

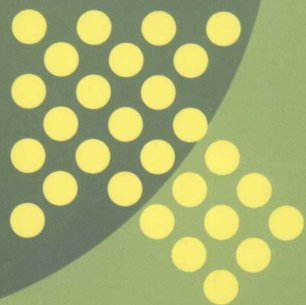
21世纪高等学校规划教材



DIANJIXUE

电机学

陈季权 肖鸿杰
宋金煜 王如玫 编著



中国电力出版社

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

21世纪高等院校教材

电机学

第三版



中国电力出版社
CHINA ELECTRICITY PRESS

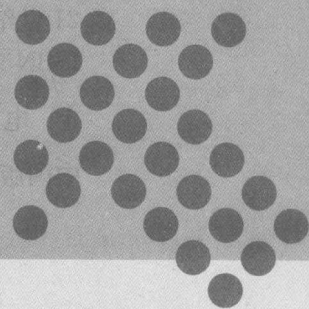
21世纪高等学校规划教材



DIANJIXUE

电机学

编 著 陈季权 肖鸿杰
宋金煜 王如玫
主 审 章跃进



内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书分为 5 篇共 28 章, 主要论述变压器、同步电机、异步电机和直流电机四种典型电机的基本结构、电磁过程、实验方法以及运行特性。具体内容包括变压器的基本工作原理和结构、运行分析、并联运行、瞬变过程, 三相变压器, 特种变压器; 交流绕组及其感应电动势与磁动势; 同步电机的基本原理与结构, 同步发电机的对称运行、特性与参数、并联运行、三相突然短路、非正常运行, 同步电动机及同步调相机; 异步电机的基本结构及运行状态、基本原理、功率及力矩, 三相异步电动机的起动、调速、制动, 三相异步电动机其他运行方式及单相异步电动机; 直流电机的工作原理及基本结构、电枢绕组、电枢反应及换向, 直流发电机和直流电动机。

本书可作为普通高等院校电气信息类相关专业的本科教材, 也可作为高职高专、函授教育的教材, 还可作为相关工程技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/陈季权等编著. —北京: 中国电力出版社, 2008

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-8043-8

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 (2008) 第 162691 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 12 月第一版 2008 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 26 印张 628 千字

定价 39.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

随着社会的进步和科学的发展,我国工科高级专门人才的需求格局和素质要求发生了很大变化。为适应宽口径培养模式和充实学科发展新内容,高等工科院校的强电类相关专业拓宽了专业知识面,在教学计划中增加了新的课程,使《电机学》的教学课时数有较大削减。因此,《电机学》教材应更适合学生自学,做到概念明确、叙述清晰、不易产生歧义。为此,编者在上海电力学院电机教研组邬基烈教授主编、1988年版《电机学》教材的基础上,重新编写了这本教材。

本书着重基本原理和物理概念的阐述,分析问题以物理概念为主,避免过多过深的数学推演,在论述中深入浅出,循序渐进,便于教学。

本书侧重于对称稳态运行的基本电磁规律及基本运行控制规律的分析,突出电机学分析方法的介绍和应用,适当注重电机动态以及不对称运行的分析介绍。

按普通高等院校电气工程及其自动化专业和其他涉电类专业的本科教学要求,考虑电类专业函授教育以及高职高专教育的教学要求,编写安排了本书的篇章顺序。依次论述变压器、同步电机、异步电机和直流电机四种典型电机的基本结构、电磁过程、实验方法以及运行特性。因各篇具有相对独立性,教学顺序也可根据具体要求加以调整。

本书的编写分工为:陈季权编写绪论及变压器篇,肖鸿杰编写交流绕组及其电动势与磁动势篇以及同步电机篇,宋金煜编写异步电机篇,王如玫编写直流电机篇。本书除第3篇同步电机之外的大部分插图由中国电力出版社重新绘制。前言由王如玫执笔。全书承上海大学章跃进教授审稿,并提出许多宝贵意见,对此编者深表谢意。本书的编写及出版,得到了中国电力出版社的大力支持,在此编者表示衷心的感谢。

