



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

Fundamentals of
Electrical Machines and Drives

电机与 拖动基础

第2版

© 汤天浩 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

电机与拖动基础

第2版

主 编	汤天浩		
副主编	张建华	谢 卫	
参 编	石安乐	孙国琴	胡春慧
	陈佳新	窦金生	
主 审	陈伯时	李杰仁	



机械工业出版社

本书将原“电机学”与“电力拖动基础”两门课程的主要内容合并为“电机与拖动基础”。全书共分十一章，前两章是全书的基础，分别阐述电机的基本原理，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；电力拖动系统的动力学基础，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，后续章节分析和讨论了直流电机、变压器、异步电机、同步电机和特种电机的原理、结构和运行特性，包括电机的起动、制动和调速等问题。

本书适于普通高等学校自动化、电气工程及其自动化专业作为教材使用，也可作为职工大学、夜大以及大专院校有关专业的教材，并可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动基础/汤天浩主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2011. 8

普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-34056-0

I. ①电… II. ①汤… III. ①电机 - 高等学校 - 教材 ②电力传动 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 059644 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王雅新 责任编辑: 王雅新 责任校对: 张 媛

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 7 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15 印张 · 368 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-34056-0

定价: 29.50 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育电气工程与自动化 (应用型)“十二五”规划教材 编审委员会委员名单

主任委员：刘国荣

副主任委员：张德江 梁景凯 张元 袁德成 焦斌 吕进
胡国文 刘启中 汤天浩 黄家善 钱平 王保家

委员（按姓氏笔画排序）：

丁元明	马修水	王再英	王军	叶树江	孙晓云
朱一纶	张立臣	李先允	李秀娟	李海富	杨宁
陈志新	周渊深	尚丽萍	罗文广	罗印升	罗兵
范立南	娄国焕	赵巧娥	项新建	徐建英	郭伟
高亮	韩成浩	蔡子亮	樊立萍	穆向阳	

前 言

本书包括了原“电机学”和“电力拖动基础”两门课程的主要内容，适用于自动化、电气工程及其自动化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、工程技术人员参考。

教材的编写始终以基本原理和应用性为指导思想，在内容方面以电力拖动系统中使用最为广泛的电机与拖动形式为重点，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，第一章集中介绍了基本电磁规律，机电能量转换基本原理，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基础，第二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. 新增了第六章，讲述交流电机理论的共同问题，将交流电机的电枢绕组、电动势以及脉振磁动势和旋转磁场等交流电机共性的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。

4. 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。

5. 在电力拖动部分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。

6. 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。

全书共分为十一章，其中有些较深内容的章节加了“*”号，主要内容的教学时数为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。

本书由上海海事大学汤天浩担任主编，扬州大学张建华和上海海事大学谢卫担任副主编，参加编写的还有湖南工程学院石安乐、上海应用技术学院孙国琴和胡春慧、福建工程学院陈佳新、镇江船艇学院窦金生。因此，本书凝聚了集体智慧和辛劳。汤天浩教授和谢卫教授负责全书的修改和统稿，特别是谢卫教授作为电机专业博士为本书的编写做出了重要贡献。

本书的编写还得到上海海事大学的大力支持，姚刚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，杨铭帮助打印了部分内容，在此谨向他们的辛勤工作表示感谢！

全书由上海大学陈伯时教授、上海海事大学李杰仁教授担任主审。作为主编的博士生导师，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，都提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢！

尽管我们在编写本书过程中付出了许多心血，但因水平所限，还会存在许多缺点和不足，恳请广大读者批评指正。

编 者

常用符号表

一、元件和装置常用的文字符号

A	电枢绕组, A 相绕组	Q	断路器
B	B 相绕组	QS	隔离开关
C	电容器	R	电阻器、变阻器
C	C 相绕组	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	伺服电动机
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, 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		

