



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电机学

(第二版)

周顺荣 编著



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电 机 学

(第二版)

周顺荣 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书根据从特殊到一般的认识规律,逐一论述变压器、异步电机、同步电机和直流电机四种典型电机的工作原理、基本结构、电磁过程、理论分析方法、运行特性和参数;并且总结各种电机在电、磁、力各方面的共同特点,使读者对电机的内在联系和机电能量转换的实质有一个完整的、由感性到理性的认识和思考。书中有例题、习题及答案,最后还附有模拟试卷及解答。

本书可作为电机电器及其控制专业、高电压专业、电力系统及其自动化专业、自动控制等电类专业本科生电机学课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/周顺荣编著. —2版. —北京:科学出版社,2007

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-03-019139-7

I. 电… II. 周… III. 电机学-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 113996 号

责任编辑:段博原 余 江 潘继敏/责任校对:陈玉凤

责任印制:张克忠/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年8月第 二 版 印张:29 3/4

2007年8月第四次印刷 字数:564 000

印数:8 001—11 500

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

读者意见反馈表

衷心感谢您选择科学出版社出版的教材！

科学出版社一直致力于以优质的教材产品服务于我国高等教育，并努力为教师提供完整的教学解决方案。为了进一步提升教材的质量，为高校教师教学提供完善的服务，我们希望广大的教师对本书多提宝贵的意见和建议。

为了方便您填写本反馈表，本表可以在科学出版社网站：www.sciencep.com “教材天地” 栏目下载。

您的任何意见和建议都将是我們不断进步的动力！

您认为本书的不足之处有：

您认为本书的优点和特色有：

您是否还有其他意见和建议：

您的个人情况：

姓名：_____ 性别：_____ 出生年月：_____

职称：_____ 职务：_____ 授课年限：_____

电话：_____ 手机：_____ E-mail：_____

您最近是否有写书的计划：_____

联系方式：

地 址：北京东城区东黄城根北街 16 号（100717）

科学出版社 高教中心 工科出版分社

联系人：段博原

Tel: 010-6403 3891 6403 4725 (Fax)

E-mail: gk@mail.sciencep.com

第二版前言

本书自 2002 年 8 月出版以来，为众多读者所欢迎，曾获 2003 年度上海市优秀教材奖，2006 年被教育部列入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。

在多年教学使用的基础上，作者对本书进行了修订。本书的修订本着更有利于教学和拓展知识及应用面的精神，除了增加部分章节外，在叙述的内容上也作了修改和补充，包括增加了新技术、新材料的应用。同时，为了更便于读者理解，增添了许多插图。增加的第十三章第四节“自整角机”仅意于介绍电机原理的一种应用。机电一体化、电力电子技术的应用对电机原理及其应用的发展起着重要的推动作用。因此，本次修订对第二十五章第一节“无刷直流电动机”增添了部分新的研究成果。

本书修订仍由上海交通大学谭茆娃教授担任主审，谭茆娃教授对修订稿作了认真和仔细的审阅，并提出了很多宝贵意见。在此，作者对谭茆娃教授表示真诚的感谢。同时，作者还要向许多关心、帮助、提过宝贵意见和用过本书的人士表示衷心的感谢。

由于作者的经验和水平有限，本次修订难免有不妥甚至错误之处，恳请读者批评指正。

周顺荣

2007 年 2 月于上海交通大学

第一版前言

本书是作为“创新人才培养体系建设”(985工程)的子项目编写的。

随着我国高等教育改革的深化,本科“电气工程及其自动化”大专业覆盖了原来的电机电器及其控制专业、高电压专业、电力系统及自动化等专业,这对电机学课程的教学要求和学时都产生了影响。本教材正是适应这一变化编写的。本教材着眼于适应我国国民经济发展需要和世界科技发展综合化、高新化趋势的需要,突出强化基础知识,拓宽专业口径的指导思想,本着注重能力培养和综合素质提高的精神,力求强调深入浅出、循循诱导,培养和提高学生思考及解决问题的能力,且具有与当代学科发展相适应的特色。

