



“十三五”普通高等教育本科规划教材

DIANJIXUE

电机学

(第二版)

林荣文 主 编
林 珍 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

电机学

(第二版)

主 编 林荣文
副主编 林 珍
编 写 黄灿水 杨明发
主 审 陈益广

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书以变压器、直流电机、交流电机共同问题、异步电机、同步电机为研究对象。主要内容是通过电机的对称运行、稳态性能分析,使读者掌握电机的基本概念、基本原理和基本分析方法;其次是通过电机常见的不对称运行、瞬态过程分析和现代特种电机的介绍,使读者加深拓宽电机特殊结构和特殊运行知识,了解最新电机技术;再者通过介绍电机实验的仿真技术,使读者能在电脑上任性设置电机状况下,操作了解虚拟试验结果。书中附有大量例题、习题、实验原理和仿真案例,全书内容完整、主次分明,便于教学和自学。

本书可作为高等学校电气工程与自动化类专业(含电机电器、电气工程、电气技术、高电压、电力系统、电气与自动化等方向)的本、专科学生电机学课程的教材,也可供其他相关专业本科生、研究生学习,还可作为从事电机运行、设计、制造和仿真研究的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机学 / 林荣文主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2018.7
“十三五”普通高等教育本科规划教材
ISBN 978-7-5198-1220-1

I. ①电… II. ①林… III. ①电机学-高等学校-教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 035218 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 雷 锦 夏华香

责任校对: 王小鹏

装帧设计: 郝晓燕 张 娟

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2012 年 2 月第一版 2018 年 7 月第二版

印 次: 2018 年 7 月北京第五次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 24.75

字 数: 599 千字

定 价: 65.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

本书是在 2011 年出版的普通高等教育“十二五”规划教材基础上全面修订的第二版。作为普通高等教育“十三五”规划教材,福建省“电机学”精品课程建设项目,福建省电气工程类创新人才培养实验区建设项目的规划教材而编写的。本书根据电气工程及其自动化专业教学大纲的要求,适应教学改革的需要,内容编排在强化基础知识、拓宽专业口径的同时,循序渐进、不断加深、推陈出新,力求夯实基础,培养和提高学生思考及解决问题的能力。本书的编写思路和特点:

(1) 本着从一般到特殊的认识规律,注重基本概念、基本理论和基本分析方法的阐述,使学生建立牢固的物理概念,学会用工程观点来分析和解决问题。

(2) 本书电机理论是基于结构对称,稳定运行的分析基础,并辅以工作特性或机械特性的描述和定量分析;一些谐波、不对称、暂态等难点问题,以定性分析为主,突出叙述概念和分析方法。

(3) 为适应新的电机理论的发展与科研、生产上的需要,本书增加永磁电机、直线电机等特种电机章节。

(4) 为了服务区域经济,考虑东南地区的电机产业之特点和相关电气工程人才培养,电机理论知识和分析方法趋向中小型电机延伸。

(5) 本书各篇内容重点、难点层次分明,又具有相对独立性;选学内容和讲述次序可以根据具体情况进行调整。

(6) 本书与第一版比较,有以下不同:① 将直流电机提到第二篇,在交流电机之前学习,是考虑到直流电机工作原理和电路方程相对交流电机简单,且直流电机实验不依赖交流电机知识,但交流异步电机实验需要直流电机调节负载,交流同步电机实验需要直流电机调速拖动,有必要先掌握直流电机运行操作;② 既考虑直流电机的共性内容的统一,如结构、绕组、电磁原理、换向等,又考虑负载特性完全不同,安排直流发电机和直流电动机分两章介绍;③ 基于现代虚拟仿真技术在电机研究的应用不断发展,本书加了第六篇《电机实验仿真》,引导读者学习了解 MATLAB/Simulink 中“四大电机”及各种器件的组建模块和系统搭建方法,使读者在不具备实验条件的情况下,较直观地感性认识电机的运行性能;④ 在第一篇添加分裂变压器、有载调压等特殊结构和特殊运行变压器,扩展变压器实用性知识的学习;⑤ 本着现代高等教育应用型转型发展对教学模式改革需求,本版梳理和添加许多代表性例题,注重真实电机产品数据的案例教学,加强学生能力培养。

