

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电 机 学

陈世元 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电 机 学

主编 陈世元
编写 梁冠安 程小华 杨向宇
主审 蒋豪贤



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十五”规划教材。

本书共分七篇，外加绪论和附录。第一篇为直流机；第二篇为变压器；第三篇为交流绕组理论；第四篇为感应电机；第五篇为同步电机；第六篇为电机的共同问题，包括不对称运行、机电能量转换原理和热交换；第七篇为旋转电机的动态分析；附录列举了有关电磁场、电路和磁路、铁磁材料等基础知识。

全书的编写方针是：结合国情，博采众长，削枝强干，推陈出新。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化和电力系统及其自动化专业等其他相关专业的教材，亦可供有关科技人员作为参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/陈世元主编. - 北京: 中国电力出版社,
2004

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-2397-1

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 (2004) 第 052102 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 9 月第一版 2004 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 25 印张 575 千字

印数 0001—4000 册 定价 38.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多种教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、

中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222）

中国电力教育协会

前 言

本书是中国电力教育协会立项的普通高等教育“十五”规划教材。

本书共分七篇，外加绪论和附录。对于一些选修内容，章节后打有*号。每篇后面附有习题。本书可作为高等学校电气工程及其自动化和电力系统及其自动化等其他相关专业的教材，亦可供有关科技人员作为参考用书。

本书主要的特点是：①稳态部分注意基本概念、基本理论和基本方法的阐述，使学生掌握分析电机的基本方法，建立牢固的物理概念，为学习后续课程和今后解决日常遇到的工程问题作好准备。②阐明了机电能量转换的机制和条件，这一方面是对各种电机运行机制的总结和提升，对于将来从事各种新型电机的开发和研制，也是十分重要和具有启发意义的。③为适应近年来电机理论的发展和生产、科研上的实际需要，除稳态分析外，书中阐明了电机的动态分析。④对直流电机和过时的、繁琐的内容进行了删减，尽量以最简要的方法阐述其原理。适当加进一些学科前沿的内容。⑤将“磁路”等基础性内容归到附录中，供读者查询参考或根据各校实际情况选讲。⑥各篇的内容具有相对独立性，可根据实际需要和学时决定取舍，各篇次序在具体讲授时亦可以改变。

全书的编写方针是结合国情，博采众长，削枝强干，推陈出新，开拓视野；目标是编写一本取材精、科学性强、概念清、便于教学的简明教材。

本书由华南理工大学陈世元教授、梁冠安副教授、程小华副教授、杨向宇副教授等参加编写，陈世元担任主编。具体分工为：陈世元编写绪论、第二、三、四、六篇和附录等；梁冠安编写第一篇；程小华编写第五篇；杨向宇编写第七篇。陈世元对全书进行修改、补充、统稿和定稿。蒋豪贤教授作为主审对本书做了仔细审阅。