本书由上海交通大学谭茱娃教授担任主审,上海交通大学李仁定教授、林闰汤副教授对书稿也进行了认真的审阅。在本书的编写过程中,还得到上海交通大学陈洪亮教授、张焰教授、金如麟教授、赵继敏副教授、谢宝昌副教授的关心和支持。谭茱娃教授、李仁定教授、金如麟教授、林闰汤副教授对本书的编写提出了许多宝贵的意见,在此编者表示衷心的感谢。另外,在初期的文字计算机输入等工作中,陈芳、李姝、周颖丽、吴其昌等提供了大量的帮助,编者在此表示衷心的感谢。

由于编者的经验和水平有限,加之时间紧迫,书中难免有不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

周顺荣

2002年5月于上海交通大学

本书主要符号表

A	线负载 (线负荷); 面积	E_1, E_2	一次侧、二次侧电势 (有效值)
a	直流电枢绕组并联支路对数; 交流电枢绕组每相并联支路数	$E_{1\sigma}, E_{2\sigma}$	一次侧、二次侧漏电势 (有效值)
B	磁通密度 (磁感应强度)	e	电势的瞬时值
B_{ad}	直轴 (d 轴) 电枢反应磁通密度	e_k	换向元件的旋转电势
B_{ad1}	直轴 (d 轴) 电枢反应基波磁通密度	e_L	自感电势
B_{aq}	交轴 (q 轴) 电枢反应磁通密度	e_M	互感电势
B_{aq1}	交轴 (q 轴) 电枢反应基波磁通密度	e_r	换向元件的电抗电势
B_{av}	平均磁通密度	F	磁势; 力
B_{a1}	电枢反应基波磁通密度	F_a	电枢磁势 (幅值)
B_f	励磁磁通密度	F_{ad}	直轴电枢磁势 (幅值)
B_{f1}	励磁基波磁通密度	F_{aq}	交轴电枢磁势 (幅值)
B_k	换向区域的气隙磁通密度	F_δ	气隙合成磁势 (幅值)
B_m	磁通密度最大值 (幅值)	f	频率; 力; 磁势的瞬时值
B_{m1}	基波磁通密度最大值 (幅值)	f_N	额定频率
B_δ	气隙磁通密度	H	磁场强度
b	宽度; 弧长	I	电流 (交流表示有效值); 同步电机的电枢电流; 直流电机的线路电流
b_p	主磁极实际极弧长度	I_a	电枢电流
b_t	主磁极计算极弧长度	I_f	直流励磁电流
b_k	换向片宽度	I_N	额定电流
C	常数; 电容	I_k	短路电流
C_E	电势常数	I_{st}	起动电流
C_T	转矩常数	i	电流的瞬时值
D	直径	J	机组转动惯量
D_a	电枢外径	j	电流密度
D_k	换向器外径	K	换相片数
D_i	电枢内径	k	变压器电压比 (变比)
E	感应电势 (交流为有效值); 电枢反应电势	k_μ	饱和系数
E_a	电枢反应电势 (交流为有效值)	L	自感
E_m	电势最大值	L_σ	漏磁电感
E_δ	合成电势 (有效值)	l	导体有效长度
E_0	空载电势 (有效值); 励磁电势	m	相数
		N	每相串联匝数