本书由福州大学电机教学团队合作编写。其中，林荣文教授主编，负责第一章、第三篇和第四篇的编写；林珍副教授负责第五篇的编写；杨明发副教授负责第二篇的编写；黄灿水讲师负责第一篇、第六篇的编写，全书再由林荣文教授统一编核写序。本书天津大学陈益广教授担任全书主审，提出许多宝贵意见和建议，使我们受益匪浅，在此表示衷心的感谢。

由于编者的经验和水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者
2018年5月

主要符号表

A	A 相绕组；线负荷	D_i	电枢内径
a	交流绕组并联支路数；直流绕组并联支路对数；复数算子	D_k	换向器外径
B	B 相绕组；磁通密度	E	直流电动势；交流电动势
b	宽度长；弧长；气隙磁场瞬时值	e	电动势瞬时值
B_{a1}	电枢反应基波磁通密度	E_0	空载电动势
B_{ad}	直轴（d 轴）电枢反应磁通密度	E_1	一次侧电动势
B_{ad1}	直轴（d 轴）电枢反应基波磁通密度	$E_{1\sigma}$	一次侧漏电动势
B_{aq}	交轴（q 轴）电枢反应磁通密度	E_2	二次侧电动势
B_{aq1}	交轴（q 轴）电枢反应基波磁通密度	E_{2S}	感应电机转子转动时每相电动势
B_{av}	平均磁通密度	$E_{2\sigma}$	二次侧漏电动势
B_f	励磁磁通密度	E_a	电枢反应电动势；交流电枢反应电动势
B_{f1}	励磁基波磁通密度	E_{c1}	一根导体基波电动势
B_k	换向区域的气隙磁通密度	e_k	换向元件旋转电动势
b_k	换向片宽度	e_L	自感电动势
B_m	磁通密度幅值	E_{L1}	三相绕组基波线电动势
B_{m1}	基波磁通密度幅值	E_m	电动势最大值
B_r	剩余磁通密度	e_M	互感电动势
b_s	电刷宽度	E_q	q 个线圈合成电动势
B_δ	气隙磁通密度	E_{q1}	一个线圈组基波电动势
c	简化电路修正系数；比热	e_r	换向元件电抗电动势
C	C 相绕组；每槽圈边数；电容；比热	E_{t1}	一匝线圈基波电动势
C_e	电动势常数；涡流损耗系数	E_{y1}	一个线圈基波电动势
C_{Fe}	铁心损耗系数	E_δ	合成电动势
C_h	磁滞损耗系数	E_{ph}	每相电动势
C_T	转矩常数	E_{1ph}	一相绕组基波电动势
D_a	电枢外径	E_{Nph}	额定相电动势

F	磁动势；力	I_f	直流励磁电流
f	频率；磁动势瞬时值；力瞬时值	I_{Fe}	励磁电流中铁损耗电流
F_1	三相定子合成磁动势基波振幅	I_{fN}	额定励磁电流
f_2	转子感应电动势频率	I_h	励磁电流中磁滞损耗电流
F_2	三相转子合成磁动势基波振幅	I_k	短路电流
F_a	电枢磁动势幅值	I_N	额定电流
F_{ad}	直轴电枢磁动势幅值	I_{Nph}	额定相电流
F_{aq}	交轴电枢磁动势幅值	I_s	串励绕组电流
F_{aqd}	电枢反应等效去磁安匝数	I_{st}	起动电流
F_{cl}	线圈磁动势的基波振幅	I_μ	励磁电流中磁化电流
F_D	定子磁压降	J	机组转动惯量
f_e	电磁力	j	电流密度
F_{m1}	单相绕组磁动势的基波振幅	K	直流电动机换向片数
f_N	额定频率	k	变压器电动势变比；匝比
F_{q1}	线圈组磁动势的基波振幅	k_a	隐极电动机主极磁动势折算系数
F_S	转子磁压降	k_{ad}	凸极电动机直轴电枢反应磁动势折算系数
F_δ	气隙磁压降；气隙合成磁动势幅值	k_A	自耦变压器变比
G	重力	k_d	交流绕组分布系数
g_m	电导	k_e	感应电动机电动势变比
H	磁场强度	k_{fh}	隐极同步电机主极磁动势波形系数
H_c	矫顽磁力	k_{ft}	凸极同步电机主极磁动势波形系数
h_m	主磁极计算高度	k_i	感应电动机电流变比
h_z	电枢齿计算高度	k_k	短路比
I	电枢电流；交流电流	K_M	感应电动机降压起动绕组降压率
i	电流瞬时值	K_m	过载能力；最大转矩倍数
I_{2s}	感应电动机转子转动时每相电流	k_N	交流绕组绕组系数
i_a	电枢导体电流	k_p	交流绕组短距系数
I_a	电枢电流	K_{st}	起动转矩倍数
i_c	交流绕组线圈电流	k_v	电压波形正弦畸变率
I_e	励磁电流中涡流损耗电流	k_μ	饱和系数
i_f	直流励磁电流瞬时值		

