专业委员会主任、台达上海研发中心电磁材料研发部负责人陈为教授编写了第7章,他在电磁材料和变压器方面的深厚造诣使本书增色许多。此外,本书还邀请到专门从事电机测试的吴晓慧工程师编写了第12章,她在电机标准化和测试方面的知识和经验使本书更加切合实际。因此,本书凝聚了集体智慧和辛劳。

本书是在前版《电机与拖动基础》上重新组织和编写的,应特别感谢前书所有参编作者的历史贡献。姚刚博士制作了部分精美的图表,陈意惠老师提供了部分习题和插图,在此谨向他们的辛勤工作表示感谢。

本书还应感谢法国中央理工大学和南特综合理工大学的邀请,使笔者在2005~2006年在那里担任访问教授。有幸了解国外有关电机与拖动研究和教学的新方法,收集了大量资料。特别是要感谢南特综合理工大学电气工程研究所的刘卫平博士,为本书提供了电机磁场分布的计算机模拟结果和图形。

全书由上海大学陈伯时教授和上海交通大学陈敏逊教授担任主审。作为本人的博士导师和学术领路人,两位恩师自始至终地关心和指导着本书编写的全过程,从编写大纲的拟定到内容的选取,以及表述的方式,提出了许多宝贵意见,作者对此表示衷心的感谢。

本书的成功出版应归功于机械工业出版社的努力,高等教育分社的领导、责任编辑从本书的策划、申报、立项到编辑出版花费了大量的心血。希望大家共同的努力,能使广大读者受益。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件至 [wbj@mail.machineinfo.gov.cn](mailto:wbj@mail.machineinfo.gov.cn) 索取或登录 <http://www.cmpedu.com/> 下载。

尽管我们在编写本书过程中倾注了许多心血和创意,但因作者水平所限,时间有限,还会存在许多缺点和不足,恳请广大读者批评指正。

汤天浩  
于法国南特



# 常用符号表

## 1. 元件和装置用的文字符号 (按国家标准 GB 7159—1987)

A	A 相绕组, 电枢绕组	Q	断路器
B	B 相绕组	QS	隔离开关
C	C 相绕组	R	电阻器、变阻器
C	电容器	RP	电位器
F	励磁绕组	SA	控制开关, 选择开关
FU	熔断器	SB	按钮开关
G	发电机	SM	伺服电机
K	继电器, 接触器	T	变压器
KA	继电器	TA	电流互感器, 霍尔电流传感器
KM	接触器	TC	调压变压器
L	电感器, 电抗器	TI	逆变变压器
M	电动机 (总称)	TU	自耦变压器
MA	异步电动机	U	变换器, 调制器
MD	直流电动机	UCR	可控整流器
MS	同步电动机	UI	逆变器
PA	电流表	UPE	电力电子变换器
PC	脉冲计数器	V	晶闸管整流装置
PV	电压表		

## 2. 常见下角标

A	A 相绕组	L	负载 (Load)
a	电枢绕组 (armature); a 相绕组	l	线值 (line)
add	附加 (additional)	lim	极限, 限制 (limit)
av	平均值 (average)	m	磁的 (magnetic); 主要部分 (main)
B	B 相绕组	m, mech	机械的 (mechanical)
b	b 相绕组; 制动 (brake)	m, max	最大值 (maximum)
bl	堵转 (block)	min	最小值 (minimum)
C	C 相绕组	N	额定值, 标称值 (nominal)
c	环路、环流 (circulating); 铁心 (core)	p	磁极 (poles); 峰值 (peak value)
cr	临界 (critical)	q	q 轴 (quadrature axis)
d	直流 (direct current); d 轴 (direct axis)	r	转子 (rotator); 反向 (reverse)
e	电 (electricity); 电源 (electric source)	ref	参考 (reference)
em	电磁的 (electric-magnetic)	rec	整流器 (rectifier)
f	磁场 (field); 正向 (forward)	s	定子 (stator); 串联 (series)
g	气隙 (gap)	sh	短路 (shorting)
is	初态 (initial state)	ss	稳态 (steady state)