这次编写是在教育发展和教学改革中进行的。编写至今,数易其稿,限于学识能力,书中难免还存在错误及不足之处,敬请选用本书的专业教师、学生、工程技术人员和广大读者批评指正。请将宝贵意见寄上海市平凉路2103号(邮编200090)上海电力学院电力工程系电机教研室。

编者

2008年8月于上海电力学院

主要符号说明

绪论、第1篇 变压器

- u_1 、 u_2 ——一、二次侧电压的瞬时值
 U_1 、 U_2 ——一、二次侧电压的有效值
 U_{1N} 、 U_{2N} ——一、二次侧的额定电压
 U_{20} ——空载时二次侧的电压
 ΔU ——电压变化率
 U_k ——短路电压
 u_k ——短路电压的百分值
 u_{kr} 、 u_{ka} ——短路电压百分值的有功分量、无功分量
 $\dot{U}_A^+$ 、 $\dot{U}_B^+$ 、 $\dot{U}_C^+$ —— $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 三相的正序电压
 $\dot{U}_A^-$ 、 $\dot{U}_B^-$ 、 $\dot{U}_C^-$ —— $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 三相的负序电压
 $\dot{U}_A^0$ 、 $\dot{U}_B^0$ 、 $\dot{U}_C^0$ —— $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 三相的零序电压
 e_1 、 e_2 ——一、二次侧绕组电动势的瞬时值
 E_1 、 E_2 ——一、二次侧绕组电动势的有效值
 $e_{1\sigma}$ 、 $e_{2\sigma}$ ——一、二次侧绕组漏磁电动势的瞬时值
 $E_{1\sigma}$ 、 $E_{2\sigma}$ ——一、二次侧绕组漏磁电动势的有效值
 $\dot{E}_A^0$ 、 $\dot{E}_B^0$ 、 $\dot{E}_C^0$ ——A、B、C 三相绕组的零序电动势
 N_1 、 N_2 ——一、二次侧绕组的匝数
 k ——双绕组变压器的变比
 k_a ——自耦变压器的变比
 i_1 、 i_2 ——一、二次侧电流的瞬时值
 I_1 、 I_2 ——一、二次侧电流的有效值
 I_{1N} 、 I_{2N} ——一、二次侧的额定电流
 i_0 、 I_0 ——空载电流的瞬时值、有效值
 I_{Fe} ——铁损耗电流的有效值
 I_μ ——励磁电流的有效值
 i_k 、 I_k ——短路电流的瞬时值、稳态有效值
 I_{C1} 、 I_{C2} ——并联运行时，一、二次侧绕组的环流
 $\dot{I}_A^+$ 、 $\dot{I}_B^+$ 、 $\dot{I}_C^+$ ——A、B、C 三相的正序电流
 $\dot{I}_A^-$ 、 $\dot{I}_B^-$ 、 $\dot{I}_C^-$ ——A、B、C 三相的负序电流
 $\dot{I}_A^0$ 、 $\dot{I}_B^0$ 、 $\dot{I}_C^0$ ——A、B、C 三相的零序电流
 F ——磁动势，作用力
 F_0 ——空载时的磁动势
 F_1 、 F_2 ——一、二次侧绕组的磁动势
 F_m ——一、二次侧绕组的合成磁动势
 ϕ 、 Φ_m ——主磁通的瞬时值、幅值
 ϕ^0 ——零序磁通
 $\phi_{1\sigma}$ 、 $\phi_{2\sigma}$ ——一、二次侧绕组漏磁通的瞬时值
 $\Phi_{1\sigma m}$ ——一次侧绕组漏磁通的幅值
 R_m ——磁阻
 μ ——磁导率
 H ——磁场强度
 B ——磁通密度，磁感应强度
 L ——电感
 $L_{1\sigma}$ ——一次侧绕组的漏电感
 r_1 、 r_2 ——一、二次侧绕组的电阻
 $x_{1\sigma}$ 、 $x_{2\sigma}$ ——一、二次侧绕组的漏电抗
 Z_1 、 Z_2 ——一、二次侧绕组的漏阻抗（复量）
 z_1 、 z_2 ——一、二次侧绕组的漏阻抗（复量中的模，即绝对值）
 r_m ——励磁电阻（反映铁心损耗的等效电阻）
 x_m ——励磁电抗（和主磁通相对应的电抗）
 Z_m ——励磁阻抗（复量）
 z_m ——励磁阻抗（复量中的模）
 r_k 、 x_k 、 z_k ——短路电阻、短路电抗、短路阻抗

