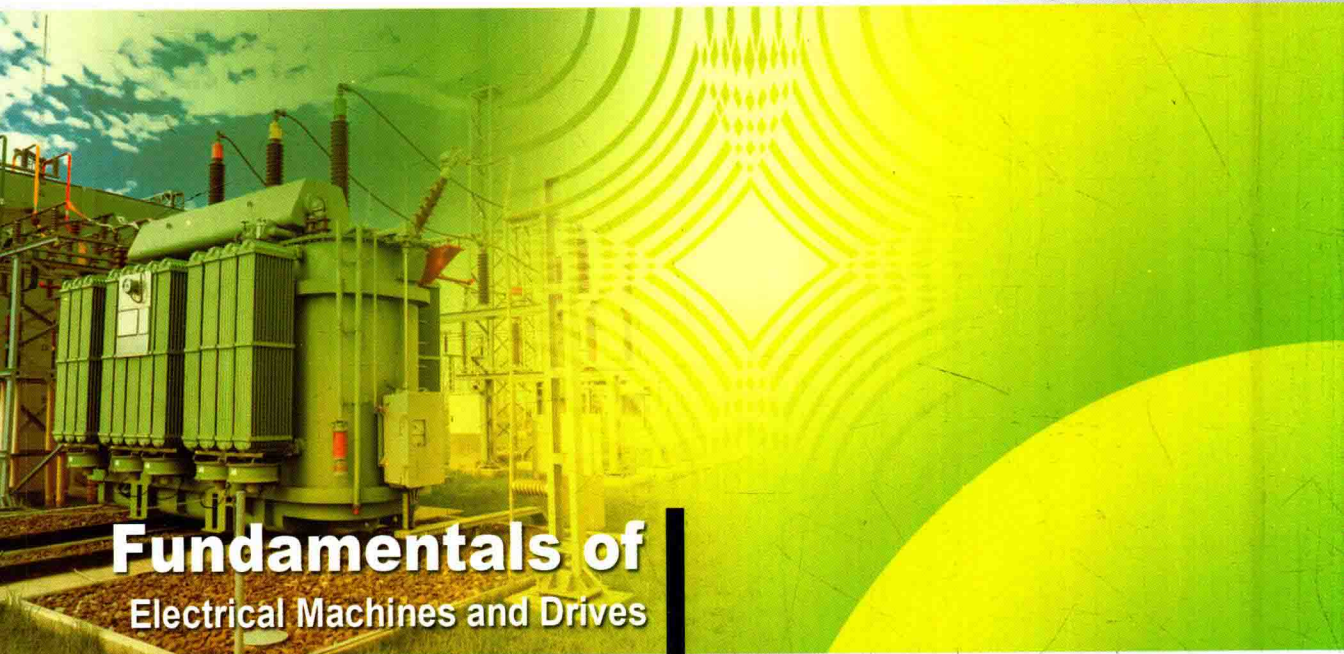




“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十三五”规划教材



Fundamentals of
Electrical Machines and Drives

电机与 拖动基础

第3版

© 汤天浩 谢卫 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十三五”规划教材

电机与拖动基础

第3版

主 编 汤天浩 谢 卫
参 编 窦金生 孙国琴 胡春慧
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11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, 谢卫主编. —3版. —北京: 机械工业出版社, 2017. 10

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-111-58087-4

I. ①电… II. ①汤… ②谢… 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 (2017) 第 233814 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: 潘蕊 封面设计: 张静

责任印制: 李昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15.5 印张 · 382 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-58087-4

定价: 39.80 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

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。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，适用于自动化、电气工程及其自动化等专业的本科生学习电机原理与电力拖动基础之用，也可供有关专业师生和工程技术人员参考。全书共分为11章，其中部分较深内容的章节上加了“*”号，主要内容的教学时数为48~64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。

本书的编写以基本原理和工程应用为指导思想，在内容方面以电力拖动系统中使用最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。为适应宽口径复合型人才培养的需要，本书侧重总结电机与拖动的共性问题 and 一般规律，使学生能够掌握常用电机的基本结构、工作原理、运行特性以及电力拖动的基础知识。