k_{σ}	主磁极漏磁系数	p_{mec}	机械损耗
L	自感	P_{N}	额定功率
l	电机几何尺寸长度	Q	无功功率; 物体单位时间产生热量
L_{a}	转子轭平均长度	q	每极每相槽数
L_{j}	定子轭平均长度	r	电枢半径
L_{σ}	漏磁电感	R	绕线转子感应电动机转子附加电阻
m	场移; 同步电动机定子相数	r_2'	变压器二次侧绕组电阻归算值; 感应电动机转子绕组电阻归算值
M	互感	r_1	变压器一次侧绕组电阻; 感应电动机定子绕组电阻
m_1	定子相数	r_2	变压器二次侧绕组电阻; 感应电动机转子绕组电阻
N	一条支路串联匝数; 直流电动机绕组总导体数	r_{a}	电枢绕组电阻
n	转速	R_{a}	电枢回路总电阻
n_1	同步转速	R_{aj}	电枢回路外接电阻
N_1	变压器一次侧绕组匝数	r_{f}	励磁绕组电阻
N_2	变压器二次侧绕组匝数	R_{f}	励磁回路总电阻
n_2	转子磁动势相对转子速度	R_{fj}	励磁回路外接电阻
N_{c}	一个线圈匝数	r_{k}	变压器短路电阻
N_{f}	励磁绕组匝数	R_{L}	负载电阻
P	有功功率	r_{m}	变压器励磁电阻; 感应电动机励磁电阻
p	极对数	R_{m}	磁阻
p_0	空载功率 (损耗)	S	视在功率; 面积; 每槽导体数; 线圈数
P_1	输入有功功率	s	转差率; 秒
P_2	输出有功功率	s_{m}	临界转差率
p_{ad}	附加损耗	S_{N}	额定容量; 额定视在功率
p_{Cu}	铜损耗	T	电磁转矩; 时间常数; 周期
p_{e}	涡流损耗	t	时间; 温度
p_{Fe}	铁损耗	T_{d}''	超瞬变电流衰减时间常数
p_{h}	磁滞损耗	T_{d}'	瞬变电流衰减时间常数
P_{i}	机械功率	T_0	空载转矩
p_{kN}	变压器额定短路损耗		
P_{M}	电磁功率		