st	起动 (starting)
sy	同步 (synchronous)
<b>3. 参数和物理量文字符号</b>	
$A$	散热系数
$a$	直流电机电枢支路对数
$B$	磁通密度
$B_m$	主磁通密度、最大磁通密度
$B_r$	剩余磁通密度
$C$	电容; 电机热容量
$C_e$	他励直流电机的电动势系数
$C_{es}$	串励直流电机的电动势系数
$C_T$	他励直流电机的转矩系数
$C_{Ts}$	串励直流电机的转矩系数
$D$	直径; 调速范围; 粘滞系数
$D_{11}$	定子铁心内径
$E, e$	感应电动势 (有效值, 瞬时值, 下同)
$E_a, e_a$	电枢感应电动势、反电动势
$E_{add}, e_{add}$	附加电动势
$E_1, e_1$	变压器一次绕组感应电动势
$E_{1\sigma}, e_{1\sigma}$	变压器一次绕组漏磁电动势
$E_2, e_2$	变压器二次绕组感应电动势
$E'_2, e'_2$	变压器二次绕组折算感应电动势
$E_{2\sigma}, e_{2\sigma}$	变压器二次绕组漏磁电动势
$E'_{2\sigma}, e'_{2\sigma}$	变压器二次绕组折算漏磁电动势
$E_r, \dot{E}_r$	交流电机转子感应电动势
$E'_r, \dot{E}'_r$	交流电机转子折算感应电动势
$E_{r0}, \dot{E}_{r0}$	交流电机转子静止电动势
$E'_{r0}, \dot{E}'_{r0}$	交流电机转子折算静止电动势
$E_{r\sigma}, \dot{E}_{r\sigma}$	交流电机转子漏磁电动势
$E'_{r\sigma}, \dot{E}'_{r\sigma}$	交流电机转子漏磁折算电动势
$E_s, \dot{E}_s$	交流电机定子感应电动势
$E_{s\sigma}, \dot{E}_{s\sigma}$	交流电机定子漏磁电动势
$F$	力
$F_m$	磁动势
$F_a$	电枢磁动势
$F_e$	电磁力
$F_f$	励磁磁动势
$F_r$	转子磁动势
$F_s$	定子磁动势
$F_{sr}$	定子、转子合成磁动势
$f$	频率

$T$	转矩 (torque)
$W$	线圈 (winding)
$f_e$	电源频率
$f_1$	变压器一次侧电源频率, 定子频率
$f_2$	交流电机转子频率
$f_s$	交流电机转差频率
$G$	重力
$g$	重力加速度; 气隙宽度
$GD^2$	飞轮矩
$h$	高度
$H$	磁场强度
$H_c$	矫顽力
$I, i$	电流
$I_a, i_a$	电枢电流
$I_c, i_c$	导体电流
$I_d$	整流器输出电流
$I_f, i_f$	励磁电流
$I_0, i_0$	空载电流
$I_1, i_1$	变压器一次电流
$I_2, i_2$	变压器二次电流
$I'_2, i'_2$	变压器二次侧折算电流
$I_L, i_L$	负载电流
$I_N, i_N$	额定电流
$I_r, i_r$	交流电机转子电流
$I'_r, i'_r$	交流电机转子折算电流
$I_s, i_s$	交流电机定子电流
$I_{st}, i_{st}$	电机起动电流
$I_{sh}, i_{sh}$	短路电流
$J$	转动惯量
$j$	传动机构减速比
$K$	系数、因数、常数、比值
$K_1$	起动电流倍数
$K_T$	起动转矩倍数
$k$	变压器电压比; 比例因数
$k_e$	异步电动机电压比
$k_i$	异步电动机电流比
$k_{q1}$	定子绕组分布因数
$k_{q2}$	转子绕组分布因数
$k_{w1}$	定子绕组因数
$k_{w2}$	转子绕组因数
$k_{y1}$	定子绕组短距因数