本书的编写得到华南理工大学各级领导的关怀和资助，各位同仁的热心帮助，哈尔滨大学电机研究所孙玉田高级工程师为本书提供了图片，在此一并表示谢意。

由于我们水平有限，编写时间仓促，书中一定有不少缺点和错误，恳切希望读者提出宝贵意见，以便在再版中修正。

编 者

2004年1月

常用符号一览表

A	面积; A相	F_{aq}	交轴电枢磁动势
a	交流绕组并联支路数; a相; 120° 复数算子	F_{ph1}	单相绕组的基波磁动势
a_m	直流电机并联支路对数	F_{phv}	单相绕组的 v 次谐波磁动势
B	磁通密度; B相	f	频率; 力; 磁动势的瞬时值
B_δ	气隙磁密	f_1	定子频率
B_{ad}	直轴电枢磁场磁密	f_2	转子频率
B_{aq}	交轴电枢磁场磁密	f_N	额定频率
b	宽度; b相	f_v	v 次谐波频率
C	c相	H	磁场强度
C_T	转矩常数	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
C_e	电动势常数	I_a	直流电机的电枢电流
c	比热容; c相	I_m	交流励磁电流(有效值)
D_1	定子内径	I_f	直流励磁电流
D_a	电枢外径	I_μ	励磁电流中的磁化分量
E	电动势(交流表示有效值)	I_N	额定电流
E_{ph}	相电动势	I_0	空载电流; 零序电流
E_0	空载电动势	I_k	短路电流; 堵转电流
E_1	变压器一次绕组(电机定子绕组)由主磁通感应的电动势有效值	I_{sc}	起动电流
E'_2	E_2 的归算值	I_1	变压器一次绕组(感应电机定子)电流
E_q	q 个线圈的合成电动势	I_2	变压器二次绕组(感应电机转子)电流
E_2	变压器二次绕组(电机转子绕组)由主磁通感应的电动势有效值	I'_2	I_2 的归算值
e	电动势的瞬时值	I_+	电流的正序分量
e_c	换向电动势; 绕组元件电动势	I_-	电流的负序分量
F	磁动势	i	电流的瞬时值
F_{q1}	q 个绕组元件的基波合成磁动势	J	转动惯量
F_a	电枢磁动势	K	换向片数
F_m	感应电机的励磁磁动势	K_{d1}	基波分布因数
F_{ad}	直轴电枢磁动势	K_{p1}	基波节距因数
		K_{w1}	基波绕组因数
		k	变压器的电压比

k_i	电流比	p_Ω	机械损耗
k_e	电动势比	Q	槽数; 热量
k_{dv}	v 次谐波分布因数	q	每极每相槽数
k_{pv}	v 次谐波的节距因数	R	电阻
k_{wv}	v 次谐波的绕组因数	R_f	励磁绕组电阻
L	自感	R_2	变压器二次绕组(感应电机转子)电阻
$L_{1\delta}$	变压器一次绕组(感应电机定子)的漏磁电感	R'_2	R_2 的归算值
$L_{2\delta}$	变压器二次绕组(感应电机转子)的漏磁电感	R_a	电枢电阻
l	长度	R_k	变压器(感应电机)的短路电阻
M	互感	R_Ω	旋转阻力系数
m_1	交流电机定子相数	R_m	励磁电阻; 磁阻
m_2	感应电机转子相数	R_1	变压器一次绕组(感应电机定子)电阻
N	每相串联匝数	S	视在功率
N_c	每个绕组元件的匝数	S_N	额定视在功率
n	转子转速	s	转差率
n_0	空载转速	s_N	额定转差率
n_N	额定转速	s_m	最大转矩时的转差率
n_s	同步转速	s_+	转子对正向旋转磁场的转差率
n_v	v 次谐波旋转磁场的转速	s_-	转子对反向旋转磁场的转差率
n_2	转子基波旋转磁场相对于转子的转速	T	转矩; 时间常数; 周期
P	功率	T_c	换向周期
P_N	额定功率	T'_a	直轴瞬态时间常数
P_e	电磁功率	T_a	电枢时间常数
P_Ω	转换功率	T_f	励磁绕组时间常数
P_k	堵转功率; 短路功率	T_N	额定转矩
P_0	空载功率	T_0	空载转矩
P_1	输入功率	T_e	电磁转矩
P_2	输出功率	T_{max}	最大转矩
p	损耗; 极对数;	T_{pi}	同步电动机的牵入转矩
p_0	时间的微分算子	T_{st}	起动转矩
p_{cu}	铜耗	T_2	负载转矩
p_{fe}	铁耗	t	时间; 温度
p_Δ	杂散损耗	U	电压(交流表示有效值)
		U_N	额定电压