本次修订保留了第1版、第2版的体系结构，同时，与时俱进，充分关注新的科技发展成果和新的理论方法应用，对变压器、永磁式同步电动机、特种电机等章节进行了适当的补充与修改，并精简了部分习题，突出应用型教材的特色。编者对本书第1版、第2版的参编人员，以及使用本书和提出宝贵意见的师生表示衷心的感谢。

编 者

2017年5月

常用符号表

1. 元件和装置用的文字符号 (按国家标准 GB/T 20939—2007)

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, 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	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)	W	线圈 (winding)



3. 参数和物理量文字符号

A	散热系数	f_s	交流电机转差频率
a	直流电机电枢支路对数	G	重力
B	磁通密度 (磁感应强度)	g	重力加速度; 气隙宽度
B_m	主磁通密度、最大磁通密度	GD^2	飞轮矩
B_r	剩余磁通密度	h	高度
C	电容; 电机热容量	H	磁场强度
C_e	他励直流电机的电动势系数	H_c	矫顽力
C_{es}	串励直流电机的电动势系数	I, i	电流
C_T	他励直流电机的转矩系数	I_a, i_a	电枢电流
C_{Ts}	串励直流电机的转矩系数	I_c, i_c	导体电流
D	直径; 调速范围; 粘滞系数	I_d	整流器输出电流
D_{il}	定子铁心内径	I_f, i_f	励磁电流
E, e	感应电动势 (有效值, 瞬时值, 下同)	I_0, i_0	空载电流
E_a, e_a	电枢感应电动势、反电动势	I_1, i_1	变压器一次侧电流
E_{add}, e_{add}	附加电动势	I_2, i_2	变压器二次侧电流
E_1, e_1	变压器一次绕组感应电动势	I_2', i_2'	变压器二次侧折算电流
$E_{1\sigma}, e_{1\sigma}$	变压器一次绕组漏磁电动势	I_L, i_L	负载电流
E_2, e_2	变压器二次绕组感应电动势	I_N, i_N	额定电流
E_2', e_2'	变压器二次绕组折算感应电动势	I_r, i_r	交流电机转子电流
$E_{2\sigma}, e_{2\sigma}$	变压器二次绕组漏磁电动势	I_r', i_r'	交流电机转子折算电流
$E_{2\sigma}', e_{2\sigma}'$	变压器二次绕组折算漏磁电动势	I_s, i_s	交流电机定子电流
E_r, \dot{E}_r	交流电机转子感应电动势	I_{st}, i_{st}	电机起动电流
E_r', \dot{E}_r'	交流电机转子折算感应电动势	I_{sh}, i_{sh}	短路电流
E_{r0}, \dot{E}_{r0}	交流电机转子静止电动势	J	转动惯量
E_{r0}', \dot{E}_{r0}'	交流电机转子折算静止电动势	j	传动机构减速比
E_{rr}, \dot{E}_{rr}	交流电机转子漏磁电动势	K	系数、因数、常数、比值
E_{rr}', \dot{E}_{rr}'	交流电机转子折算漏磁电动势	K_1	起动电流倍数
E_s, \dot{E}_s	交流电机定子感应电动势	K_T	起动转矩倍数
$E_{s\sigma}, \dot{E}_{s\sigma}$	交流电机定子漏磁电动势	k	变压器电压比; 比例因数
F	力	k_e	异步电动机电压比
F_m	磁动势	k_i	异步电动机电流比
F_a	电枢磁动势	k_{q1}	定子绕组分布因数
F_c	电磁力	k_{q2}	转子绕组分布因数
F_f	励磁磁动势	k_{w1}	定子绕组因数
F_r	转子磁动势	k_{w2}	转子绕组因数
F_s	定子磁动势	k_{y1}	定子绕组短距因数
F_{sr}	定子、转子合成磁动势	k_{y2}	转子绕组短距因数
f	频率	L	电感
f_c	电源频率	l	长度
f_1	变压器一次侧电源频率, 定子频率	L_σ	漏感
f_2	交流电机转子频率	L_m	互感
		m	相数