Z_L ——负载阻抗
 x_m^0 、 Z_m^0 ——零序励磁电抗、零序励磁阻抗
 Z^0 ——零序阻抗
 Z_0^t ——空载阻抗
 Z_{ka} ——自耦变压器的短路阻抗
 Z_{ks} ——穿越阻抗
 Z_B ——半穿越阻抗
 Z_F ——分裂阻抗
 k_F ——分裂系数
 S_N ——变压器的额定容量
 S_{aN} ——自耦变压器的额定容量
 P_1 ——一次侧输入有功功率
 P_2 ——二次侧输出有功功率
 p_{Fe} ——铁心损耗
 p_{Cu} ——变压器绕组的铜损耗

p_k ——短路损耗
 p_{kN} ——额定电流时的短路损耗
 β ——负载系数
 β_m ——最大效率时的负载系数
 η ——效率
 η_N ——额定负载时的效率
 η_{max} ——最大效率
 θ ——温度
 m ——相数
 t ——时间
 φ_2 ——二次侧负载的功率因数角
 f ——频率
 ω ——电角度
 $*$ ——右上角加星标为标么值
 $'$ ——右上角加撇为折算值

第2篇 交流绕组及其电动势与磁动势

p ——极对数
 n ——转速
 n_1 ——同步转速
 y_1 ——交流绕组的节距
 Z_1 ——定子槽数
 q ——每极每相槽数
 α ——槽距电角，空间位移电角
 τ ——极距
 e ——电动势的瞬时值
 ν ——高次谐波的次数
 B_δ ——气隙磁通密度
 B_{1m} 、 B_{2m} ——气隙磁通密度的基波幅值、 ν 次谐波幅值
 ϕ_1 、 ϕ_ν ——基波、 ν 次谐波磁通密度的每极磁通量
 E_{cl} 、 E_ν ——导体中基波、 ν 次谐波电动势的有效值
 E_{T1} 、 $E_{T\nu}$ ——线匝中基波、 ν 次谐波电动势的有效值
 E_{y1} 、 $E_{y\nu}$ ——线圈中基波、 ν 次谐波电动势的有效值

E_{q1} 、 $E_{q\nu}$ ——线圈组电动势基波、 ν 次谐波的有效值
 $E_{\phi 1}$ 、 $E_{\phi \nu}$ ——一相绕组电动势基波、 ν 次谐波的有效值
 E_1 、 E_ν ——线电动势基波、 ν 次谐波的有效值
 N_c ——每一线圈的匝数
 N ——一相绕组的串联总匝数
 i_c 、 I_c ——线圈中电流的瞬时值、有效值
 I ——一相绕组中的电流
 k_{y1} 、 $k_{y\nu}$ ——基波、 ν 次谐波短距系数
 k_{q1} 、 $k_{q\nu}$ ——基波、 ν 次谐波分布系数
 k_{N1} 、 $k_{N\nu}$ ——基波、 ν 次谐波绕组系数
 a ——交流绕组每相的并联支路数
 F_{q1} 、 $F_{q\nu}$ ——线圈组磁动势基波、 ν 次谐波的最大波幅
 F_{ph1} 、 $F_{ph\nu}$ ——一相绕组磁动势基波、 ν 次谐波的最大波幅
 F_1 、 F_ν ——三相绕组合成磁动势基波、 ν 次谐波的最大波幅
 F^+ 、 F^- ——正向、反向旋转磁动势