T_1	输入转矩	x_m	变压器励磁电抗; 感应电动机励磁电抗
T_2	输出转矩	x_p	同步电动机保梯电抗
T_a	非周期电流衰减时间常数	x_q	同步电动机交轴同步电抗
T_J	加速转矩	x_s	同步电动机同步电抗
T_L	负载转矩	x_σ	同步电动机的定子(电枢)绕组漏抗
T_m	最大转矩	y	交流绕组节距; 直流绕组合成节距
t_{\max}	最高容许温度	y_1	第一节距
T_N	额定转矩	y_2	第二节距
T_{pi}	牵入转矩	y_k	换向器节距
T_{st}	起动转矩	Z	交流阻抗; 直流机实槽数
U	直流电压; 交流电压	Z_-	负序阻抗
u	电压瞬时值	Z_+	正序阻抗
U_f	励磁电压	Z_0	零序阻抗
U_{fN}	额定励磁电压	Z_1	变压器一次侧绕组阻抗; 感应电动机定子绕组阻抗
U_k	变压器短路电压	Z_2	变压器二次侧绕组阻抗; 感应电动机转子绕组阻抗
U_M	磁位差	Z_b	阻抗基值
U_N	额定电压; 交流额定电压	Z_e	虚槽数
U_{Nph}	额定相电压	Z_k	短路阻抗
W	功率; 能量	Z_L	负载阻抗
x'_2	变压器二次侧绕组漏抗归算值; 感应电动机转子绕组漏抗归算值	Z_m	励磁阻抗
x_1	变压器一次侧绕组漏抗; 感应电动机定子绕组漏抗	α	直流电动机绕组槽距角
x_2	变压器二次侧绕组漏抗; 感应电动机转子绕组漏抗	α_{Fe}	变压器、感应电动机铁损耗角
x_{2s}	感应电机转子转动时每相电抗	β	直流电动机绕组短距角; 交流机负载系数
x_a	同步电动机电枢反应电抗	δ	功率角; 气隙
x_{ad}	同步电动机直轴电枢反应电抗	ΔU	电压变化率; 直流电动机电刷接触压降
x_{aq}	同步电动机交轴电枢反应电抗	ΔU_b	直流电动机电刷接触压降
x_d	同步电动机直轴同步电抗	ε	小于1的分数
x_k	变压器短路电抗	η	效率

η_{\max}	最大效率	Φ_1	基波磁通
η_N	额定效率	$\Phi_{1\sigma}$	变压器一次侧漏磁通
θ	功率因数角; 温升	$\Phi_{2\sigma}$	变压器二次侧漏磁通
θ_N	额定温升	Φ_a	电枢反应磁通
Λ	磁导	Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通
λ	表面散热系数	Φ_{aq}	交轴电枢反应磁通
μ	磁导率	Φ_m	主磁通
μ_{Fe}	铁心磁导率	Φ_v	v 次谐波磁通
σ	电导率	Φ_σ	漏磁通
τ	极距; 硅钢片厚度; 温升	Ψ	磁链
τ_∞	稳态温升	ψ	内功率因数角
τ_{\max}	温升限度	Ω	机械角速度
Φ	磁通量	ω	电角频率
φ	磁通瞬时值	Ω_1	同步角速度
Φ_0	空载磁通		

目 录

前言	
主要符号表	
第一章 基础理论	1
第一节 概述.....	1
第二节 电机磁路及铁磁材料.....	2
第三节 电机主要制造材料.....	10
第四节 三相交流电路的有关概念.....	12
思考题.....	14
习题.....	14

第一篇 变 压 器

第二章 变压器工作原理和运行分析	19
第一节 变压器基本结构.....	19
第二节 变压器空载运行.....	24
第三节 变压器负载运行.....	30
第四节 标么值.....	34
第五节 变压器参数测定.....	35
第六节 变压器运行性能.....	38
小结.....	42
思考题.....	43
习题.....	44
第三章 三相变压器运行分析	47
第一节 三相变压器磁路.....	47
第二节 三相变压器联结组别.....	48
第三节 三相变压器感应电动势波形分析.....	52

第四节	变压器的并联运行	54
小结	.....	58
思考题	.....	58
习题	.....	59
第四章	电力系统中的特殊变压器	61
第一节	三绕组变压器	61
第二节	自耦变压器	63
第三节	互感器	64
第四节	分裂变压器	65
第五节	有载调压变压器	67
小结	.....	70
思考题	.....	70
习题	.....	71
第五章	变压器不对称运行和瞬态过程	73
第一节	对称分量法	73
第二节	三相变压器各序阻抗和等效电路	74
第三节	Yyn 连接三相变压器单相运行	77
第四节	三相变压器空载合闸过程	78
第五节	三相变压器二次侧突然短路过程	80
小结	.....	82
思考题	.....	82
习题	.....	83

