



武汉大学
百年名典

电机学

■ 陈道舜 主编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



武汉大学
百年名典

电 机 学

陈道舜 主编



武汉大学出版社
WUHAN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

电机学/陈道舜主编. —武汉: 武汉大学出版社, 2013. 11

武汉大学百年名典

ISBN 978-7-307-11543-9

I. 电… II. 陈… III. 电机学—高等学校—教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 210321 号



责任编辑:李汉保

责任校对:汪欣怡

版式设计:马 佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 湖北恒泰印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 35.25 字数: 506 千字 插页: 4

版次: 2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-11543-9

定价: 88.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。



武 汉 大 学 百 年 名 典

自 然 科 学 类 编 审 委 员 会

主任委员 李晓红

副主任委员 卓仁禧 周创兵 蒋昌忠

委员 (以姓氏笔画为序)

文习山	宁津生	石 兢	刘经南
何克清	吴庆鸣	李文鑫	李平湘
李晓红	李德仁	陈 化	陈庆辉
卓仁禧	周云峰	周创兵	庞代文
易 帆	谈广鸣	舒红兵	蒋昌忠
樊明文			

秘书长 李平湘

社 会 科 学 类 编 审 委 员 会

主任委员 韩 进

副主任委员 冯天瑜 骆郁廷 谢红星

委员 (以姓氏笔画为序)

马费成	方 卿	邓大松	冯天瑜
石义彬	余双好	汪信砚	沈壮海
肖永平	陈 伟	陈庆辉	周茂荣
於可训	罗国祥	胡德坤	骆郁廷
涂显峰	郭齐勇	黄 进	谢红星
韩 进	谭力文		

秘书长 沈壮海

陈道舜 男，（1930—2005年），中共党员，出生于湖北武汉，是我国著名的电气工程专家和电力教育家，曾任原武汉水利电力学院电力系副主任。

陈道舜教授于1952年毕业于武汉大学工学院，1952—1953年留校任教，1953年转入原武汉水利电力学院任教。1953—1956年任原武汉水利电力学院电工电机教研室助教，1956—1980年任原武汉水利电力学院电工电机教研室讲师，1980—1988年任原武汉水利电力学院电力系电机教研室副教授，1988—1995年任原武汉水利电力学院电力系电机教研室教授。曾任电工学教研室副主任、主任、电工学与电机学教研室主任、电力系副主任，湖北省电机工程学会会员、湖北科普作家协会会员。陈道舜教授长期工作在本科生教学的第一线，教授电机学与电气测量，其主讲的《电机学》、《电工学》、《电工测量》等课程成为经典课程。陈道舜教授作为研究生导师为国家培养了大批电气工程人才。

陈道舜教授从事电力专业的教学和科学研究工作50余载，勤奋耕耘，忠诚科学，成绩卓越，师德高尚，是教师和学生的楷模。陈道舜教授翻译俄文H.Г.沃斯特罗克努托夫著《电气测量》一书，于1957年在电力工业出版社出版。陈道舜教授主编的《电气设备》和《电机学》两部教材分别于1961年，1987年在中国工业出版社和水利水电出版社出版。

《武汉大学百年名典》出版前言

百年武汉大学，走过的是学术传承、学术发展和学术创新的辉煌路程；世纪珞珈山水，承沐的是学者大师们学术风范、学术精神和学术风格的润泽。在武汉大学发展的不同年代，一批批著名学者和学术大师在这里辛勤耕耘，教书育人，著书立说。他们在学术上精品、上品纷呈，有的在继承传统中开创新论，有的集众家之说而独成一派，也有的学贯中西而独领风骚，还有的因顺应时代发展潮流而开学术学科先河。所有这些，构成了武汉大学百年学府最深厚、最深刻的学术底蕴。

武汉大学历年累积的学术精品、上品，不仅凸现了武汉大学“自强、弘毅、求是、拓新”的学术风格和学术风范，而且也丰富了武汉大学“自强、弘毅、求是、拓新”的学术气派和学术精神；不仅深刻反映了武汉大学有过的人文社会科学和自然科学的辉煌的学术成就，而且也从多方面映现了20世纪中国人文社会科学和自然科学发展的最具代表性的学术成就。高等学府，自当以学者为敬，以学术为尊，以学风为重；自当在尊重不同学术成就中增进学术繁荣，在包容不同学术观点中提升学术品质。为此，我们纵览武汉大学百年学术源流，取其上品，掬其精华，结集出版，是为《武汉大学百年名典》。