N_1 、 N_2	变压器一次侧、二次侧绕组匝数	y_2	第二节距
n	转子转速	Z	阻抗 (复量); 电枢槽数
P	功率	Z_i	虚槽数
P_{em}	电磁功率	Z_k	短路阻抗 (复量)
P_{mec}	机械功率	Z_L	负载阻抗 (复量)
P_N	额定功率	Z_m	励磁阻抗 (复量)
P_0	空载功率 (空载损耗)	Z_1 、 Z_2	变压器一次、二次绕组 (或异步电机定子、转子) 的漏阻抗 (复量)
P_1	输入功率	Z_L	负载阻抗 (复量)
P_2	输出功率	Z_+	正序阻抗 (复量)
p	极对数; 损耗	Z_-	负序阻抗 (复量)
p_{Cu}	铜损耗 (电阻损耗)	Z_0	零序阻抗 (复量)
p_{Fe}	铁损耗	η	效率
p_{mec}	机械损耗	η_N	额定效率
p_{ad}	杂散损耗 (附加损耗)	η_{max}	最大效率
Q	无功功率	λ	比漏磁导
R_a	电枢回路总内电阻	μ	磁导率
R_f	励磁回路总电阻	τ	极距
R_L	负载电阻	ϕ	磁通量
S	视在功率	ϕ_m	变压器或异步电机的主磁通
S_N	额定容量 (额定视在功率)	ϕ_o	漏磁通
T	转矩; 周期	ϕ_1	基波磁通
T_{em}	电磁转矩	ϕ_ν	ν 次谐波磁通
T_N	额定转矩	ϕ_a	电枢反应磁通
T_0	空载转矩	ϕ_{ad}	直轴电枢反应磁通
U	电压 (交流为有效值)	ϕ_{aq}	交轴电枢反应磁通
U_N	额定电压 (交流为有效值)	ϕ_0	励磁磁通
U_f	励磁电压	$\Phi_{1\sigma}$ 、 $\Phi_{2\sigma}$	变压器一次侧、二次侧漏磁通
u	电压瞬时值	φ	功率因数角
x	电抗	ψ	磁链
$x_{1\sigma}$ 、 $x_{2\sigma}$	一次侧、二次侧绕组漏电抗	Ω	机械角速度
x_k	短路电抗	Ω_1	同步角速度
y	绕组合成节距	ω	角频率
y_1	第一节距		

目 录

第二版前言

第一版前言

本书主要符号表

绪论	1
第一节 电机的概况	1
第二节 电路的有关概念	3
第三节 电磁感应的有关概念	4
第四节 三相交流电路的有关概念	10
第五节 电机用铁磁材料	13
第六节 新技术及其应用实例	21

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的工作原理	31
第一节 变压器的基本结构和额定值	31
第二节 变压器的工作原理	36
第三节 变压器的发热和冷却	39
第四节 小结	40
第二章 变压器的运行分析	43
第一节 变压器的空载运行	43
第二节 变压器的负载运行	48
第三节 标么值	55
第四节 变压器的参数测定	57
第五节 变压器的运行特性	63
第六节 小结	73
第三章 三相变压器	77
第一节 三相变压器的磁路系统	77
第二节 三相变压器的绕组连接	78
第三节 三相变压器的空载电流、磁通和电势	82
第四节 小结	84

第四章 自耦变压器	86
第一节 自耦变压器的连接和工作原理	86
第二节 自耦变压器的能量传递	87
第三节 自耦变压器的等效电路与相量图	89
第四节 自耦变压器的电压调整率和效率	90
第五节 小结	95
第五章 变压器的两种运行方式	96
第一节 变压器的并联运行	96
第二节 三相变压器的不对称运行	104
第三节 小结	118

第二篇 交流电机的绕组、磁势和电势

第六章 三相交流绕组	121
第一节 三相交流绕组的要求	121
第二节 三相交流绕组的基本概念	122
第三节 小结	126
第七章 三相交流绕组的磁势	127
第一节 由一个整距线圈构成相绕组的磁势	128
第二节 线圈的分布和短距对磁势的影响	129
第三节 单相绕组的磁势	132
第四节 三相交流绕组的合成磁势	135
第五节 小结	143
第八章 三相交流绕组的电势	147
第一节 基波电势	147
第二节 谐波电势	149
第三节 小结	161

第三篇 异步电机

第九章 异步电机的基本结构和工作原理	163
第一节 异步电机的一般介绍	163
第二节 异步电机的工作原理	169
第三节 小结	171
第十章 异步电机的基本电磁关系	172
第一节 异步电机的磁路	172
第二节 转子静止时异步电动机的基本电磁关系	173