$k_{y2}$	转子绕组短距因数	$T_e$	电磁转矩
$L$	电感	$T_{em}$	最大电磁转矩
$l$	长度	$T_f$	摩擦转矩
$L_\sigma$	漏感	$T_L$	负载转矩
$L_m$	互感	$T_m$	机械转矩
$m$	相数	$T_M$	过渡过程时间常数
$M$	质量	$T_N$	额定转矩
$N$	绕组匝数	$T_{st}$	起动转矩
$n$	转速	$t$	时间
$n_0$	理想空载转速	$U, u$	电压, 电源电压
$n_1$	同步转速	$U_1, u_1$	变压器一次电压
$n_p$	电机极对数	$U_2, u_2$	变压器二次电压
$P$	功率	$U'_2, u'_2$	变压器二次侧折算电压
$P_0$	空载功率	$U_a$	直流电机电枢电压
$P_1$	输入功率	$U_c$	整流装置控制电压
$P_2$	输出功率	$U_{d0}$	整流器输出电压
$P_{em}$	电磁功率	$U_f, u_f$	励磁电压
$P_L$	负载功率	$U_L, u_L$	负载电压
$P_m$	机械功率	$U_N, u_N$	额定电压
$P_N$	额定功率	$U_r, u_r$	交流电机转子电压
$P_s$	转差功率	$U'_r, u'_r$	交流电机转子折算电压
$P_{sh}$	短路输入功率	$U_{r0}, u_{r0}$	交流电机转子静止电压
$q$	交流绕组每极每相槽数	$U'_{r0}, u'_{r0}$	交流电机转子静止折算电压
$Q$	无功功率; 热量	$U_s, u_s$	交流电机定子电压
$R$	电阻; 电枢回路总电阻	$U_{sh}, u_{sh}$	短路电压
$R_a$	直流电机电枢电阻	$V$	体积
$R_{eb}$	能耗制动电阻	$v$	速度, 线速度
$R_f, R_b$	励磁电阻	$w$	宽度、厚度
$R_1$	变压器一次绕组电阻	$W$	能量
$R_2, R'_2$	变压器二次绕组电阻及折算	$W_E, W_e$	电能
$R_r, R'_r$	转子绕组电阻及折算	$W_f$	磁场储能
$R_{rh}$	反接制动电阻	$W_{fc}$	磁共能 (磁余能)
$R_{rec}$	整流装置内阻	$W_M, W_m$	机械能
$R_s$	定子绕组电阻	$x$	位移、距离
$R_{sh}$	短路电阻	$X$	电抗
$R_{st}$	起动电阻	$X_1$	变压器一次绕组电抗
$R_m$	磁阻	$X_2, X'_2$	变压器二次绕组电抗及折算
$R_\sigma$	漏磁阻	$X_c$	同步电抗
$S$	视在功率; 面积	$X_d$	直轴同步电抗
$s$	转差率; 静差率	$X_f, X_b$	励磁电抗
$T$	转矩; 周期	$X_q$	交轴同步电抗
$T_0$	空载转矩	$X_r, X'_r$	转子绕组旋转漏电抗及折算



## 电机及拖动基础

$X_{\sigma}, X'_{\sigma}$	转子绕组静止漏电抗及折算	$\mu$	磁导率
$X_s$	定子绕组漏电抗	$\mu_0$	真空磁导率
$X_{sh}$	短路电抗	$\mu_r$	相对磁导率
$y$	电机绕组节距	$\rho$	调速比; 电阻系数
$Z$	电阻抗	$\sigma$	漏磁系数; 转差功率损耗系数
$Z_f, Z_b$	励磁阻抗	$\tau$	温升; 绕组极距
$Z_0$	变压器空载总阻抗	$\Phi$	磁通
$Z_1$	变压器一次绕组阻抗; 定子槽数	$\Phi_0$	空载磁通
$Z_2, Z'_2$	变压器二次绕组阻抗及折算	$\Phi_f$	励磁磁通
$Z_L, Z'_L$	负载阻抗及折算	$\Phi_m$	主磁通
$Z_r, Z'_r$	转子绕组阻抗及折算	$\Phi_{max}$	主磁通幅值
$Z_{\sigma}, Z'_{\sigma}$	转子绕组静止阻抗及折算	$\Phi_N$	额定磁通
$Z_s$	定子绕组阻抗	$\Phi_r$	转子磁通
$Z_{sh}$	短路阻抗	$\Phi_{\Sigma}$	定转子合成磁通
$\alpha$	机械特性硬度; 槽距角	$\Phi_s$	定子磁通
$\beta$	机械特性斜率; 变压器负载系数	$\Phi_{\sigma}$	漏磁通
$\gamma$	夹角	$\varphi$	相位角; 阻抗角
$\delta$	放大系数	$\varphi_1$	一次侧、定子相位角; 阻抗角
$\Delta n$	转速降落	$\varphi_2$	二次侧、转子相位角; 阻抗角
$\Delta p$	功率损耗	$\varphi_r$	转子磁动势与合成磁动势的夹角
$\Delta p_{add}$	附加损耗	$\varphi_m$	转子磁动势与定子磁动势的夹角
$\Delta p_{Cu}$	铜耗	$\varphi_s$	定子磁动势与合成磁动势的夹角
$\Delta p_{Fe}$	铁耗	$\varphi_b$	同步电机内功率因数角
$\Delta p_m$	机械损耗	$\Psi, \psi$	磁链
$\Delta P_h$	磁滞损耗	$\Psi_m$	交互磁链
$\Delta P_v$	涡流损耗	$\omega$	角速度, 角频率
$\Delta U$	电压差	$\omega_1$	同步角速度, 同步角频率
$\eta$	效率	$\omega_2$	转子角速度, 转子角频率
$\eta_c$	传动装置的传递效率	$\omega_c$	电角频率
$\theta$	角位移; 温度	$\omega_c$	转差角速度
$\lambda$	电机允许过载倍数		