U_{ph}	相电压	Z_m	励磁阻抗
U_1	电源电压; 定子端电压	Z_k	短路阻抗
U_+	正序电压	Z_+	正序阻抗
U_-	负序电压	Z_-	负序阻抗
U_0	空载电压; 零序电压	Z_0	零序阻抗
U_k	短路电压; 堵转电压	$Z_{1\sigma}$	变压器一次绕组(感应电机定子)的漏阻抗
u	电压的瞬时值	$Z_{2\sigma}$	变压器二次绕组(感应电机转子)的漏阻抗
W	功; 能	$Z'_{2\sigma}$	$Z_{2\sigma}$ 的归算值
W_m	磁场能量	Δn	转速调整率
X	电抗	Δu	电压调整率
X_+	正序电抗	$2\Delta U_s$	每对电刷的电压降
X_a	电枢反应电抗	α	空间电角度; 相邻两槽间的电角度
X_-	负序电抗	β	夹角; q 个绕组元件的总夹角
X_0	零序电抗	δ	气隙; 功率角
X_{ad}	直轴电枢反应电抗	ϵ	小数; 短距角
X_{aq}	交轴电枢反应电抗	η	效率
X_σ	定子漏抗	η_N	额定效率
X_s	同步电抗	η_{max}	最大效率
X_d	直轴同步电抗	θ	温升; 角度
X_q	交轴同步电抗	Λ	磁导
X_m	励磁电抗	Λ_σ	漏磁导
X_k	短路电抗	λ	单位面积的磁导; 导热系数
$X_{1\sigma}$	变压器一次绕组(感应电机定子)的漏抗	μ	磁导率; 转子谐波次数
$X_{2\sigma}$	变压器二次绕组(感应电机转子)的漏抗	μ_0	空气磁导率
$X'_{2\sigma}$	$X_{2\sigma}$ 的归算值	μ_{fe}	铁心磁导率
X'_d	直轴瞬态电抗	ν	谐波次数
X''_d	直轴超瞬态电抗	τ	漏抗
y	绕组合成节距	Φ	磁通量
y_1	第一节距	Φ_0	空载磁通; 同步电机的主磁通
y_2	第二节距	Φ_a	电枢反应磁通
y_c	换向器节距	Φ_m	变压器或感应电机的主磁通
Z	阻抗; 电枢导体数	Φ_σ	漏磁通
		Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通

Φ_{aq} 交轴电枢反应磁通
 Φ_ν ν 次谐波磁通
 ϕ 磁通量的瞬时值
 φ 相角；功率因数角
 φ_0 空载功率因数角
 φ_k 短路功率因数角

Ψ 磁链； \dot{E} 和 i 间的夹角
 Ψ_0 内功率因数角
 Ψ_2 感应电机转子的内功率因数角
 Ω 转子的机械角速度
 Ω_s 同步机械角速度
 ω 角频率，电角速度

目 录

序	
前言	
常用符号一览表	
绪论	1
第一节 电机在国民经济中的作用	1
第二节 电机发展简史	2
第三节 我国电机制造工业的发展概况	7
第四节 电机的分类	9
第五节 电机学课程性质	9
第六节 额定值与标么值	11

第一篇 直流电机

第一章 概述	14
第一节 直流电机的工作原理	14
第二节 直流电机的结构	17
第三节 直流电机的励磁方式	19
第四节 直流电机的铭牌数据	20
第二章 直流电机的电枢绕组	21
第一节 电枢绕组	21
第二节 单叠绕组	23
第三节 单波绕组	25
第四节 复合绕组	27
第三章 直流电机的运行原理	29
第一节 直流电机的空载运行	29
第二节 直流电机的负载运行	29
第三节 电枢绕组的感应电动势、电磁转矩和电磁功率	32
第四节 直流电机的基本方程式	34
第四章 直流电机的运行特性	39
第一节 直流发电机的运行特性	39
第二节 直流电动机的运行特性	43
第五章 直流电动机的起动、调速和制动	48
第一节 直流电动机的起动	48

第二节	直流电动机的调速	49
第三节	直流电动机的制动	53
第六章	直流电机的换向*	55
第一节	直流电机的换向过程	55
第二节	换向的电磁理论	56
第三节	产生火花的原因	57
第四节	改善换向的方法	58
	习 题	60