二、常见下角标

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

三、参数和物理量文字符号

A	散热系数	G	重力
a	直流电机电枢支路对数	g	重力加速度;气隙宽度
B	磁通密度	GD^2	飞轮惯量
C	电容;电机热容	H	磁场强度
C_e	他励直流电机的电动势系数	I, i	电流
$C_{e\alpha}$	串励直流电机的电动势系数	I_a, i_a	电枢电流
C_T	他励直流电机的转矩系数	I_d	整流器输出电流
$C_{T\alpha}$	串励直流电机的转矩系数	I_f, i_f	励磁电流
D	直径;调速范围	I_0, i_0	空载电流
E, e	感应电动势(大写为平均值或有效值,小写为瞬时值,下同)	I_1, i_1	变压器一次电流
E_a, e_a	电枢感应电动势、反电动势	I_2, i_2	变压器二次电流
E_{add}, e_{add}	附加电动势	I_2', i_2'	变压器二次侧折算电流
E_1, e_1	变压器一次绕组感应电动势	I_L, i_L	负载电流
$E_{1\sigma}, e_{1\sigma}$	变压器一次绕组漏磁电动势	I_N, i_N	额定电流
E_2, e_2	变压器二次绕组感应电动势	I_r, i_r	交流电机转子电流
E_2', e_2'	变压器二次绕组折算感应电动势	I_r', i_r'	交流电机转子折算电流
$E_{2\sigma}, e_{2\sigma}$	变压器二次绕组漏磁电动势	I_s, i_s	交流电机定子电流
$E_{2\sigma}', e_{2\sigma}'$	变压器二次绕组折算漏磁电动势	I_{st}, i_{st}	电机起动电流
E_r, E_r	交流电机转子感应电动势	I_{sh}, i_{sh}	短路电流
E_r', E_r'	交流电机转子折算感应电动势	J	转动惯量
E_{r0}, E_{r0}	交流电机转子静止电动势	j	传动机构减速比
E_{r0}', E_{r0}'	交流电机转子折算静止电动势	K	系数、常数、比值
$E_{r\sigma}, E_{r\sigma}$	交流电机转子漏磁电动势	K_I	起动电流倍数
$E_{r\sigma}', E_{r\sigma}'$	交流电机转子漏磁折算电动势	K_T	起动转矩倍数
E_s, E_s	交流电机定子感应电动势	k	变压器的匝比、电压比;比例系数
$E_{s\sigma}, E_{s\sigma}$	交流电机定子漏磁电动势	k_e	异步电动机电压比
F	力,电磁力	k_i	异步电动机电流比
F_a	电枢磁动势	k_{w1}	定子绕组系数
F_m	磁动势	k_{w2}	转子绕组系数
F_f	励磁磁动势	L	电感
F_r	转子磁动势	L_σ	漏感
F_s	定子磁动势	L_m	互感
F_{sr}	定子、转子合成磁动势	m	质量;相数
f	频率	N	绕组匝数
f_e	电源频率	n	转速
f_1	变压器一次侧电源频率,定子频率	n_0	理想空载转速
f_2	交流电机转子频率	n_1	同步转速
f_s	交流电机转差频率	n_p	极对数
		P	功率

P_0	空载功率	U_d	整流器输出电压
P_1	输入功率	U_f, u_f	励磁电压
P_2	输出功率	U_L, u_L	负载电压
P_{em}	电磁功率	U_N, u_N	额定电压
P_L	负载功率	U_r, u_r	交流电机转子电压
P_m	机械功率	U'_r, u'_r	交流电机转子折算电压
P_N	额定功率	U_{r0}, u_{r0}	交流电机转子静止电压
P_s	转差功率	U'_{r0}, u'_{r0}	交流电机转子静止折算电压
P_{sh}	短路输入功率	U_s, u_s	交流电机定子电压
Q	无功功率;热量	U_{sh}	短路电压
R	电阻;电枢回路总电阻	u_{sh}	基准温度短路电压相对值
R_a	直流电机电枢电阻	V	体积
R_{cb}	能耗制动电阻	v	速度,线速度
R_f	励磁电阻	W	能量
R_1	变压器一次绕组电阻	W_e	电能
R_2, R'_2	变压器二次绕组电阻及折算	W_f	磁场储能
R_r, R'_r	转子绕组电阻及折算	W'_f	磁余能
R_{rb}	反接制动电阻	W_m	机械能
R_{rec}	整流装置内阻	X	电抗
R_s	定子绕组电阻	X_f	励磁电抗
R_{sh}	短路电阻	X_1	变压器一次绕组电抗
R_{st}	起动电阻	X_2, X'_2	变压器二次绕组电抗及折算
R_m	磁阻	X_r, X'_r	转子绕组旋转漏电抗及折算
S	视在功率;面积	X_{r0}, X'_{r0}	转子绕组静止漏电抗及折算
s	转差率	X_s	定子绕组漏电抗
T	转矩	X_{sh}	短路电抗
T_0	空载转矩	γ	电机绕组节距
T_e	电磁转矩	Z	电阻抗
T_{em}	最大电磁转矩	Z_f	励磁阻抗
T_f	摩擦转矩	Z_0	变压器空载总阻抗
T_L	负载转矩	Z_1	变压器一次绕组阻抗
T_m	机械转矩	Z_2, Z'_2	变压器二次绕组阻抗及折算
T_N	额定转矩	Z_L, Z'_L	负载阻抗及折算
T_{st}	起动转矩	Z_r, Z'_r	转子绕组阻抗及折算
t	时间	Z_{r0}, Z'_{r0}	转子绕组静止阻抗及折算
U, u	电压,电源电压	Z_s	定子绕组阻抗
U_1, u_1	变压器一次电压	Z_{sh}	短路阻抗
U_2, u_2	变压器二次电压	α	机械特性硬度
U'_2, u'_2	变压器二次侧折算电压	β	机械特性斜率;变压器负载系数
U_a	直流电机电枢电压	γ	夹角
U_c	控制电压	δ	放大系数;静差率