# 目 录

前言

常用符号表

绪论 ..... 1

## 第 1 篇 电机及拖动的基础理论

<b>第 1 章 电磁感应原理与磁路分析</b> .....	4	3.2 感应电动势的产生 .....	30
1.1 电磁感应原理 .....	4	3.3 电磁转矩的产生 .....	30
1.2 导磁材料及其特性 .....	6	3.4 电机的能量损耗与发热 .....	32
1.3 磁路与磁路分析 .....	10	3.5 电机的研究内容与分析步骤 .....	34
小结 .....	18	小结 .....	35
思考题与习题 .....	19	思考题与习题 .....	36
<b>第 2 章 机电能量转换原理</b> .....	20	<b>第 4 章 电力拖动系统的动力学基础</b> .....	37
2.1 机电能量的转换装置 .....	20	4.1 电力拖动系统的运动方程 .....	37
2.2 磁场中的能量关系 .....	22	4.2 生产机械的负载转矩特性 .....	39
2.3 机电能量转换 .....	24	4.3 电力拖动系统的稳态分析——稳定运行的条件 .....	40
2.4 电磁力与电磁转矩 .....	25	4.4 电力拖动系统的动态分析——过渡过程分析 .....	44
小结 .....	26	*4.5 多轴电力拖动系统的化简 .....	47
思考题与习题 .....	27	小结 .....	54
<b>第 3 章 电机的基本结构与工作</b>		思考题与习题 .....	54
原理 .....	28		
3.1 模型电机的结构 .....	28		

## 第 2 篇 直流电机及拖动

<b>第 5 章 直流电机</b> .....	55	6.1 他励直流电动机的机械特性 .....	78
5.1 直流电机的基本原理与结构 .....	55	6.2 他励直流电动机的起动 .....	80
5.2 直流电机的电枢绕组和磁场 .....	60	6.3 他励直流电动机的调速 .....	85
5.3 电枢绕组感应电动势和电磁转矩 .....	65	6.4 他励直流电动机的制动 .....	93
5.4 直流电机的基本方程和工作特性 .....	67	*6.5 串励和复励直流电动机的电力拖动 .....	107
小结 .....	76	小结 .....	112
思考题与习题 .....	76	思考题与习题 .....	112
<b>第 6 章 直流电动机的电力拖动</b> .....	78		

## 第 3 篇 交流电机及拖动

<b>第 7 章 变压器</b> .....	114	7.1 变压器的基本原理与结构 .....	114
------------------------	-----	-----------------------	-----



## 电机及拖动基础

7.2 变压器的运行方式 .....	118	9.4 异步电动机的工作特性 .....	181
7.3 变压器的基本方程和分析方法 .....	123	*9.5 单相异步电动机 .....	183
7.4 变压器的参数测定 .....	126	小结 .....	187
7.5 变压器的运行特性 .....	129	思考题与习题 .....	187
7.6 三相变压器 .....	132	<b>第10章 交流同步电机</b> .....	189
7.7 其他用途的变压器 .....	138	10.1 同步电机的结构和运行方式 .....	189
*7.8 变压器的新技术 .....	142	10.2 同步电动机的电磁关系 .....	191
小结 .....	144	10.3 同步电动机的功率与转矩 .....	196
思考题与习题 .....	145	10.4 同步电动机的工作特性 .....	201
<b>第8章 交流电机的共性问题</b> .....	147	*10.5 永磁式同步电动机 .....	203
8.1 交流电机的电枢绕组 .....	147	小结 .....	207
8.2 电枢绕组的感应电动势 .....	151	思考题与习题 .....	208
8.3 电枢绕组的磁动势和旋转磁场 .....	155	<b>第11章 交流电动机的电力拖动</b> .....	209
8.4 交流电机的磁场分析 .....	161	11.1 异步电动机的机械特性 .....	209
小结 .....	163	11.2 异步电动机的起动 .....	215
思考题与习题 .....	163	11.3 异步电动机的调速 .....	228
<b>第9章 交流异步电机</b> .....	164	11.4 异步电动机的制动 .....	239
9.1 异步电机的结构和运行方式 .....	164	*11.5 同步电动机的电力拖动 .....	248
9.2 异步电动机的电磁关系 .....	169	小结 .....	255
9.3 异步电动机的功率与转矩 .....	177	思考题与习题 .....	255

## 第4篇 电动机的选择与特种电机

<b>第12章 电力拖动系统电动机的选择</b>	
<b>和校验</b> .....	258
12.1 电动机的分类及额定参数 .....	258
12.2 电动机的绝缘等级与工作制分类 .....	261
12.3 不同工作制下电动机的功率选择 .....	265
12.4 电动机额定数据的选择 .....	269
小结 .....	272
思考题与习题 .....	272
<b>*第13章 特种电机</b> .....	273
13.1 旋转变压器 .....	273
13.2 测速发电机 .....	275
13.3 自整角机 .....	276
13.4 伺服电动机 .....	278
13.5 磁阻电动机 .....	282
13.6 磁滞电动机 .....	283
13.7 步进电动机 .....	285
13.8 直线电动机 .....	288
13.9 超导电动机 .....	291
13.10 超声波电动机 .....	292
小结 .....	294
<b>参考文献</b> .....	295