第三节	转子旋转时异步电动机的基本电磁关系	178
第四节	小结	186
第十一章	异步电动机的功率和转矩	189
第一节	异步电动机的功率和转矩平衡	189
第二节	异步电机的电磁转矩	192
第三节	小结	207
第十二章	三相异步电动机的起动和调速	212
第一节	三相异步电动机的起动	212
第二节	三相异步电动机的调速	217
第三节	小结	227
第十三章	特种异步电机	231
第一节	单相异步电动机	231
第二节	交流伺服电动机	235
第三节	交流测速发电机	237
第四节	自整角机	239

第四篇 同步电机

第十四章	同步电机的基本结构和工作原理	247
第一节	同步电机的基本构造型式	247
第二节	同步电机的基本工作原理	248
第三节	额定值	250
第四节	小结	251
第十五章	同步电机的基本方程式和相量图	252
第一节	对称负载时的电枢反应	252
第二节	电枢反应磁通及磁势的折算	257
第三节	同步电抗	261
第四节	基本方程式和相量图	264
第五节	小结	269
第十六章	同步发电机的并联运行	272
第一节	同步电机在大容量电网上运行的工作特性	272
第二节	容量相同的两台同步发电机并联运行	280
第三节	同步发电机投入电网并联运行的条件和方法	282
第四节	小结	286
第十七章	同步发电机对称运行时的特性	290
第一节	同步发电机的空载特性	290

第二节	同步发电机的短路特性	291
第三节	同步发电机的零功率因数负载特性	292
第四节	短路比及电压调整率	293
第五节	小结	296
第十八章	同步电动机	300
第一节	由发电机状态至电动机状态的过渡	300
第二节	同步电动机起动	301
第十九章	同步电机的突然短路	303
第一节	突然短路物理过程分析的基础	303
第二节	对称突然短路的物理过程	304
第三节	瞬变电抗和超瞬变电抗	310
第四节	小结	312

第五篇 直流电机

第二十章	直流电机的工作原理和基本结构	315
第一节	直流电机的工作原理	315
第二节	直流电机的基本结构	317
第三节	直流电机的电枢绕组	320
第四节	直流电机的额定值	327
第五节	直流电机的励磁方式	327
第二十一章	直流电机的电势、磁势和转矩	329
第一节	电枢绕组的感应电势	329
第二节	电枢绕组的磁势	330
第三节	电枢反应	333
第四节	电磁转矩	335
第五节	小结	336
第二十二章	直流发电机	339
第一节	并励发电机的电压建立	339
第二节	直流发电机的基本方程式	341
第三节	直流发电机的工作特性	344
第四节	小结	351
第二十三章	直流电动机	353
第一节	直流电动机的基本方程式	353
第二节	直流电动机的工作特性	355
第三节	直流电动机的起动	361

第四节	直流电动机的调速	366
第五节	直流电动机的制动	367
第六节	整流电源供电对直流电动机的影响	369
第七节	小结	370
第二十四章	直流电机的换向	373
第一节	换向过程	373
第二节	换向的电磁理论	374
第三节	改善换向的方法	377
第四节	小结	379
第二十五章	特种直流电机	381
第一节	无刷直流电动机	381
第二节	直流伺服电动机	392
第三节	直流测速发电机	397
习题答案		400
模拟试卷及解答		417
参考文献		459
附录 电机学相关常用单位		460