第二篇 变 压 器

第七章	概述	62
第一节	变压器的工作原理和分类	62
第二节	变压器的结构	63
第三节	变压器的铭牌数据	68
第八章	变压器的运行原理	70
第一节	变压器的空载运行	70
第二节	变压器的负载运行	74
第三节	变压器的数学模型	76
第九章	变压器的特性及并联运行	81
第一节	变压器的基本特性	81
第二节	变压器的运行特性	84
第三节	变压器的并联运行	87
第十章	三相变压器	91
第一节	三相变压器的磁路	91
第二节	三相变压器的电路	92
第三节	三相变压器的电动势波形	95
第十一章	特殊变压器	98
第一节	三绕组变压器	98
第二节	自耦变压器	101
第三节	互感器	104
第四节	分裂变压器*	105
	习 题	108

第三篇 交 流 绕 组

第十二章	交流绕组的构成	112
第一节	交流电机的工作原理	112

第二节	单层绕组	115
第三节	双层绕组	117
第四节	交流绕组的构成原则与分类	119
第十三章	交流绕组的感应电动势	121
第一节	正弦磁场下绕组的感应电动势	121
第二节	非正弦磁场下绕组的感应电动势	125
第十四章	交流绕组的磁动势	132
第一节	单相绕组的脉振磁动势	132
第二节	三相绕组的旋转磁动势	137
第三节	非正常电流情况下三相绕组的磁动势	140
习 题	141

第四篇 感应电机

第十五章	概述	144
第一节	感应电机的结构	144
第二节	感应电机的运行状态	146
第三节	感应电动机的铭牌数据	147
第十六章	感应电动机的运行原理	149
第一节	感应电动机的空载运行	149
第二节	感应电动机的负载运行	150
第三节	感应电动机的数学模型	153
第四节	感应电动机的功率和转矩	158
第五节	感应电动机的笼型转子	162
第十七章	感应电动机的特性	165
第一节	空载特性和短路特性	165
第二节	转矩—转差率特性	167
第三节	工作特性	174
第十八章	感应电动机的起动、调速和制动	177
第一节	感应电动机的起动	177
第二节	感应电动机的调速	182
第三节	感应电动机的制动	189
第十九章	特殊感应电机	191
第一节	单相感应电动机	191
第二节	感应发电机	196
第三节	直线感应电动机	197
习 题	198

第五篇 同步电机

第二十章 概述	201
第一节 同步电机的基本结构	201
第二节 同步电机的运行状态	203
第三节 同步电机的励磁方式	204
第四节 同步电机的铭牌数据	207
第二十一章 同步发电机的运行原理	208
第一节 同步发电机的空载运行	208
第二节 对称负载时的电枢反应	208
第三节 隐极同步发电机的数学模型	211
第四节 凸极同步发电机的数学模型	213
第五节 同步发电机的功率和转矩	217
第二十二章 同步发电机的特性	219
第一节 同步发电机的基本特性	219
第二节 同步发电机的参数测定	221
第三节 同步发电机的运行特性	224
第二十三章 同步发电机的并联运行	228
第一节 投入并联运行的条件和方法	228
第二节 同步发电机的功角特性	230
第三节 有功功率的调节和静态稳定	233
第四节 无功功率的调节	236
第二十四章 同步电动机和同步补偿机	238
第一节 同步电动机的运行原理	238
第二节 同步电动机的运行特性	240
第三节 同步电动机的起动	243
第四节 同步补偿机	245
习 题	246

第六篇 电机的共同问题

第二十五章 电机的不对称运行	250
第一节 对称分量法	250
第二节 变压器的不对称运行	252
第三节 感应电动机的不对称运行	256
第四节 同步发电机的不对称运行	260
第二十六章 电机的热交换	267

第一节	电机的温升和温升限度	267
第二节	电机的发热和冷却	269
第三节	电机的冷却方式	272
第四节	变压器的冷却方式	274
第二十七章	机电能量转换原理*	275
第一节	机电能量转换过程中的能量关系	275
第二节	双边激励机电装置中的机电能量转换	280
第三节	机电能量转换的条件	286
第四节	产生恒定电磁转矩的条件	289
第五节	交流电机的功率因数	291
	习 题	292