M	质量	T_{st}	起动转矩
N	绕组匝数	t	时间
n	转速	U, u	电压, 电源电压
n_0	理想空载转速	U_1, u_1	变压器一次侧电压
n_1	同步转速	U_2, u_2	变压器二次侧电压
n_p	电机极对数	U'_2, u'_2	变压器二次侧折算电压
P	功率	U_a	直流电机电枢电压
P_0	空载功率	U_c	整流装置控制电压
P_1	输入功率	U_{d0}	整流器输出电压
P_2	输出功率	U_f, u_f	励磁电压
P_{em}	电磁功率	U_L, u_L	负载电压
P_L	负载功率	U_N, u_N	额定电压
P_m	机械功率	U_r, u_r	交流电机转子电压
P_N	额定功率	U'_r, u'_r	交流电机转子折算电压
P_s	转差功率	U_{r0}, u_{r0}	交流电机转子静止电压
P_{sh}	短路输入功率	U'_{r0}, u'_{r0}	交流电机转子静止折算电压
q	交流绕组每极每相槽数	U_s, u_s	交流电机定子电压
Q	无功功率; 热量	U_{sh}, u_{sh}	短路电压 (阻抗电压)
R	电阻; 电枢回路总电阻	V	体积
R_a	直流电机电枢电阻	v	速度, 线速度
R_{ch}	能耗制动电阻	w	宽度、厚度
R_f	励磁电阻	W	能量
R_1	变压器一次绕组电阻	W_c	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	磁共能 (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	位移、距离
R_s	定子绕组电阻	X	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_c	同步电抗
R_σ	漏磁阻	X_d	直轴同步电抗
S	视在功率; 面积	X_f	励磁电抗
s	转差率; 静差率	X_q	交轴同步电抗
T	转矩; 周期	X_r, X'_r	转子绕组旋转漏电抗及折算
T_0	空载转矩	X_{r0}, X'_{r0}	转子绕组静止漏电抗及折算
T_e	电磁转矩	X_s	定子绕组漏电抗
T_{em}	最大电磁转矩	X_{sh}	短路电抗
T_f	摩擦转矩	y	电机绕组节距
T_L	负载转矩	Z	电阻抗
T_m	机械转矩	Z_f	励磁阻抗
T_M	过渡过程时间常数	Z_0	变压器空载总阻抗
T_N	额定转矩	Z_1	变压器一次绕组阻抗; 定子槽数



Z_2, Z'_2	变压器二次绕组阻抗及折算	ρ	调速比; 电阻系数
Z_L, Z'_L	负载阻抗及折算	σ	漏磁系数; 转差功率损耗系数
Z_r, Z'_r	转子绕组阻抗及折算	τ	温升; 绕组极距
Z_{r0}, Z'_{r0}	转子绕组静止阻抗及折算	Φ	磁通
Z_s	定子绕组阻抗	Φ_0	空载磁通
Z_{sh}	短路阻抗	Φ_f	励磁磁通
α	机械特性硬度; 槽距角	Φ_m	主磁通
β	机械特性斜率; 变压器负载系数	Φ_N	额定磁通
γ	夹角	Φ_r	转子磁通
δ	放大系数	Φ_{rs}	定转子合成磁通
Δn	转速降落	Φ_s	定子磁通
Δp	功率损耗	Φ_σ	漏磁通
Δp_{add}	附加损耗	φ	相位角; 阻抗角
Δp_{Cu}	铜耗	φ_1	一次侧、定子相位角; 阻抗角
Δp_{Fe}	铁耗	φ_2	二次侧、转子相位角; 阻抗角
Δp_m	机械损耗	φ_r	转子磁动势与合成磁动势的夹角
ΔP_h	磁滞损耗	φ_{rs}	转子磁动势与定子磁动势的夹角
ΔP_v	涡流损耗	φ_s	定子磁动势与合成磁动势的夹角
ΔU	电压差	φ_δ	同步电机内功率因数角
η	效率	Ψ, ψ	磁链
η_e	传动装置的传递效率	Ψ_m	交互磁链
θ	角位移; 温度	ω	角速度, 角频率
λ	电机允许过载倍数	ω_1	同步角速度, 同步角频率
μ	磁导率	ω_2	转子角速度, 转子角频率
μ_0	真空磁导率	ω_e	电角频率
μ_r	相对磁导率	ω_s	转差角速度