# 绪 论

## 1. 概述

物质、能量和信息是人类赖以生存的三大基本要素。电能作为一种能量形式，由于其易于传输、变换、分配和控制，已成为使用最为广泛的现代能源，也是人们生产和生活中使用动力的主要来源。在电能的生产、传输、变换、分配、控制和管理中，电机是主要的机电能量转换装置。例如：在电能的生产过程中，发电机将机械能转换成电能；在电能的传输过程中，变压器是主要的传输设备；在电能的使用中，电动机将电能转换成机械能。

电力拖动就是使用各种电动机作为原动机拖动生产机械运动，以完成一定的生产任务。由于电动机具有性能优良、高效可靠、控制方便等优点，因此，在现代化生产中，大多数生产机械都采用电力拖动。例如：在工农业生产和交通运输中，机床、轧钢机、起重机、卷扬机、鼓风机、抽水机、纺织机、印染机、印刷机、电动工具和电动车辆等都采用电力拖动；在人们的日常生活中，各种家用电器大都使用微特电机作为驱动装置；在自动控制系统、计算机系统和机器人等高新技术中，大量使用控制电机作为检测、放大和执行元件。

因此可以说，电机及电力拖动系统已广泛应用到现代社会生产和生活的方方面面。如果没有发电机也就没有大量的电能产生，如果没有电动机也就没有用电力拖动的运动装置和设备。目前，电机及拖动的现状可以概括为两点：

1) 电力拖动现已取代了其他拖动形式，成为主要的拖动形式。这是因为电动机与其他原动机相比有许多优点，比如：电能的获得和转换比较经济；传输和分配比较便利；操作和控制容易，特别是易于实现自动与远程控制。因此，目前绝大多数的生产机械都采用电力拖动。而且，目前电力拖动的方式也几乎全部是单机或多机拖动。

2) 当代科学和技术的新成果广泛地应用于电力拖动系统之中，比如：电力电子学的发展，使半导体变流装置广泛地用作电力拖动的电源；微电子学的发展，使电子控制器件和微处理机成为电力拖动的主要控制手段；自动控制理论广泛应用于电力拖动自动控制系统中，大大提高了系统的性能等。

随着现代电力电子技术、自动化技术和计算机技术的发展，电机及拖动的发展趋势为：

1) 用交流电力拖动取代直流电力拖动。

2) 从节能的角度改造电力拖动系统，比如：用交流调速系统拖动电动水泵可以节能。

3) 继续采用新技术不断提高电力拖动系统的性能和完善系统功能。

4) 通过系统集成和技术融合，组成综合自动化系统，以进一步提高生产效率。

## 2. 电力拖动的历史、现状与发展趋势

早在远古时代，人类已经应用流水为动力带动水车。据史料记载：公元前 3000 年，



中国有了水车。后来又出现了风车，这些都是最简单的拖动系统。17 世纪末，人类开始利用蒸汽为动力。1782 年，瓦特发明了第一台连续运转的蒸汽机，开创了机器时代。那时原动机与生产机械之间的连接是靠绳索或传动带，而各车间甚至全厂所有的工作就靠这种传动方式与一台原动机相连。

1831 年，法拉第发现了电磁感应现象。1888 年，Tesla 发明感应电动机，从此开始了电机与电力拖动的时代。最初的电力拖动是采用传导拖动（又称联动电力拖动）的方式，它是由一台电动机，并由数个传动装置将运动传输到数个工作机构。代替传导拖动的是单机电力拖动方式，即一台机床或一个工作机械由一台电动机拖动。后来，由于生产的需要，工作机械也越来越复杂，出现了多电机电力拖动，如自动化机床、加工中心等。

1956 年，晶闸管在 Bell 实验室诞生，开始了第二次电子革命，从此“电子”进入到强电领域，电力电子器件成为弱电控制强电的纽带。其重要意义在于：电力电子学把机器时代、电气时代和电子时代开创的技术融合在一起。20 世纪 60 年代，电力电子器件进入电力拖动领域，可以方便地通过电能变换装置来控制电机的运行方式。其后，自动化技术和计算机技术也不断应用于电机控制，使电力拖动系统发生了根本性改变。

目前，电力拖动系统的工业应用范围不断扩大，已遍及能源、电力、机械、采矿、冶金、轻纺、化工、电子信息、交通运输和家用电器等领域，特别在大功率、高电压交流调速系统的应用上取得了重大的突破。交流拖动系统由于结构简单、价格便宜、维护方便等优势，已取代直流拖动系统，成为现代电力拖动的主流形式。