第二篇 直 流 电 机

第六章	直流电机的基本原理和电磁关系	87
第一节	直流电机的工作原理	87
第二节	直流电机的基本结构	89
第三节	直流电机的额定值	91
第四节	直流电枢绕组	91
第五节	直流电机磁场与电枢反应	98
第六节	感应电动势和电磁转矩	105
小结	.....	107
思考题	.....	108
习题	.....	108
第七章	直流发电机	110
第一节	直流电机的励磁方式	110
第二节	直流发电机的基本方程式	111
第三节	他励直流发电机的运行特性	114

4.4	第四节	自励发电机的电压建起	116
4.5	第五节	自励发电机的外特性	118
4.6	小结		120
4.7	思考题		120
4.8	习题		121
8	第八章	直流电动机	122
8.1	第一节	直流电动机的基本方程式	122
8.2	第二节	直流电动机的工作特性	123
8.3	第三节	直流电动机的机械特性	126
8.4	第四节	直流电动机的启动	129
8.5	第五节	直流电动机的制动	131
8.6	第六节	直流电动机的调速	135
8.7	小结		138
8.8	思考题		138
8.9	习题		138
9	第九章	直流电机的换向	140
9.1	第一节	直流电机的换向过程	140
9.2	第二节	换向的电磁原理	141
9.3	第三节	产生火花的原因	144
9.4	第四节	改善换向的方法	145
9.5	小结		147
9.6	思考题		147
第三篇 交流电机的共同部分			
10	第十章	交流绕组理论	151
10.1	第一节	交流绕组构成原则	151
10.2	第二节	三相单层绕组	153
10.3	第三节	三相双层绕组	156
10.4	小结		158
10.5	思考题		158
10.6	习题		159
11	第十一章	交流绕组电动势	160
11.1	第一节	交流绕组基波电动势	160
11.2	第二节	交流绕组谐波电动势	166
11.3	小结		170
11.4	思考题		170
11.5	习题		171

第十二章 交流绕组磁动势	172
第一节 单相绕组磁动势	172
第二节 三相绕组基波合成磁动势	175
第三节 三相绕组谐波合成磁动势	180
小结	182
思考题	183
习题	183
第十三章 电机的发热和冷却	185
第一节 电机的温升及温升限度	185
第二节 电机的定额	187
第三节 电机的发热和冷却	188
第四节 电机的冷却方式	192
第五节 电机的防护型式	195
小结	195
思考题	196

第四篇 异步电机

第十四章 异步电机的基本结构和工作原理	199
第一节 异步电机的用途与分类	199
第二节 异步电机的基本结构	199
第三节 异步电机的铭牌和额定值	203
第四节 异步电机的工作原理	203
小结	206
思考题	206
习题	207
第十五章 异步电机的基本电磁关系	208
第一节 异步电机的磁路	208
第二节 转子静止时异步电动机的等效电路	209
第三节 转子转动时异步电动机的等效电路	212
第四节 异步电动机等效电路的简化	215
第五节 异步电动机的参数及测定	217
小结	220
思考题	221
习题	221
第十六章 异步电动机的功率和转矩	223
第一节 异步电动机的功率和转矩平衡式	223
第二节 异步电动机的机械特性	226
第三节 异步电动机的稳定运行条件	230

第四节 异步电动机的工作特性	232
小结	233
思考题	234
习题	235
第十七章 异步电动机的起动和调速	237
第一节 异步电动机的起动电流和起动转矩	237
第二节 异步电动机的起动	237
第三节 异步电动机的调速	246
第四节 异步电动机的电磁制动	250
小结	253
思考题	253
习题	254
第十八章 特种异步电机	255
第一节 单相异步电动机	255
第二节 直线感应电动机	259
第三节 异步发电机	261
小结	264
思考题	265
习题	265