第3篇 同步电机

δ ——气隙长度

N_f ——励磁绕组的每极匝数

γ ——转子磁极的分度比

k_f ——励磁磁动势分布波的波形系数

k_μ ——电机的饱和系数

k_u ——电压波形正弦性的畸变率

F_f ——励磁磁动势波的波幅

F_{f1} ——励磁磁动势波中的基波波幅

F_a ——电枢磁动势

F_δ ——气隙磁动势

F'_a ——折算到磁极边的电枢磁动势

F'_δ ——折算到磁极边的气隙磁动势

k_a ——折算系数

F_{ad} 、 F_{aq} ——直轴、交轴电枢反应磁动势

F'_{ad} 、 F'_{aq} ——折算到磁极边的直轴、交轴电枢反应磁动势

k_{ad} 、 k_{aq} ——直轴、交轴电枢反应磁动势的折算系数

ϕ_0 ——空载时的主磁通，磁极磁通

ϕ_a ——电枢反应磁通

ϕ_δ ——气隙磁通

ϕ_{ad} 、 ϕ_{aq} ——直轴、交轴电枢反应磁通

ϕ_σ ——定子漏磁通

$\phi_{Dd\sigma}$ ——直轴阻尼绕组的漏磁通

$\phi_{f\sigma}$ ——转子励磁绕组的漏磁通

B_{ad1} 、 B_{aq1} ——直轴、交轴电枢反应磁场的基波磁通密度

B_{f1} ——励磁磁场的基波磁通密度

E_0 ——空载电动势，励磁电动势

E_a ——电枢反应电动势

E_{ad} 、 E_{aq} ——直轴、交轴电枢反应电动势

E_σ ——漏电动势

I ——电枢电流

I_d 、 I_q ——电枢电流的直轴分量（或称直轴电流）、交轴分量（或称交轴电流）

I_f ——转子的励磁电流

I_{f0} ——使定子产生空载额定电压所需要的

励磁电流（励磁电流的基值）

I_{fk} ——使定子短路电流等于额定电流时所需要的励磁电流

x_a ——电枢反应电抗

x_σ ——定子漏磁电抗

x_p ——保梯电抗

x_t ——同步电抗

x_{ad} 、 x_{aq} ——直轴、交轴电枢反应电抗

x_d 、 x_q ——直轴、交轴同步电抗

x''_d 、 x''_q ——直轴、交轴超瞬变电抗

x'_d 、 x'_q ——直轴、交轴瞬变电抗

$x_{Dd\sigma}$ 、 $x_{Dq\sigma}$ ——折算到定子边直轴、交轴阻尼绕组的漏抗

$x_{f\sigma}$ ——折算到定子边转子励磁绕组的漏抗

x^+ 、 x^- 、 x^0 ——正序、负序、零序电抗

r_a ——电枢绕组的电阻

r_f ——磁场绕组的电阻

r_{Dd} ——直轴阻尼绕组的电阻

r^+ 、 r^- 、 r^0 ——正序、负序、零序电阻

Z^+ 、 Z^- 、 Z^0 ——正序、负序、零序阻抗

$i_{A\infty}$ 、 $i_{B\infty}$ 、 $i_{C\infty}$ ——A、B、C三相突然短路电流的周期性分量（或称交流分量）

$i_{A=}$ 、 $i_{B=}$ 、 $i_{C=}$ ——A、B、C三相突然短路电流的非周期性分量（或称直流分量）

$i_{Dd=}$ 、 $i_{Dd\infty}$ ——突然短路时，阻尼绕组中感应的非周期性、周期性电流

$\Delta i_{f=}$ 、 $\Delta i_{f\infty}$ ——突然短路时，励磁绕组中感应的非周期性、周期性电流