新材料和新元器件的结合，正在全面改变传统电机的面貌。由于稀土永磁材料的迅速发展和电力电子器件性能的不断改善，涌现了大量的新型实用电机，如无刷直流电动机、开关磁阻电动机、无刷双馈电动机等。这些电机调速性能优良，进一步扩展了电力拖动技术的应用范围。此外，风力发电、磁悬浮电力传动、超导电机的出现为电力拖动的发展开辟了新领域。

高性能的微处理器如 DSP 的出现，为采用新的控制理论和控制策略提供了良好的技术基础，使电力拖动系统的自动化程度大为提高。神经网络控制和模糊控制等智能控制技术以及现代控制理论在电力拖动系统中的应用已成为新的研究热点。

由此可见，电力电子技术、自动化技术和计算机技术的发展是推动现代电力拖动系统不断进步的动力。

### 3. 本课程的性质、任务和要求

本课程是自动化专业、电气工程及其自动化等相关专业的一门专业基础课，其任务是使学生掌握电机的基本结构、工作原理和性能参数，电力拖动系统的各种运行方式、动静态性能分析以及电机选择和实验方法，为进一步学习“电力电子技术”、“电力拖动自动控制系统”、“PLC 控制系统”等课程准备必要的基础知识。学习本课程必须具备“电路原理”或“电工基础”课程的基本知识。

本课程主要研究和分析电机及电力拖动系统的基本理论问题，为突出实用性也涉及一些简单的电机控制电路，具有原“电机学”和“电力拖动基础”的主要内容。通过本课程的学习，学生应达到如下要求：

- 1) 掌握一般交直流电机和变压器的基本理论，包括电磁关系和能量关系等，能运用



基本方程式、等效电路和相量图等方法推演电机的基本数学模型，并进行相关的参数计算。

2) 掌握电力拖动系统静态特性及其分析方法，包括电动机机械特性与各种运行状态。

3) 熟悉电力拖动系统的动态特性及其分析方法，了解系统参数对过渡过程的影响。

4) 熟悉电机的铭牌参数，掌握选择电机的方法。

5) 掌握电机及电力拖动系统的基本实验方法和技能。

6) 了解电机及电力拖动系统的应用领域和发展趋势。



# 电机及拖动的基础理论

电机虽然种类繁多、大小不一、形式各异，但具有共同的基本原理和特征。本篇试图从电磁感应和机电能量转换这两个角度来探究电机的基本原理；以一个简单的两极电机为原型，建立电机的物理模型，进而导出电机的电动势和电磁转矩的一般方程；建立电力拖动系统的运动方程，分析和求解电力拖动系统的动力学问题。

## 第 1 章 电磁感应原理与磁路分析

1831 年法拉第发现电磁感应定律的 100 多年来，各种类型的电机不断发明并广泛应用于人们生产和生活的方方面面，电磁感应原理奠定了电机的理论基础。本章将讨论电磁感应原理和磁路分析方法。

### 1.1 电磁感应原理

众所周知，电和磁是自然界的两种现象，近代通过物理学家的深入研究，发现了电和磁的一些基本规律以及它们之间的联系。本节将概要地介绍电磁感应的基本概念和定律，作为学习本课程的物理基础。

#### 1.1.1 磁场

除了天然磁体会产生磁场外，人们发现在导体中通过电流时会在其周围产生磁场，还进一步发现了由电产生磁场的一些基本规律。

##### 1. 磁场强度和方向

由载流导体产生的磁场大小可用磁场强度  $H$  来表示，磁力线的方向与电流的方向满足右手螺旋关系。如图 1-1 所示，假定在一根导体中通以电流  $i$ ，则在导体周围空间的某一平面上产生的磁场强度  $H$  为

$$H = \frac{i}{l} \quad (1-1)$$

式中  $H$ ——磁场强度 (A/m)；

$i$ ——电流强度 (A)；

$l$ ——磁力线的周长 (m)。

如果载流导体是匝数为  $N$  的线圈 (见图 1-2)，则上式可表示为

$$H = \frac{Ni}{l} \quad (1-2)$$

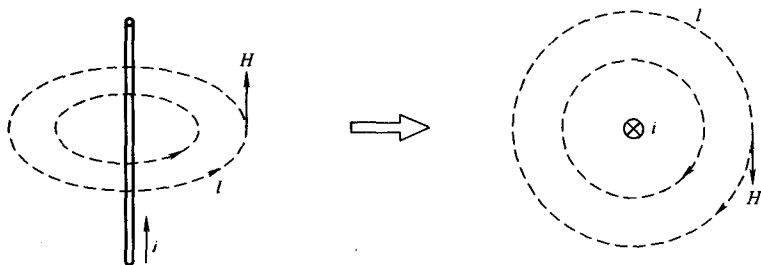


图 1-1 载流导体产生的磁场

## 2. 磁通密度

通常把穿过某一截面积  $S$  的磁力线根数称为磁通量 (简称磁通), 用  $\Phi$  来表示。在均匀磁场中, 把单位面积内的磁通称为磁通密度  $B$ , 且有