Δn	转速降	Φ_a	电枢磁通
Δp	功率损耗	Φ_l	励磁磁通
Δp_{add}	附加损耗	Φ_m	主磁通
Δp_{Cu}	铜耗	Φ_N	额定磁通
Δp_{Fe}	铁耗	Φ_r	转子磁通
Δp_m	机械损耗	Φ_s	定子磁通
ΔU	电压差	Φ_{rs}	合成磁通
η	效率	φ	相位角;阻抗角
η_c	传动装置的传递效率	φ_1	一次侧、定子相位角;阻抗角
θ	角位移;温度	φ_2	二次侧、转子相位角;阻抗角
λ	电机允许过载倍数;波长	φ_r	转子磁动势与合成磁动势的夹角
μ	磁导率	φ_{rs}	转子磁动势与定子磁动势的夹角
μ_0	真空磁导率	φ_s	定子磁动势与合成磁动势的夹角
μ_r	相对磁导率	Ψ, ψ	磁链
ρ	调速比	ω	角转速
σ	漏磁系数;转差功率损耗系数	ω_1	同步角转速,同步角频率
τ	温升	ω_2	转子角转速,转子角频率
Φ	磁通	ω_e	电角频率
Φ_0	空载磁通	ω_s	转差角转速

目 录

前言	
常用符号表	
绪论	1
第一章 电机的基本原理	3
第一节 电磁感应	3
第二节 机电能量转换基本原理	8
第三节 电机的基本结构与工作原理	11
第四节 电机的能量损耗与发热	15
小结	16
思考题与习题	17
第二章 电力拖动系统的动力学基础	18
第一节 电力拖动系统的运动方程	18
第二节 生产机械的负载转矩特性	19
第三节 电力拖动系统的稳态分析—— 稳定运行的条件	21
* 第四节 电力拖动系统的动态分析—— 过渡过程分析	24
* 第五节 多轴电力拖动系统的化简	27
小结	32
思考题与习题	33
第三章 直流电机原理	34
第一节 直流电机的基本原理和结构	34
第二节 直流电机的电枢绕组和磁场	36
第三节 电枢绕组感应电动势和电磁转 矩	40
第四节 直流电机的基本方程和工作特 性	42
小结	49
思考题与习题	50
第四章 直流电机拖动基础	51
第一节 他励直流电动机的机械特性	51
第二节 他励直流电动机的起动	53
第三节 他励直流电动机的调速	57
第四节 他励直流电动机的制动	64
* 第五节 串励和复励电动机的电力拖动 ...	78
小结	82
思考题与习题	82
第五章 变压器	85
第一节 变压器的基本原理与结构	85
第二节 变压器的空载运行和负载运行	89
第三节 变压器的等效电路和参数测定	93
第四节 变压器的运行特性	99
第五节 三相变压器	101
* 第六节 其他用途的变压器	107
小结	111
思考题与习题	111
第六章 交流电机的旋转磁场理论	113
第一节 电枢绕组的磁动势	113
第二节 旋转磁场的形成和特点	114
第三节 交流电机的主磁通和漏磁通	116
小结	117
思考题与习题	117
第七章 异步电机原理	118
第一节 异步电机的结构和运行方式	118
第二节 异步电动机的电磁关系	123
第三节 异步电动机的功率与转矩	131
第四节 异步电动机的工作特性	135
小结	137
思考题与习题	137
第八章 同步电机原理	139
第一节 同步电机的结构和运行方式	139
第二节 同步电动机的电压方程和	