I''_m 、 I'_m 、 I_m ——超瞬变、瞬变、稳态短路电流的幅值

I_{k1} 、 I_{k2} ——单相、两相稳态短路电流的有效值

ψ ——相位角，磁链

P_N ——额定功率（有功）

P_{em} ——电磁功率

P_{emmax} ——最大电磁功率

k_M ——过载能力

P_{syn} ——整步功率
 p_{Fe} ——定子铁心的基本铁损耗
 p_{Cu} ——定子绕组的基本铜损耗
 p_{ad} ——杂散损耗
 p_{f} ——励磁损耗
 p_{mec} ——机械损耗
 T_{em} ——电磁力矩
 T_{emmax} ——最大电磁力矩

T_{N} ——额定力矩
 Ω_1 ——同步机械角速度
 θ ——功角（或称功率角）
 SCR ——同步电机的短路比
 K ——强励倍数
 v ——励磁电压上升的速度
 N_2 ——转子槽数

第4篇 异步电机

n_1 ——同步转速
 n ——转子转速
 n_2 ——转子基波磁动势相对于转子的转速
 s ——转差率
 N_1 、 N_2 ——定、转子绕组的匝数
 k_{N1} 、 k_{N2} ——定、转子绕组的绕组系数
 m_1 、 m_2 ——定、转子绕组的相数
 F_1 、 F_2 ——定、转子绕组的旋转磁动势（基波）
 F_{m} ——定、转子绕组的合成磁动势
 I_1 、 I_2 ——定、转子绕组的相电流
 I_{m} ——异步电机的励磁电流
 I_0 ——异步电机的空载电流
 k_e ——电动势变比
 k_i ——电流变比
 f_1 、 f_2 ——定、转子电动势的频率
 E_1 、 E_2 ——定、转子绕组的相电动势（转子不动时）
 E_{2s} ——转子旋转后的相电动势
 $E_{1\sigma}$ 、 $E_{2\sigma}$ ——定、转子绕组的漏电动势（转子不动时）
 $\phi_{1\sigma}$ 、 $\phi_{2\sigma}$ ——定、转子绕组的漏磁通
 $L_{1\sigma}$ 、 $L_{2\sigma}$ ——定、转子绕组的漏电感
 $x_{1\sigma}$ 、 $x_{2\sigma}$ ——定、转子绕组的漏抗（转子不动时）
 r_1 、 r_2 ——定、转子绕组的电阻

Z_1 、 Z_2 ——定、转子绕组的漏阻抗（转子不动时）
 k_e ——电动势变比
 r_{m} ——励磁电阻（反映定子铁损耗的等效电阻）
 x_{m} ——励磁电抗（和气隙磁通相对应）
 Z_{m} ——励磁阻抗
 σ —— Γ 形等效电路的校正系数
 P_{mec} ——总机械功率
 T_2 ——负载力矩
 T_0 ——空载制动力矩
 T_{L} ——机组负载的总制动力矩
 T_{max} ——最大电磁力矩
 s_{m} ——临界转差率
 C_T ——力矩常数
 T_{st} ——起动力矩
 k_{st} ——起动力矩倍数
 I_{st} ——起动电流
 r_{st} ——起动电阻
 r_j ——调节电阻
 T_{ν} —— ν 次谐波力矩
 T_{em}^+ 、 T_{em}^- ——正、反向电磁力矩
 s^+ 、 s^- ——正、反转磁场的转差率
 J ——转动惯量
 Ω ——机械角速度