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-3)$$

式中  $B$ ——磁通密度 (T);

$\Phi$ ——磁通 (Wb);

$S$ ——截面积 ( $\text{m}^2$ )。

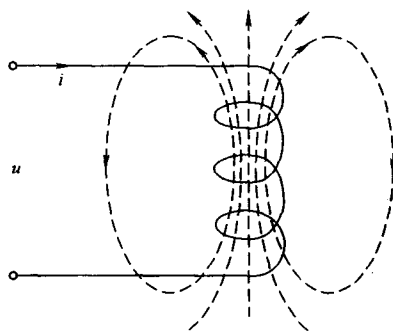


图 1-2 通电线圈产生的磁场

### 1.1.2 电磁感应定律

#### 1. 电磁感应定律

1831年, 法拉第通过实验发现了电磁学中最重要规律——电磁感应定律, 揭示了磁通与电动势之间存在如下关系:

1) 如果在闭合磁路中磁通随时间而变化, 那么将在线圈中感应出电动势。

2) 感应电动势的大小与磁通的变化率成正比, 即

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-4)$$

式中  $e$ ——线圈的感应电动势 (V)。

法拉第电磁感应定律奠定了电机学的理论基础。

#### 2. 导体在磁场中的感应电动势

电磁感应定律告诉我们, 磁场的变化会产生感应电动势。如果磁场固定不变, 而让导体在磁场中运动, 这时相对于导体来说, 磁场仍是变化的, 因此根据法拉第定律, 同样会在导体中产生感应电动势。这种导体在磁场中运动产生的感应电动势的大小由下式给出:

$$e = Blv \quad (1-5)$$

式中  $e$ ——导体的感应电动势 (V);

$l$ ——在磁场中运动导体的长度 (m);

$v$ ——导体运动的相对速度 (m/s)。



而感应电动势的方向由右手定则确定，图 1-3 表示了  $e$ 、 $B$  与  $v$  三者之间的方向关系。

### 3. 载流导体在磁场中的电磁力

如果在固定磁场中放置一个通有电流的导体，则会在载流导体上产生一个电磁力，又称洛仑兹力或安培力。如图 1-4 所示，载流导体受力的大小与导体在磁场中的位置有关。当导体与磁力线方向垂直时，所受的力最大，这时电磁力  $F$  与磁通密度  $B$ 、导体长度  $l$  以及通电电流  $i$  成正比，即

$$F = Bli \quad (1-6)$$

当导体与磁力线平行时， $F=0$ ；在其他位置，导体所受的力介于两者之间。电磁力的方向可由左手定则确定，图 1-5 给出了  $F$ 、 $B$  与  $i$  三者之间的方向关系。

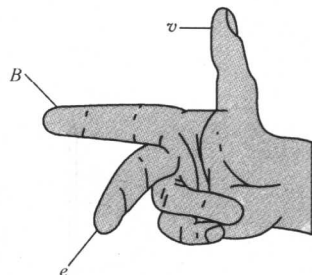


图 1-3  $e$ 、 $B$  与  $v$  三者之间的方向关系

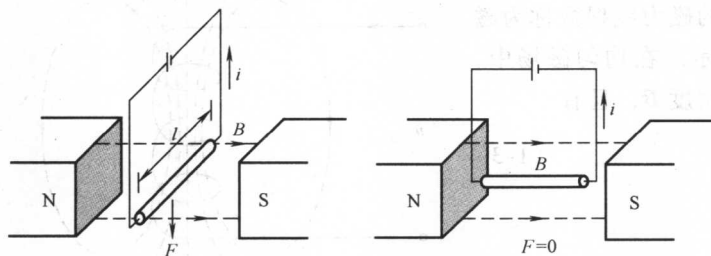


图 1-4 载流导体在磁场中的电磁力

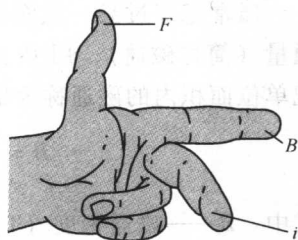


图 1-5  $F$ 、 $B$  与  $i$  三者之间的方向关系

载流导体在磁场中产生电磁力的原理是电动机最重要的理论基础。

## 1.2 导磁材料及其特性

由电磁感应原理可知，通过磁场的作用可以产生电或力，因此各种电机的工作原理离不开磁场和磁性材料，磁性材料是构成各种电机的关键材料。人们发现自然界有的材料具有导磁的特性，称为导磁材料。而没有导磁特性的称为非导磁材料。