同步电机均为交流电机。本书将按此分类逐一论述。

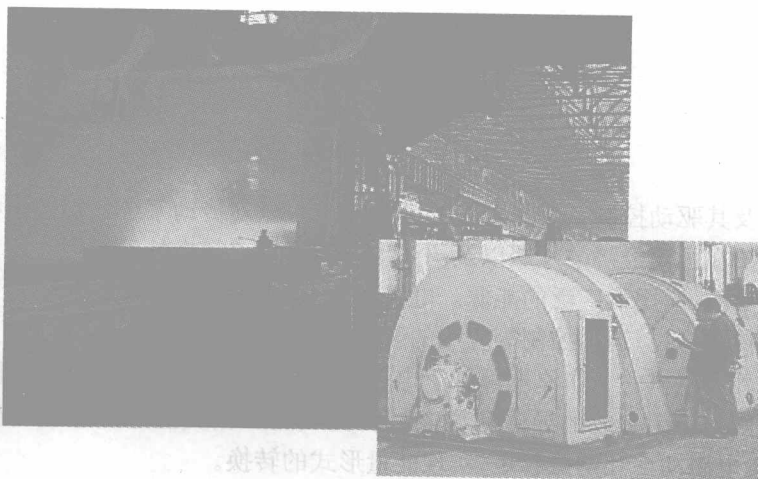


图 0-1 轧钢用电动机

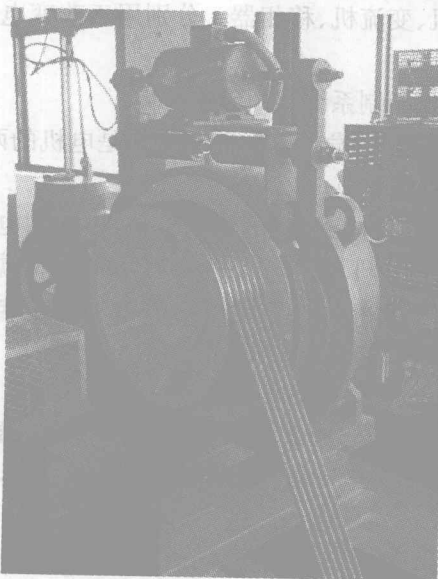


图 0-2 电梯曳引电动机及驱动系统

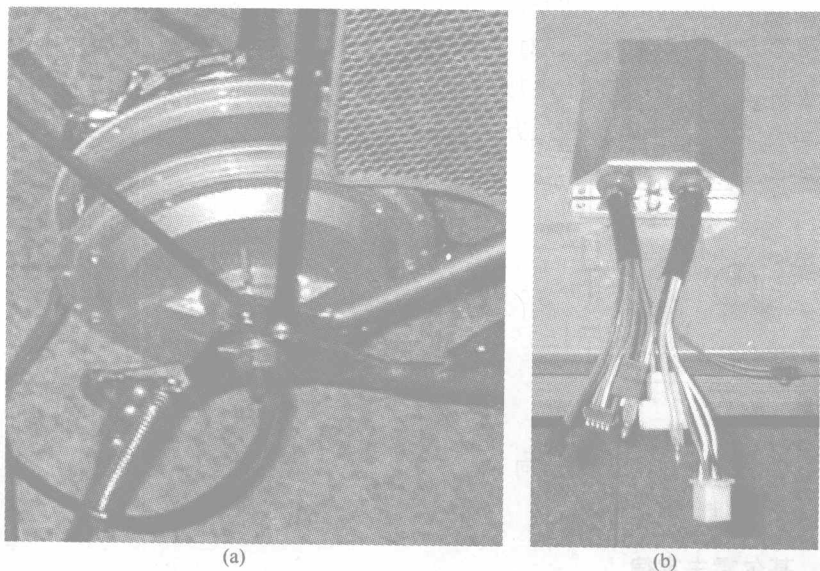


图 0-3 电动自行车驱动用电动机及其驱动控制器
(a)电动机;(b)驱动控制器

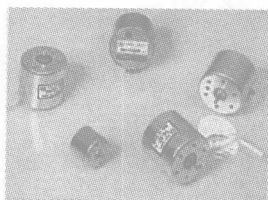


图 0-4 录音设备用微电机



图 0-5 风力发电机

第二节 电路的有关概念

一、电路参数的正方向

常用的电路元件有电阻、电感和电容。由于电阻数值的大小随温度的改变而变化,本书中未作特别注明的电阻均指在温度为 75°C 时的电阻值。电路中主要的

物理量有电压、电势、电流、功率。表征电路特性的数学表达式都与电压、电流等物理量的参考方向的规定有关。对于受电端,通常规定电压和电流的正方向一致,如图 0-6 和图 0-7 所示,即假定电压的正方向是从 A 指向 X,则电流的正方向也是从 A 经过 R 流向 X。电势的正方向在变压器中往往取为和电流正方向一致。