“根深叶茂，实大声洪。山高水长，流风甚美。”这是董必武同志1963年11月为武汉大学校庆题写的诗句，长期以来为武汉大学师生传颂。我们以此诗句为《武汉大学百年名典》的封面题词，实是希望武汉大学留存的那些泽被当时、惠及后人的学术精品、上品，能在现时代得到更为广泛的发扬和传承；实是希望《武汉大学百年名典》这一恢宏的出版工程，能为中华优秀传统文化的积累和当代中国学术的繁荣有所建树。

《武汉大学百年名典》编审委员会

再 版 前 言

电机学是一门经典而又不断发展的学科，历来是电气工程学科重要的专业基础课，在电气工程及其自动化专业的课程设置中具有关键地位。学习好该课程，不仅能为后续专业课程奠定坚实的理论基础，而且能够为今后学习和工作中遇到的技术问题提供分析方法和理论依据。但电机学是一门难学、难教的课程，课程理论性强，涉及的基础理论和实际知识面广。学生学习时觉得头绪多，概念性强，不易掌握与理解。编撰好电机学这门课的教材、教好这门课实属不易。

1989年6月，笔者刚参加工作，有幸成为陈道舜教授的助教。陈老师为人师表，学识渊博，教学过程认真负责，对同样的问题，不同的教材如何描述、如何处理都很清楚，也乐于把这些知识点、教学经验及技巧讲授给青年教师与学生。电机学是一门较难的课程，课间、课后总有学生问问题，陈老师总是不厌其烦地予以解答，深受学生喜爱。陈老师特别重视实践教学，学生做实验时他经常到实验室指导。由于电机的构造机理过于抽象，难以理解，陈老师积极奔走，购进变压器实物模型和电机模型。通过种种手段，激发学生的学习兴趣，提高课堂教学效率。陈老师也乐于与笔者分享教学心得，笔者受益匪浅。

陈道舜教授编写的《电机学》教材凝聚了他多年的教学经验。教材包括绪论、变压器、交流电机的绕组、电动势和磁动势、异步电机、同步电机和直流电机六大部分。教材以电机的运行原理与运行特性为主线，侧重阐述电机的基本概念、基本理论与分析方法，强调对电机运行原理与运行特性的深入理解和掌握。同时为适应专业需要，适当注意电机作为传动机构中执行元件时的功能。教材精选了典型的

例题和适量的、难易程度不同的习题，便于学生检查基本概念的掌握，加深对重要理论知识和方法的理解。书后还附有习题答案，便于读者自学。教材取材合理，结构严谨，叙述清晰，重点突出，循序渐进。本教材于1987年11月由水利水电出版社首次出版，在相关专业使用，受到广泛的好评，是一部具有特色的电机学教材。

今年恰逢武汉大学迎来建校120周年庆典，武汉大学出版社将陈道舜教授主编的《电机学》一书收录入《武汉大学百年名典》重新出版，是对陈道舜教授的缅怀，同时激励年轻一代学者努力学习好电气工程的基础理论知识，为我国电气工业技术进步作出贡献。

应黎明

2013年7月于武汉大学

前 言

本书是根据 1982 年 10 月在西安召开的水电站动力装置工程专业教材会议制定的电机学教学大纲与 1983 年 4 月在武汉召开的水利水电专业电类教材会议审议的水电站动力装置工程专业、机电排灌工程专业教学大纲编写的。

本书由武汉水利电力学院陈道舜副教授主编，华北水利水电学院周念祖同志、河海大学熊寿昌同志与陕西机械学院雷践仁同志参加编写，由陕西机械学院侯恩奎副教授主审。

周念祖同志编写第 1 章 ~ 第 5 章；熊寿昌同志编写第 14 章 ~ 第 16 章、第 18 章与第 19 章；雷践仁同志编写第 6 章、第 17 章、第 21 章与第 22 章；陈道舜同志编写概论、第 8 章 ~ 第 13 章、第 20 章与附录 I、附录 II。此外，陈道舜同志与雷践仁同志合编了第 7 章。