目 录

前 言	
常用符号表	
绪论	1
第一章 电机的基本原理	4
第一节 电磁感应原理	4
第二节 机电能量转换原理	9
第三节 电机的基本结构与工作原理	12
第四节 电机的能量损耗与发热	16
小结	18
思考题与习题	18
第二章 电力拖动系统的动力学基础	19
第一节 电力拖动系统的运动方程	19
第二节 生产机械的负载转矩特性	21
第三节 电力拖动系统的稳态分析—— 稳定运行的条件	23
*第四节 电力拖动系统的动态分析—— 过渡过程分析	25
*第五节 多轴电力拖动系统的化简	29
小结	34
思考题与习题	34
第三章 直流电机原理	36
第一节 直流电机的基本原理和结构	36
第二节 直流电机的电枢绕组和磁场	38
第三节 电枢绕组的感应电动势和 电磁转矩	43
第四节 直流电机的基本方程和工作特性	45
小结	52
思考题与习题	53
第四章 直流电机拖动基础	54
第一节 他励直流电动机的机械特性	54
第二节 他励直流电动机的起动	56
第三节 他励直流电动机的调速	60
第四节 他励直流电动机的制动	68
*第五节 串励和复励电动机的电力拖动	81
小结	86
思考题与习题	86
第五章 变压器	89
第一节 变压器的基本原理和结构	89
第二节 变压器的运行方式	92
第三节 变压器的等效电路	96
第四节 变压器的参数测定	99
第五节 变压器的运行特性	102
第六节 三相变压器	104
第七节 其他用途的变压器	111
小结	114
思考题与习题	115
第六章 交流电机的旋转磁场理论	117
第一节 电枢绕组的磁动势	117
第二节 旋转磁场的形成和特点	119
第三节 交流电机的主磁通和漏磁通	121
小结	122
思考题与习题	122
第七章 异步电动机原理	123
第一节 异步电机的结构和运行方式	123
第二节 异步电动机的电磁关系	129
第三节 异步电动机的功率与转矩	138
第四节 异步电动机的工作特性	141
小结	143
思考题与习题	144
第八章 同步电机原理	146
第一节 同步电机的结构和运行方式	146
第二节 同步电动机的电压方程和相量图	149
第三节 同步电动机的功率方程和 功角特性	152
第四节 同步电动机的功率因数调节	157
*第五节 永磁式同步电动机	160
小结	164
思考题与习题	165
第九章 交流电机拖动基础	166
第一节 异步电动机的机械特性	166



第二节 异步电动机的起动	172	小结	219
第三节 异步电动机的调速	182	思考题与习题	219
第四节 异步电动机的制动	194	*第十一章 特种电机	220
*第五节 同步电动机的电力拖动	202	第一节 单相异步电动机	220
小结	207	第二节 异步伺服电动机	224
思考题与习题	208	第三节 磁阻式同步电动机	228
第十章 电力拖动系统电动机的选择 ..	210	第四节 磁滞式同步电动机	230
第一节 电动机的型号和铭牌参数	210	第五节 步进电动机	232
第二节 电动机的绝缘等级与工作制 分类	213	第六节 直线电动机	234
第三节 不同工作制下电动机的功率 选择	215	小结	237
第四节 电动机额定数据的选择	218	参考文献	238

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。

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。

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，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，可以说电机与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。

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皮带，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，特斯拉发明感应电动机，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。电力拖动的现状可概括为两点:

1) 电力拖动现已取代了其他拖动形式,成为最主要的拖动形式。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器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。

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,随着现代电力电子技术、自动化技术和计算机技术的发展,电力拖动的发展趋势可概括为:

- 1) 用交流电力拖动完全取代直流电力拖动。
- 2) 从节能的角度改造电力拖动系统,提高系统效率。
- 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,进一步提高生产效率。

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选择和实验方法,为进一步学习“电力电子技术”“电力拖动控制系统”“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线路,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,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,比如:起动、制动和调速等特性。
- 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，进而导出电机的感应电动势和电磁转矩的一般表达式；并初步讨论电机的能量损耗与发热问题。