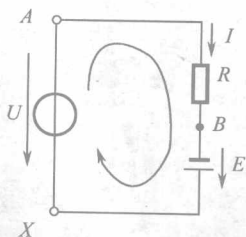


图 0-6 电路物理量的正方向

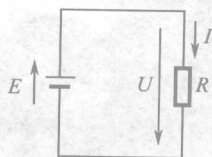


图 0-7 回路电压

二、基尔霍夫定律

基尔霍夫电流定律 电路中的任意节点在任意时刻流入与流出电流之代数和恒等于零。其数学表达式为

$$\sum i = 0 \quad (0-1)$$

式中,各 i 的正方向均可取为流入方向,即 i 为正值时,实际电流为流向该节点; i 为负值时,实际电流为流出该节点。

基尔霍夫电压定律 电路中的任一回路在任意时刻沿着回路循行方向所有支路的电位降之和恒为零。其数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (0-2)$$

对于图 0-6 所示的电路,其回路方程为

$$IR - E - U = 0$$

即

$$U = -E + IR \quad (0-3)$$

该电压平衡方程式也可看作:加在 AX 两端的端电压 U 由两部分组成,一部分为电阻 R 上的端电压 ($U_{AB} = IR$),另一部分为和电势 E 相对应的端电压 ($U_{BX} = -E$)。

第三节 电磁感应的有关概念

一、磁路的基尔霍夫定律和全电流定律

在通电导线周围存在着磁场。通常,磁力线的正方向与产生该磁力线的电流

的正方向按符合右螺旋关系选取。

图 0-8 为带有并联分支的铁心磁路。中间的铁心柱上绕有 N 匝励磁绕组, 绕组内通过的励磁电流为 i , 则励磁绕组周围匝链磁通。若在铁心的分支部位作一个闭合面 S , 如图所示。假设穿入闭合面 S 的磁通有 ϕ , 穿出闭合面 S 的磁通有 ϕ_1 和 ϕ_2 , 则

$$\phi = \phi_1 + \phi_2$$

即

$$\phi - \phi_1 - \phi_2 = 0$$

或

$$\sum \phi = 0 \quad (0-4)$$

式中, 磁通的正方向可取穿入闭合面的方向, 即穿入闭合面的磁通为正值, 穿出闭合面的磁通为负值。

式(0-4)表明: 穿入(或穿出)任意一个闭合面的总磁通量恒等于零(或者说, 穿入任意一个闭合面的磁通量恒等于穿出该闭合面的磁通量)。这就是磁通的连续性定律, 类比电路的基尔霍夫第一定律(基尔霍夫电流定律), 可称该定律为磁路的基尔霍夫第一定律。

全电流定律指出, 沿着磁力线闭合积分等于该闭合回路内所包围的导体的电流的代数和。按上述正方向规定时, 全电流定律的数学表达式为路径磁场强度 H 的线积分:

$$\oint_l H \cdot dl = \sum i \quad (0-5)$$

把全电流定律用于电机和变压器的磁路时, 可将该闭合的磁回路分为 n 段磁路, 则式(0-5)简化为

$$\sum_{i=1}^n H_i l_i = Ni \quad (0-6)$$

式中, H_i ——第 i 段磁路磁场强度(A/m);

l_i ——第 i 段磁路的平均长度(m);

Ni ——磁势(A或安匝), 通常用符号 F 来表示, 即 $F = Ni$;

N ——流过电流 i 的导体数。

在式(0-6)中, $H_i l_i$ 为第 i 段磁路的磁位降(或称磁压降)。式(0-6)表明: 沿任何一条闭合磁路的总磁势恒等于该闭合磁路中各段磁位降的代数和。类比电路中的基尔霍夫第二定律, 可称之为磁路的基尔霍夫第二定律。

磁场强度 H 与磁感应强度 B 的关系为

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (0-7)$$

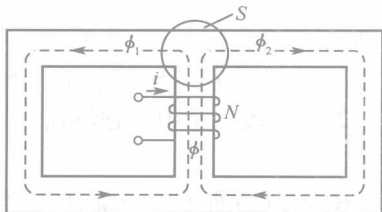


图 0-8 磁路的基尔霍夫第一定律