第五篇 同 步 电 机

第十九章 同步电机的基本结构和工作原理	269
第一节 同步电机的基本结构形式	269
第二节 同步电机的基本工作原理	273
第三节 同步发电机的励磁系统	274
第四节 同步电机的额定值	276
小结	276
思考题	277
第二十章 同步电机的基本理论和运行特性	278
第一节 同步电机的空载运行	278
第二节 对称负载时同步电机的电枢反应	281
第三节 隐极同步发电机的分析方法	285
第四节 凸极同步发电机的分析方法	289
第五节 同步发电机对称运行时的特性	295
第六节 同步发电机的参数测定和短路比	300
小结	306
思考题	306
习题	307

第二十一章	同步发电机在大电网上运行	309
第一节	同步发电机的并联运行	309
第二节	同步电机的功率、转矩及功角特性	312
第三节	同步发电机有功功率调节和静态稳定	318
第四节	无功功率的调节和 V 形曲线	321
第五节	同步电动机与同步补偿机	324
第六节	稀土永磁同步电动机	327
	小结	330
	思考题	331
	习题	331
第二十二章	同步发电机的不对称运行与突然短路	333
第一节	同步发电机不对称运行时各序阻抗与等效电路	333
第二节	三相同步发电机的不对称稳定短路	337
第三节	同步发电机突然短路的物理过程	341
第四节	同步发电机的瞬态电抗和超瞬态电抗	344
第五节	同步发电机突然短路电流	347
	小结	350
	思考题	351
	习题	351

第六篇 电机实验与仿真

第二十三章	电机实验与仿真	355
第一节	电机实验与仿真概述	355
第二节	变压器仿真	358
第三节	直流电机仿真	362
第四节	三相异步电机仿真	369
第五节	同步电机仿真	371
	小结	375
	参考文献	377

第一章 基础理论

第一节 概述

电能与石油、天然气、煤炭等能源相比,具有明显的优越性,它适合于大量生产、调配、输送和控制。电能不仅在生产与生活中广泛得到应用,而且在未来必将成为主要能源。电机是一种机电能量转换或信号转换的电磁机械装置,在电力工业,电机作为电能生产、输送和应用的主要装置;在工矿企业、农业、交通运输业、国防、科学文化及日常生活等方面也都是十分重要的设备。

电机的种类很多,一般从功能或理论上分类。

就能量转换的功能来看,电机可分类如下。

- (1) 发电机。它将机械功率转换为电功率。
- (2) 电动机。它将电功率转换为机械功率。
- (3) 变压器。它将电功率转换成电压不同的电功率,没有机电能量转换;类似的装置还有变流机、变频器、移相机。
- (4) 控制电机。它在机电系统中不以功率传递为主,而是对信号进行调节、放大和控制等职能。

就电机的理论原理来看,电机有“四大电机”,可分类如下。

- (1) 变压器。它是静止设备,输入与输出为交流电。
- (2) 异步机。它是旋转电机,供电或发电为交流电,受负载影响,速度没有固定。
- (3) 同步机。它是旋转电机,供电或发电为交流电,速度等于同步速度,固定不变。
- (4) 直流机。它是旋转电机,供电或发电为直流电,速度没有固定。

电机的用途很广,在国民经济与日常生活各个行业中的作用如下。

- (1) 电力工业中。生产电能作用的发电机;电网上输送、分配电能时起升压或降压作用的变压器。
- (2) 工矿企业中。在机床、起重机、轧钢机,高炉、水泵、风机等驱动电动机。
- (3) 农业生产中。排灌、脱粒、碾米、榨油、抽水等驱动电动机。
- (4) 文教医疗中。特殊驱动、高精度微特电机。
- (5) 交通运输中。电力机车、电动汽车驱动电机,船用、汽车用电机等。
- (6) 国防工业中。各种控制电机、驱动电机。
- (7) 日常生活中。民用驱动电机,如厨房电器、健身器械、音响电器、冷热空调、电动玩具以及电动工具等驱动电动机。

总之,我国生产的中、小型和微型电机,已经有上百种系列,上千个品种,数千个规格的各种电机。随着生产的发展和科学技术水平的提高,电机新材料和新技术不断创新,许多高效能永磁电机、电子微机控制等特种电机的出现,提高了电机的各种性能,电机在国民经