### 1.2.1 $B-H$ 曲线

磁性材料的磁场强度  $H$  与磁通密度  $B$  存在一定的关系，其关系用图形表示称为  $B-H$  曲线，也称为磁化曲线，是表示磁性材料最基本的特性。

#### 1. 真空磁导率

在真空中，磁场强度  $H$  与磁通密度  $B$  成正比关系，即

$$B = \mu_0 H \quad (1-7)$$

式中， $\mu_0$  为真空磁导率，且有  $\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，并可近似为  $\mu_0 \approx 1/800000 \text{H/m}$ ，这样式 (1-7) 可近似表示成

$$H \approx 800000B$$

非导磁材料，比如铜、铝、橡胶和空气等，具有与真空相近的磁导率，因此在这些材





料中, 磁场强度  $H$  与磁通密度  $B$  的关系可用图 1-6 中的  $B-H$  曲线来表示。

## 2. 导磁材料的磁导率

在导磁材料中, 它们的关系可表示为

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (1-8)$$

式中,  $\mu_r$  为导磁材料的相对磁导率。由于  $\mu_r$  的值不是常数, 因而  $B$  与  $H$  之间的关系不是线性关系。这样, 式 (1-8) 并没有实用价值, 而是用  $B-H$  曲线来表达它们之间的关系。

### 1.2.2 铁磁材料

为了提高材料的导磁能力, 人们在寻求自然材料的同时, 通过人工合成的办法获得各种高导磁材料。铁磁材料 (包括铁、钴、镍以及它们的合金) 具有比真空大数百倍到数千倍的磁导率, 因此常作为电机的磁性材料。铁磁材料的主要特性如下:

#### 1. $B-H$ 曲线的饱和非线性

由于铁磁材料的磁化特性是非线性的, 通常用  $B-H$  曲线来表示。图 1-7a 给出了几种典型铁磁材料的  $B-H$  曲线<sup>[1]</sup>, 由此可见, 其特性分为两段:

1) 线性段。如图 1-7b 中曲线 2 的  $O-a$  段, 随着外磁场  $H$  的增加, 磁通密度  $B$  成正比地增加。此时  $B-H$  曲线近似为直线, 铁磁材料的磁导率基本不变, 磁性材料工作在线性区。

2) 饱和非线性段。如图 1-7b 中曲线 2 的  $b-c$  段, 随着外磁场  $H$  的增加, 磁通密度  $B$  增大缓慢甚至基本不再增大, 这种现象称为磁饱和。

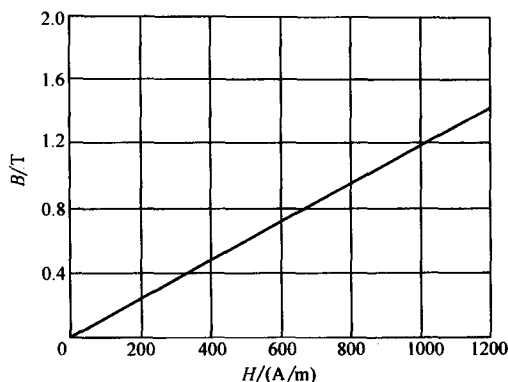
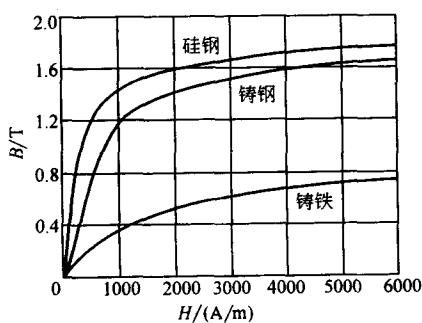
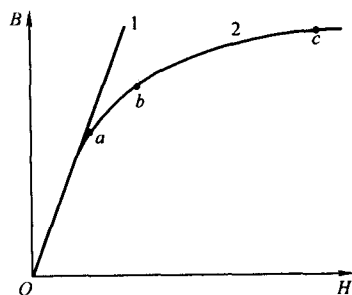


图 1-6 真空与非导磁材料的  $B-H$  曲线



a)



b)

图 1-7 铁磁材料的  $B-H$  曲线

$a-b$  段为过渡阶段, 这里不再讨论。

通常, 电机设计时应使其磁路的铁磁材料工作在线性区。

#### 2. 磁滞特性及其损耗

以上讨论了铁磁材料的单向磁化过程, 但是被磁化的铁磁材料在去除外磁场后仍然会