第一节 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。

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

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

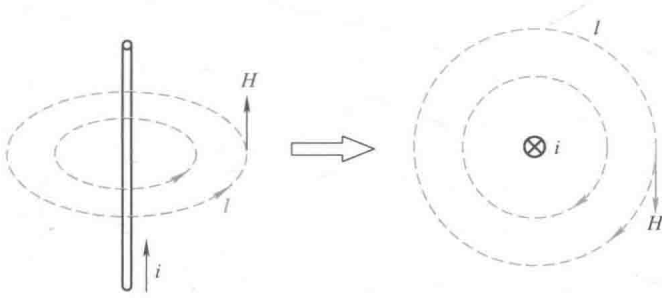


图 1-1 载流导体产生的磁场

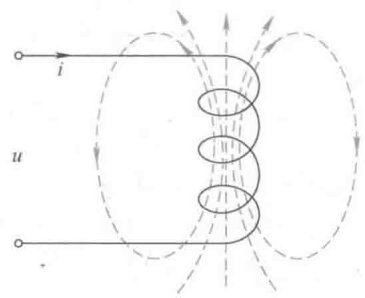


图 1-2 通电线圈产生的磁场

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或称磁感应强度，用字母 B 表示，且有

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

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 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 为真空导磁率，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

$$\{H\}_{\text{A/m}} \approx 800000 \{B\}_{\text{T}}$$

非导磁材料，比如：铜、橡胶和空气等，具有与真空相近的导磁率，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 为导磁材料的相对导磁率。由于 μ_r 的值不是常数，因而 B 与 H 之间的关系不是线

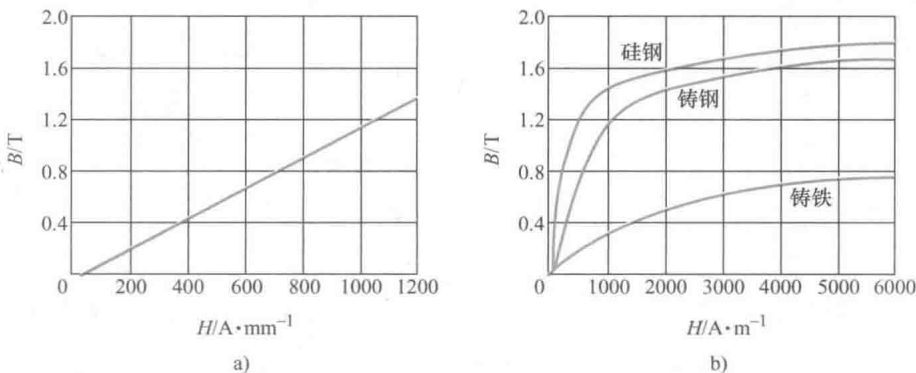


图 1-3 几种典型材料的 $B-H$ 曲线

a) 真空 b) 铁磁材料



性关系。这样,式(1-5)实际上没有实用价值,通常用 $B-H$ 曲线来表达他们之间的关系。图 1-3b 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, $\mu = \mu_0 \mu_r$ 称为磁导率。令 $R_m = \frac{l_c}{\mu S_c}$ 为磁阻,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)。这样,可以用等效的磁路来分析和研究电磁关系。

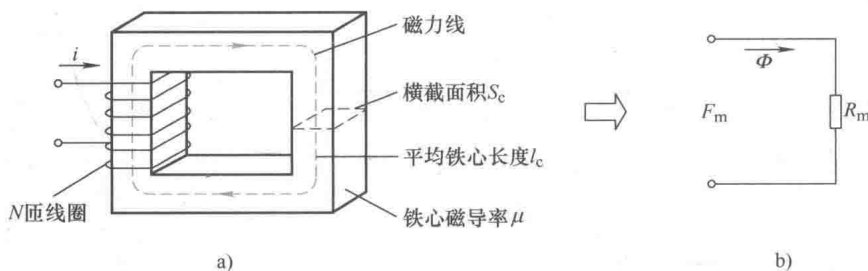


图 1-4 简单磁路示意图

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

$$F_m = Ni = H_c l_c + H_g l_g \quad (1-9)$$

或写成
$$F_m = \frac{B_c l_c}{\mu} + \frac{B_g l_g}{\mu_0}$$

由于 $B_c = \Phi/S_c$, $B_g = \Phi/S_g$, 如果忽略气隙磁场的边缘效应, 即 $S_c = S_g$, 上式变为

$$F_m = \Phi \frac{l_c}{\mu S_c} + \Phi \frac{l_g}{\mu_0 S_c} = \Phi (R_{mc} + R_{mg}) \quad (1-10)$$