相量图	142	第一节 电动机的型号和铭牌参数	200
第三节 同步电动机的功率方程和功角特性	145	第二节 电动机的绝缘等级与工作制分类	203
第四节 同步电动机的功率因数及 U 形曲线	150	第三节 不同工作制下电动机的功率选择	205
* 第五节 永磁同步电动机	153	第四节 电动机额定数据的选择	207
小结	156	小结	208
思考题与习题	157	思考题与习题	208
第九章 交流电机拖动基础	158	* 第十一章 特种电机	210
第一节 异步电动机的机械特性	158	第一节 单相异步电动机	210
第二节 异步电动机的起动	163	第二节 异步伺服电动机	214
第三节 异步电动机的调速	173	第三节 磁阻式同步电动机	218
第四节 异步电动机的制动	185	第四节 磁滞式同步电动机	219
* 第五节 同步电动机的电力拖动	193	第五节 步进电动机	221
小结	197	第六节 直线电动机	224
思考题与习题	198	小结	226
第十章 电力拖动系统电动机的选择 ...	200	参考文献	227

绪 论

一、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，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，可以说电机与电力拖动系统已广泛应用到我们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，电机与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，电机与拖动的发展趋势为：

- 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。

二、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, 出现了多电动机电力拖动, 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”进入到弱电领域, 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, 已遍及冶金、铁道、机械、纺织等领域, 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, 正逐步取代直流拖动系统。

新材料和新元件的结合, 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动机, 如无刷直流电动机、开关磁阻电动机、无刷双馈电动机等。这些电动机调速性能优良, 为电力拖动技术的发展开辟了新的领域。

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物质基础, 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。

三、本课程的性质、任务和要求

本课程是自动化、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的选择和实验方法, 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与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”课程的主要内容。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, 并能运用等效电路和相量图等方法推演电机的基本电路方程并进行参数计算。
- 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) 掌握电机与电力拖动系统的基本实验方法和技能。
- 6) 了解电机与电力拖动系统的应用领域和发展趋势。

第一章 电机的基本原理

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。本章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电机，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；并初步讨论了电机的发热问题。

自 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。目前，按电机供电电源的不同，大致可以分为直流电机和交流电机两大类，其中：交流电机又可根据其工作方式分为同步电机和异步电机。如果按电机中能量转换的方式，又可将其分为发电机和电动机两大类：发电机是将输入的机械能转换成电能输出；电动机是将输入的电能转换成机械能输出。一般来说，在电机中这两种工作方式是可逆的，也就是说同一台电机既可以作为电动机也可以作为发电机来使用。下面主要讨论电机共同的原理。