本书在编写过程中，承湖北工学院周克定教授提出宝贵意见，华中工学院陶醒世教授对本书进行了润色，武汉水利电力学院陈运校同志也参加了润色工作，在此表示感谢。

本书承沈阳变压器研究所、哈尔滨电机厂、东方电机厂与上海电机厂提供有关资料，在此致以谢意。

由于经验不足，本书可能有不少缺点，欢迎读者批评指正。

作 者

1987 年 10 月

主要符号表

a	直流电枢绕组并联支路对数；交流绕组每相并联支路数
B_{δ}	气隙磁密
B_a	电枢反应磁场磁密
B_{ad}	直轴电枢反应磁场磁密
B_{aq}	交轴电枢反应磁场磁密
B_{f1}	励磁磁场的基波磁密
C	常数；电容
C_e	电势常数
C_M	转矩常数
E_a	直流电机感应电势；交流电机电枢反应电势
E_0	空载电势
E_m	电势最大值
E_1 、 E_2	原、副边主电势
$E_{1\sigma}$ 、 $E_{2\sigma}$	原、副边漏电势
E_{ad}	直轴电枢反应电势
E_{aq}	交轴电枢反应电势
e_L	自感电势
e_M	互感电势
F_a	电枢磁势(基波幅值)
F_{ad}	直轴电枢磁势(基波幅值)
F_{aq}	交轴电枢磁势(基波幅值)
F_{f1}	励磁磁势(基波幅值)
F_{δ}	气隙磁势(基波幅值)

F_1 、 F_2	原、副边磁势(基波幅值)
F_0	励磁磁势, 空载磁势
f_N	额定频率
f_1	异步电机定子频率
f_2	异步电机转子频率
I_f	励磁电流
I_a	电枢电流
I_d	同步电机电枢电流的直轴分量(直轴电流)
I_N	额定电流
I_k	短路电流
I_L	负载电流
I_0	激磁电流、空载电流
I_q	同步电机电枢电流的交轴分量(交轴电流)
I_{st}	启动电流
I_μ	磁化电流
k_M	过载能力
k	变比
k_a	自耦变压器变化; 隐极同步电机电枢磁势的折算系数
k_μ	饱和系数
k_d 、 k_q	直轴、交轴电枢磁密分布曲线的波形系数
k_{ad} 、 k_{aq}	直轴、交轴电枢磁势的折算系数
k_{q_1}	电势或磁势基波的绕组分布系数
k_{y_1}	电势或磁势基波的绕组节距系数
k_{w_1}	电势或磁势基波的绕组系数
k_c	短路比
M	转矩; 互感; 电磁转矩
M_N	额定转矩
M_{em}	电磁转矩
M_1	原动机转矩; 输入转矩
M_2	负载转矩; 输出转矩

M_0	空载制动转矩
m	相数
n_N	额定转速
n_1	同步转速; 定子基波旋转磁场转速
P_{mec}	机械功率
P_1	输入功率
P_2	输出功率
P_0	空载功率(空载损耗用 p_0)
p	损耗; 极对数
p_{Cu}	铜耗(电阻损耗)
p_{Fe}	铁耗
p_{mec}	机械损耗
p_{ad}	附加损耗
q	每极每相槽数
R_{st}	启动电阻
R_a	电枢回路总电阻
R_f	励磁回路总电阻
R_L	负载电阻
r_a	电枢绕组内电阻
r_f	励磁绕组内电阻
r_k	短路电阻
S_N	额定视在功率(额定容量)
s	转差率
s_m	发生最大电磁转矩时的转差率
s_N	额定转差率
T	时间常数; 周期
U_N	额定电压
U_φ 、 U_l	相电压、线电压
u	电压瞬时值; 虚槽数
u_k	阻抗电压(短路电压)