第5篇 直 流 电 机

K ——换向片数

S ——元件数

Z ——实槽数

Z' ——虚槽数

y_1 、 y_2 、 y ——直流绕组的第一、第二、合成节距

y_k ——换向器节距

a ——直流电枢绕组的并联支路对数

N ——电枢上的总导体数

C_e ——电动势常数

B_{av} ——磁极磁场的平均磁通密度

Φ ——磁极磁场的每极磁通量

i_a ——并联支路中的电流

I_a ——电枢电流

A ——线负荷，面积

R_a ——电枢电阻

R_f ——直流电机并励磁场绕组的电阻

r_f ——直流电机串励磁场绕组的电阻

R_j ——直流电机电枢回路的调节电阻

r_j ——直流电机磁场回路的调节电阻

R_L ——直流负载电阻

R_{st} ——直流电机的起动电阻

r_{cr} ——临界电阻

α_{cr} ——临界角

I_{cr} ——临界电流

e_L 、 e_M ——换向元件的自感、互感电动势

e_r ——换向元件的电抗电动势

e_k ——换向元件的旋转电动势

B_k ——换向元件所在处的磁通密度

i_k ——附加换向电流

T_k ——换向周期

j ——电流密度

结语	87
习题	88
第 5 章 变压器的并联运行	91
5.1 变压器的理想并联条件	91
5.2 变压器一、二次侧额定电压不等时的并联运行	92
5.3 变压器的连接组别对并联运行的影响	93
5.4 短路阻抗标么值不等时变压器的并联运行	93
结语	95
习题	96
第 6 章 变压器的瞬变过程	98
6.1 变压器空载合闸时的瞬变过程	98
6.2 变压器二次侧突然短路时的瞬变过程	100
6.3 变压器的过电压现象	103
结语	106
习题	107
第 7 章 特种变压器	108
7.1 自耦变压器	108
7.2 三绕组变压器	111
7.3 分裂绕组变压器	115
结语	118
习题	118

第 2 篇 交流绕组及其电动势与磁动势

第 8 章 交流绕组及其感应电动势	120
8.1 交流电机的基本工作原理	120
8.2 交流绕组的基本要求与分类	122
8.3 导体的感应电动势	122
8.4 线圈的感应电动势	124
8.5 线圈组的感应电动势	127
8.6 三相单层绕组及其感应电动势	130
8.7 三相双层绕组及其感应电动势	134
8.8 齿谐波电动势及其削弱方法	137
结语	140
习题	141
第 9 章 交流绕组的磁动势	143
9.1 单相绕组的磁动势——脉振磁动势	143
9.2 三相绕组的基波磁动势——旋转磁动势	149
9.3 三相绕组的谐波合成磁动势	155

9.4 椭圆形旋转磁动势	158
9.5 非正弦电流时三相绕组的磁动势	160
9.6 定子漏磁通	161
结语	162
习题	162

第3篇 同 步 电 机

第10章 同步电机的基本原理与结构	164
10.1 同步电机的基本原理	164
10.2 同步电机的基本类型	165
10.3 隐极同步电机的基本结构	167
10.4 凸极同步电机的基本结构	169
10.5 同步电机的励磁方式	171
10.6 同步电机的额定值	173
结语	174
习题	174
第11章 同步发电机的对称运行	175
11.1 同步发电机的空载运行	175
11.2 对称负载时的电枢反应	176
11.3 隐极同步发电机的负载运行	181
11.4 凸极同步发电机的负载运行	185
结语	188
习题	189
第12章 同步发电机的特性与参数	191
12.1 空载特性	191
12.2 短路特性	192
12.3 零功率因数负载特性	192
12.4 外特性	194
12.5 调整特性	194
12.6 特性曲线的应用	195
12.7 同步发电机稳态参数的测定	201
12.8 同步发电机的损耗与效率	202
结语	203
习题	203
第13章 同步发电机的并联运行	206
13.1 同步发电机并联运行的条件和方法	206
13.2 同步发电机的电磁功率	209
13.3 同步发电机有功功率的调节与静态稳定	212