第七篇 电机的动态分析

第二十八章	电机动态分析的特点	294
第一节	运动方程的建立方法	294
第二节	运动方程的解法	297
第三节	坐标变换	302
第四节	非正弦电源供电时电机的分析方法*	309
第二十九章	直流电机的动态分析*	311
第一节	直流电机的运动方程	311
第二节	他励直流电动机的框图和传递函数	312
第三节	直流电动机起动过程的动态分析	316
第三十章	同步电机的动态分析	319
第一节	在相坐标系中同步电机的运动方程	319
第二节	在 $dq0$ 坐标系中同步电机的运动方程	321
第三节	同步电机的标幺值	325
第四节	同步电机的直轴、交轴等效电路和运算电抗	329
第五节	同步发电机的三相突然短路	332
第六节	阻尼绕组对三相突然短路过程的影响	339
第三十一章	感应电机的动态分析	343
第一节	三相感应电动机的运动方程	343
第二节	三相感应电动机起动过程的动态分析	346
第三节	三相感应电动机的矢量变换控制	349
第三十二章	变压器的动态分析	352
第一节	变压器的过电流	352
第二节	变压器的过电压	354
	习 题	356
附 录		359

附录一	基本电磁定律	359
附录二	电机常用的铁磁材料	364
附录三	磁路计算	370
附录四	三相绕组基波合成磁动势的图解法和矢量法合成	376
附录五	凸极同步电机定子绕组的自感和互感	378
参考文献	381

绪 论

第一节 电机在国民经济中的作用

电能是现代最主要的能源之一，由于电能的生产、输送和使用比较方便，因此被广泛地使用。电机在其中起着重要作用。电机主要有发电机、变压器和电动机。

电能的生产集中在发电厂，主要有火电厂、水电厂和核电厂。在火电厂中，锅炉将水加热生成水蒸气驱动汽轮机，由汽轮机带动发电机，把燃料燃烧的热能转变为电能。在水电厂中，靠水的落差驱动水轮机，由水轮机带动发电机，将水流的位能转变为电能。在核电厂中，由反应堆将水加热生成水蒸气驱动汽轮机带动发电机，将原子核裂变的原子能转变为电能。此外还有风电厂，靠风力推动叶轮带动发电机，将风能转变为电能。

发电机发出的电压一般为 10.5 ~ 20kV、为了减少远距离输电中的能量损失，应采用高电压输电，输电电压为 110、220、330、500kV 或更高。把发电机发出的电压升高到输电电压是由变压器完成的。高压输电线将电能输送到各个用电区，由于各种用电设备需要不同的低电压，例如 6、1kV，380、220V，因此再由变压器把高电压降为所需的低电压。

各种用电设备统称为负载，如电动机、电炉、电灯等。其中电动机占有非常大的比例，生产机械一般都用电动机拖动。在工业生产方面，如机械制造、冶金、煤炭、石油、轻纺、化学及其他工矿企业中，广泛地应用各种电动机拖动各种机床、轧钢机、电铲、卷扬机、织纺机、造纸机、搅拌机、压缩机、鼓风机等生产机械。在交通运输中，铁道机车和城市电车是由牵引电机拖动的，在航运和航空中，使用船舶电机和航空电机。在农业生产方面，电力排灌设备、打谷机、碾米机、榨油机、饲料粉碎机等都是由电动机拖动的。在日常生活中，洗衣机、冰箱、排烟机、空调器和风扇等都离不开电动机。在国防、文教、医疗，也广泛应用各种电动机。随着四个现代化的发展，工业生产自动化水平不断提高，各种自动控制系统中也日益广泛地应用各种控制电机。

综上所述，电机在国民经济中起着重要作用。

在电能的生产、输送、分配、消费中，发电机、变压器、电力路线、负载等连接在一起构成统一的整体，这就是电力系统。电力系统中接有很多发电厂，每个发电厂又有若干台发电机，每个发电机都向系统提供电能；电力系统中接有大量的用户，每个用户拥有各式各样的负载，每个负载都从系统中取用电能；电力系统中还接有各级变电站，每个变电站安装各种升压、降压、联络或配电变压器。电力系统是一个十分庞大又十分复杂的系统，发电机与变压器则是电力系统中最重要的设备。图 0-1 所示为电力系统构成示意图。