w_1 、 w_2	变压器原、副绕组匝数
x_+ 、 x_- 、 x_0	正序、负序、零序电抗
$x_{1\sigma}$ 、 $x_{2\sigma}$ (或 x_1 、 x_2)	原、副绕组漏电抗
x_k	短路电抗
y	节距; 合成节距
Z_1 、 Z_2	原、副绕组漏阻抗或异步电机定子、转子漏阻抗(复数)
Z_L	负载阻抗
Z_k	短路阻抗
z	复数阻抗的模(绝对值)
α	系数; 角度
β	系数; 角度
γ	电导率; 短距角
δ	气隙长度
η_N	额定效率
$\eta_{\max}$	最大效率
θ	温度; 功率角
μ	磁导率
Φ	磁通; 每极磁通; 变压器的主磁通
Φ_m	主磁通最大值
Φ_σ	漏磁通
$\Phi_{1\sigma}$ 、 $\Phi_{2\sigma}$	原、副绕组漏磁通的瞬时值
ϕ	相位角(功率因数角)
ψ	相位角(内功率因数角); 磁链
Ω	机械角速度
Ω_1	同步角速度
ω	角频率

目 录

概论	1
0.1 电机的作用	1
0.2 电机的理论基础	2
0.3 电机的主要类型	10
0.4 电机学的任务与学习方法	11
习题	12

第一篇 变 压 器

第1章 变压器的基本工作原理、类别和结构	15
1.1 变压器的基本工作原理	15
1.2 变压器的用途和分类	16
1.3 变压器的结构与额定值	19
小结	28
习题	29
第2章 变压器的基本原理	30
2.1 概述	30
2.2 变压器的空载运行	30
2.3 变压器的负载运行	40
2.4 变压器参数的测定	50
2.5 标么值	58
2.6 电压变化率及电压调节	63
2.7 变压器的损耗和效率	68

小结	73
习题	74
第3章 三相变压器	77
3.1 概述	77
3.2 三相变压器的磁路系统	77
3.3 三相变压器的电路系统——绕组的连接法和连接组	81
3.4 三相变压器绕组的连接法和磁路系统对空载电势 波形的影响	89
3.5 变压器的并联运行	93
3.6 变压器的V/V连接组	104
小结	106
习题	106
第4章 变压器的瞬变过程	109
4.1 概述	109
4.2 变压器的空载合闸	109
4.3 变压器的副边突然短路	114
4.4 变压器的过电压及其防护	119
小结	121
习题	121
第5章 特殊变压器	123
5.1 概述	123
5.2 三绕组变压器	123
5.3 自耦变压器	134
5.4 仪用互感器	142
小结	144
习题	144

第二篇 交流电机的绕组、电势和磁势

第 6 章 交流电机的绕组和电势	149
6.1 概述	149
6.2 槽电势星形图	153
6.3 三相绕组	154
6.4 在正弦分布磁场下的绕组电势	160
6.5 在非正弦分布磁场下绕组的谐波电势	164
6.6 电势中谐波的削弱方法	166
6.7 分数槽绕组	171
小结	176
习题	177
第 7 章 交流电机绕组的磁势	179
7.1 概述	179
7.2 单相绕组的脉振磁势	179
7.3 三相绕组合成磁势的基波	189
7.4 三相绕组合成磁势的高次谐波	195
小结	197
习题	198

第三篇 异步电机

第 8 章 异步电机的结构与运行状态	201
8.1 概述	201
8.2 异步电动机的基本工作原理	201
8.3 异步电机的三种运行状态	203
8.4 异步电机的主要结构部件	206
8.5 异步电动机的额定值	210
8.6 国产异步电机简介	211
小结	213

习题	213
第 9 章 异步电动机的运行原理	214
9.1 概述	214
9.2 转子静止时的异步电机	214
9.3 转子旋转时的异步电机	224
小结	237
习题	237
第 10 章 异步电动机的电磁转矩	239
10.1 概述	239
10.2 异步电动机中的能量转换关系、功率和转矩平衡方程式	239
10.3 电磁转矩与磁通和转子电流的关系	244
10.4 电磁转矩与转差率,最大转矩与启动转矩	247
10.5 $M=f(s)$ 曲线上的稳定运行区域	253
10.6 转矩的实用计算公式	255
小结	257
习题	257
第 11 章 异步电动机的工作特性	259
11.1 概述	259
11.2 异步电动机的工作特性	259
11.3 用直接负载法求取工作特性	262
11.4 异步电机参数的测定与工作特性的求取	264
小结	269
习题	269
第 12 章 三相异步电动机的启动和调速	270
12.1 概述	270