第一节 电磁感应

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。

一、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 的大小为

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

式中 H ——磁场强度 (A/m)；

i ——电流 (A)；

l ——磁力线的周长 (m)。

如果载流导体是匝数为 N 的线圈 (如图 1-2 所示)，则式 (1-1) 可表示为

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

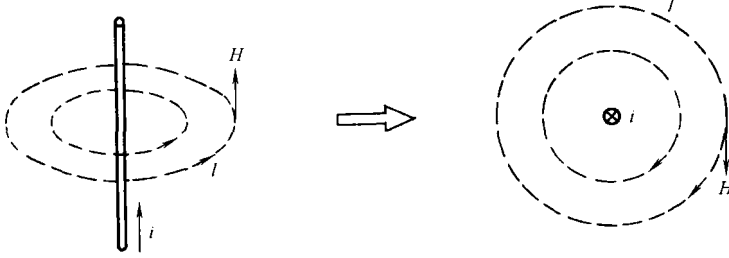


图 1-1 载流导体产生的磁场

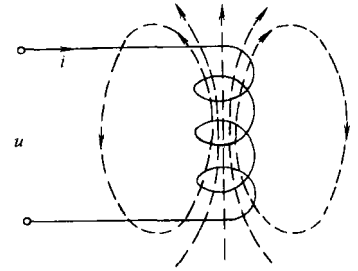


图 1-2 通电线圈产生的磁场

2. 磁通密度

通常把穿过某一截面 S 的磁力线根数称为磁通量，用 Φ 来表示。在均匀磁场中，把单位面积内的磁通量称为磁通密度 B ，其大小为

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

式中 B ——磁通密度 (T)；

Φ ——磁通 (Wb)；

S ——截面积 (m^2)。

3. B - H 曲线

磁场强度 H 与磁通密度 B 的大小存在一定的关系，在真空中，它们成正比关系，即

$$B = \mu_0 H \quad (1-4)$$

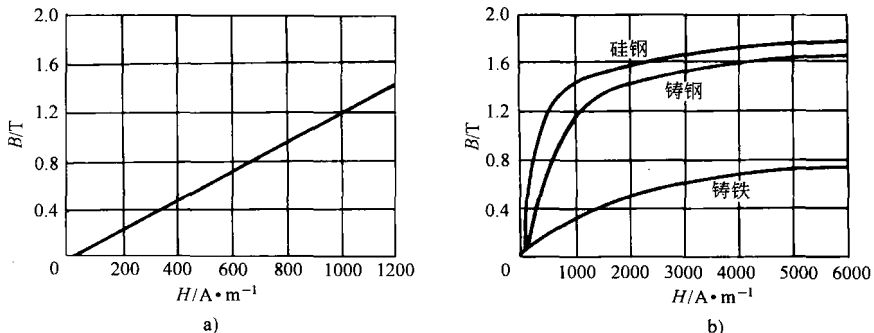
其中， μ_0 为真空磁导率，且有 $\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，并可近似为 $\mu_0 \approx 1/800000 \text{H/m}$ ，这样式 (1-4) 可近似表示成

$$H \approx 800000B$$

非导磁材料，比如：铜、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 1-3a 中的 B - H 曲线来表示。在导磁材料中，他们的关系可表示为

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (1-5)$$

其中， μ_r 为导磁材料的相对磁导率。由于 μ_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 (1-5) 并没有实用价值，而是用 B - H 曲线来表达他们之间的关系。图 1-

图 1-3 几种典型导磁材料的 B - H 曲线

a) 真空的磁导率 b) 铁磁材料的磁导率

3b 给出了几种典型导磁材料的 $B-H$ 曲线^[1]。

二、磁路

为简单起见，工程上常用磁路方法来描述和分析磁场及电磁关系。磁路的主要部分由高导磁材料构成，使得磁通被限制在磁路内部，这就像电流被限制在电路中一样，可以用类似于电路分析方法来建立磁路分析方法。由于变压器和电机的铁心多是由高导磁材料构成的，因此磁路方法可用作分析变压器和电机的重要工具。

1. 简单磁路

如图 1-4a 所示，一个简单的磁路由采用高导磁材料的铁心和通电线圈组成，现假定铁心具有相同的截面积 S_c 和平均长度 l_c ，线圈的匝数为 N ，通以电流 i ，若忽略线圈漏磁通，由通电线圈产生的磁场将主要分布在铁心内部。根据式 (1-2)，可计算出磁场强度为

$$H_c = \frac{Ni}{l_c}$$

现定义一个新的变量磁动势 (Magnet Motive Force, MMF) F_m 来描述由通电线圈产生的磁场，则上式可写成

$$F_m = Ni = H_c l_c \quad (1-6)$$

再由式 (1-3)、式 (1-5) 和式 (1-6) 可得

$$F_m = \frac{l_c}{\mu S_c} \Phi \quad (1-7)$$

其中， $\mu = \mu_0 \mu_r$ 被称为磁导率。如果令 $R_m = \frac{l_c}{\mu S_c}$ 为磁阻，则可将上式表示为

$$F_m = R_m \Phi \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可见，磁路中磁动势 F_m 、磁通 Φ 和磁阻 R_m 的关系与电路中的电动势 E 、电流 i 和电阻 R 的关系相似 (如图 1-4b 所示)。这样，可以用等效的磁路来分析和研究电磁关系。

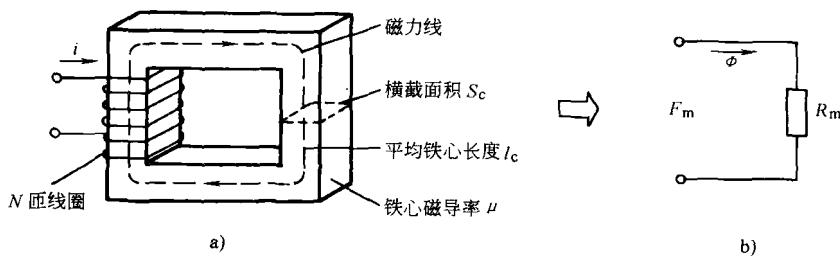


图 1-4 简单磁路示意图

a) 磁路结构 b) 磁路表示

2. 气隙磁场

假如在磁路中有一段气隙，如图 1-5 所示，只要气隙的长度 l_g 与相邻的铁心表面尺寸相比足够的小，那么由通电线圈产生的磁通 Φ 仍主要分布在铁心和气隙中，这时磁路的磁动势 F_m 为