式(1-10)说明, 磁路的磁动势 F_m 等于磁通 Φ 与铁心磁阻 R_{mc} 和气隙磁阻 R_{mg} 串联值的乘积。这就与串联电路分析相似。由于铁心的磁导率远远大于气隙的磁导率, 即 $\mu \gg \mu_0$, $R_{mc} \gg R_{mg}$, 因此, 由磁动势 F_m 产生的磁通 Φ 或磁感应强度 B 主要就取决于气隙的性质, 即

$$\Phi \approx \frac{F_m}{R_{mg}} = Ni \frac{\mu_0 S_c}{l_g} \quad (1-11)$$

由此可知, 在电机学中气隙磁场将扮演重要的角色。今后分析研究的重点也主要放在气隙磁场上。

3. 磁动势的合成

如图 1-6 所示, 磁路有两组线圈 N_1 和 N_2 , 分别通以电流 i_1 和 i_2 , 在磁路中所产生的总磁动势为

$$F_m = Ni = N_1 i_1 + N_2 i_2 \quad (1-12)$$

根据式(1-11), 磁路的磁通也主要存在于气隙之中, 即

$$\Phi = (N_1 i_1 + N_2 i_2) \frac{\mu_0 S_c}{l_g} \quad (1-13)$$

上述结果可以推广到有多组线圈的磁路中, 其总的磁动势 F_m 是每组线圈 N_1, N_2, \dots, N_n 产生的磁动势 $F_{m1}, F_{m2}, \dots, F_{mn}$ 的合成。但必须注意: 磁动势除了大小以外, 还应考虑其方向, 因此一般来说, 磁动势的合成是一种矢量计算。

这样, 类似于电路的分析方法, 可以把工程应用中几何形状复杂的磁路分段处理, 简化成若干个几何形状规则的简单磁路的组合。

例 1-1 有一磁路如图 1-7a 所示, 由铁磁材料构成, 带有两个长度和面积分别为 g_1, g_2 和 S_1, S_2 的气隙, 其线圈匝数为 N , 通以电流 i , 试求出磁路总的磁通量 Φ 和气隙 1 的磁通量 Φ_1 。

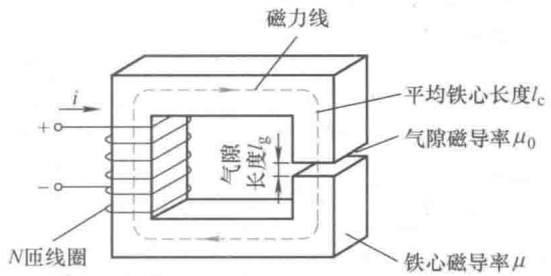


图 1-5 带有气隙的磁路

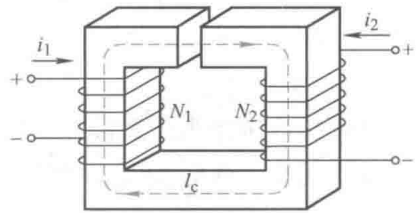


图 1-6 有多组线圈的磁路

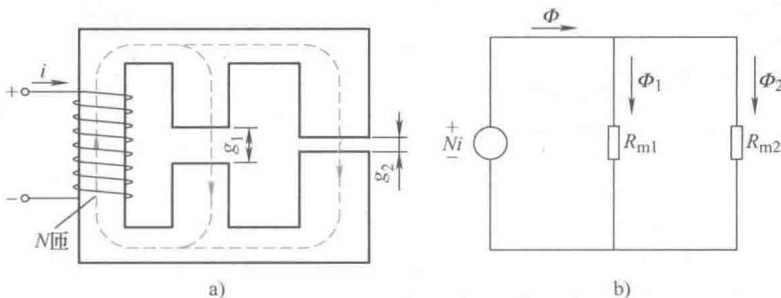


图 1-7 例 1-1 的磁路

a) 磁路 b) 等效磁路图