13.4 同步发电机无功功率的调节与 V 形曲线	214
结语	217
习题	217
第 14 章 同步电动机及同步调相机	219
14.1 同步电机运行的可逆性	219
14.2 同步电动机的电动势方程式和相量图	220
14.3 同步电动机的功角特性	221
14.4 同步电动机功率因数的调节与 V 形曲线	221
14.5 反应式同步电动机	222
14.6 同步调相机	223
结语	225
习题	225
第 15 章 同步发电机的三相突然短路	228
15.1 超导体闭合回路的磁链守恒原理	228
15.2 三相突然短路时定子绕组电抗的变化	229
15.3 瞬变电抗和超瞬变电抗的测定方法	233
15.4 三相突然短路电流	234
15.5 时间常数	240
15.6 三相突然短路对同步发电机及电力系统的影响	242
结语	242
习题	243
第 16 章 同步发电机的非正常运行	245
16.1 同步发电机的不对称运行	245
16.2 同步发电机的进相运行	251
16.3 同步发电机的失磁异步运行	255
16.4 同步发电机的振荡	257
结语	258
习题	259

第 4 篇 异 步 电 机

第 17 章 异步电机的基本结构及运行状态	261
17.1 异步电机的基本结构	261
17.2 异步电机的作用原理及三种运行状态	264
17.3 异步电机的额定值	265
结语	265
习题	265
第 18 章 异步电机的基本原理	267
18.1 转子不转时的异步电动机	267

18.2	转子旋转时的异步电机	272
18.3	异步电机的相量图和等效电路	276
	结语	280
	习题	281
第 19 章	异步电机的功率及力矩	283
19.1	异步电机的功率及力矩	283
19.2	异步电机的电磁力矩	284
	结语	292
	习题	292
第 20 章	三相异步电动机的起动	294
20.1	异步电动机的起动性能与机械负载对起动的要求	294
20.2	绕线式异步电动机的起动	295
20.3	鼠笼式异步电动机的起动	297
20.4	深槽式及双鼠笼式异步电动机	300
20.5	异步电动机的谐波力矩及其对电动机起动的影响	302
20.6	同步电动机的异步起动	305
	结语	305
	习题	306
第 21 章	三相异步电动机的调速	307
21.1	绕线式转子的变阻调速	307
21.2	定子绕组的变压调速	309
21.3	变频调速	309
21.4	变极调速	310
	结语	313
	习题	313
第 22 章	三相异步电动机的制动	315
22.1	能耗制动	315
22.2	反接制动	316
22.3	回馈制动	318
	结语	320
	习题	320
第 23 章	三相异步电动机其他运行方式及单相异步电动机	321
23.1	三相异步电动机在不对称电压下运行	321
23.2	单相异步电动机	324
23.3	三相异步发电机	328
	结语	331
	习题	331

第5篇 直 流 电 机

第24章 直流电机的工作原理及基本结构	333
24.1 直流电机的工作原理	333
24.2 直流电机的主要结构部件	335
24.3 直流电机的额定值	338
结语	339
习题	339
第25章 直流电机的电枢绕组	340
25.1 直流电枢绕组的一般知识	340
25.2 单叠绕组	342
25.3 单波绕组	344
25.4 电枢绕组的感应电动势	346
25.5 电枢绕组的电磁力矩	347
结语	348
习题	348
第26章 直流电机的电枢反应及换向	350
26.1 直流电机负载时气隙磁场的分析	350
26.2 直流发电机的电枢反应	352
26.3 直流电动机的电枢反应	354
26.4 直流电机的换向	355
26.5 火花的等级及产生火花的原因	358
26.6 改善换向的方法	360
26.7 环火的产生及其防止措施	362
结语	364
习题	364
第27章 直流发电机	366
27.1 直流发电机的励磁方式	366
27.2 直流发电机的功率、力矩和电动势平衡关系	368
27.3 他励直流发电机的运行特性	370
27.4 并励直流发电机的自励条件及运行特性	372
27.5 复励直流发电机的运行特性	375
27.6 各种直流发电机的应用	376
结语	377
习题	378
第28章 直流电动机	379
28.1 直流电机的可逆原理	379
28.2 直流电动机的功率、力矩和电动势平衡关系	380

28.3 直流电动机的起动..... 382

28.4 直流电动机的机械特性..... 383

28.5 直流电动机的调速..... 386

结语..... 387

习题..... 388

部分习题答案..... 389

参考文献..... 397