



“十二五”江苏省高等学校重点教材

电机学

(第2版)

主编 马宏忠

副主编 方瑞明 王建辉

高等教育出版社

高等学校 电气工程及其自动化 专业系列教材

自动化

- | | |
|--------------------------------------|---------------|
| ● 电机学(第2版) | 马宏忠主编 |
| ● 电气工程概论(第二版)(配光盘) | 范瑜主编 |
| 电气工程概论电子教案 | 范瑜主编 |
| ● 自动化学科概论 | 戴先中 赵光宙主编 |
| ● 自动控制原理(第二版)(配光盘) | 程鹏主编 |
| 自动控制原理(第二版)学习辅导与习题解答 | 程鹏主编 |
| ● 自动控制原理(非自动化类)(第三版) | 孟庆明主编 |
| ● 自动控制原理(第二版)(上、下册) | 黄家英 |
| ● 自动控制原理(配光盘) | 吴仲阳主编 |
| ● 自动控制原理 | 王万良主编 |
| ● 自动控制原理 | 陈祥光主编 |
| 现代控制理论 | 钟秋海编著 |
| ● 现代控制理论基础(第二版) | 施颂椒 陈学中 杜秀华编著 |
| ● 计算机控制系统(第二版)(配光盘) | 李元春主编 |
| ● 计算机控制系统(配光盘) | 高金源主编 |
| ● 电力电子学——电力电子变换和控制技术(第三版)(配光盘) | 陈坚主编 |
| ● 单片机原理及应用(第三版) | 张毅刚 彭喜元 彭宇编著 |
| ● 单片机原理及应用——C51编程+Proteus仿真(第二版) | 张毅刚主编 |
| ● 单片机原理及应用——基于C51编程的Proteus仿真案例(配光盘) | 张毅刚主编 |
| ● 电机与拖动基础(少学时) | 邱阿瑞主编 |
| 电机与拖动基础(少学时)思考题与习题解答 | 邱阿瑞主编 |
| ● 电机与拖动(第三版) | 唐介主编 |
| 电机与拖动(第二版)学习辅导与习题解答 | 唐介主编 |
| 电机与拖动(配光盘) | 杨天明主编 |
| ● 传感器与检测技术(第三版) | 陈杰 黄鸿编著 |
| ● 现代检测技术(第二版) | 周杏鹏主编 |
| ● 电力牵引交流传动及其控制系统 | 冯晓云主编 |
| ● 电力系统分析 | 王晓茹主编 |

- 注: ● 普通高等教育“十五”国家级规划教材
 ● 普通高等教育“十一五”国家级规划教材
 ● “十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-04-051883-2



9 787040 518832 >

定价 49.90元



“十二五”江苏省高等学校重点教材

电机学

(第2版)

主编 马宏忠

副主编 方瑞明 王建辉



高等教育出版社·北京

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

第二版前言

本书主要为电气工程及其自动化专业编写,覆盖了原来的电力系统及自动化、电机电器及其控制、高电压技术及绝缘、工业自动化等专业。通过本课程的学习,学生能掌握典型电机(变压器、异步电机、同步电机、直流电机)的结构、原理、特性和应用,掌握电机的基本理论与基本分析方法。

本书第一版出版至今已8年,编者广泛听取任课教师和学生意见,结合国内外电机及电力等领域发展,进行本次修订。主要修订内容如下:

(1) 适应直流输电、特高压技术的发展需要,增加了换流变压器、特高压变压器等内容(第二章)。

(2) 适应风力发电、电动汽车快速发展的需求,在第1版首先引入双馈风力发电机的基础上,第二版增加永磁同步电机及其在风力发电中的应用(第七章)。

(3) 对部分章节内容做了适当的调整(如第五章),以适应更多高校使用。

(4) 对部分章节内容结构做了调整,以使体系更合理(第一章)。

(5) 受学时限制对部分内容进行了适当精减。

(6) 适当增加了部分代表性例题(第五章为主)。

(7) 对传统直流电机内容进行了适当精减,增加了新型直流电机内容。

(8) 对部分内部的分析描述、文字组织进行了修改,以便于理解。

本书修订保留了第一版的主要特色,如启发式结构:在主要问题分析之前,先提出问题,让学生“带着问题学”,这有利于提高学习效率。

本书修订工作主要由第一版的原编者完成,同时上海交通大学冯琳、河海大学金平、陈滨斐、周海强、刘宝稳、华侨大学尚荣艳参与了修订工作。本书修订过程中得到江苏省电机工程学会电机专业委员会的支持,提出不少宝贵意见,在此表示感谢。

尽管编者努力使本教材更完美,但挂一漏万,恳请广大读者批评指正和提出宝贵意见。读者意见反馈邮箱:马宏忠 hhumhz@163.com,方瑞明 fangrm@126.com,冯琳 fenglin@sjtu.edu.cn。

编者

2018年11月

第一版前言

本书主要为电气工程及其自动化专业编写,覆盖了原来的电力系统及自动化、电机电器及其控制、高电压技术及绝缘、工业自动化等专业。通过本课程的学习,使学生能掌握典型电机(变压器、异步电机、同步电机、直流电机)的结构、原理、特性和应用,掌握电机的基本理论与基本分析方法。

本书的指导思想是: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;注重能力的培养和综合素质的提高,力求深入浅出、循循诱导,培养和提高学生思考及解决问题的能力;启发式学习,让学生带着问题学习,激发学生思考的积极性和学习的主动性,培养和提高学生的自主学习能力,为培养学生的创新能力打下基础。

内容体系与特色:

1. 主体内容定位。以变压器、异步电机、同步电机、直流电机为主体,分析它们的结构、工作原理和运行特性,着重于稳态性能的分析。

2. 突出重点,主次分明。考虑到高校电机学课时的减少,对磁动势的谐波问题、电机绕组、电机动态过程、有关公式的详细推导以及涉及设计方面的电机详细结构分析等做了大幅度的压缩,对直流电机内容也做了较大幅度的精简。

3. 适应电机新技术的发展。电机学虽然是一个传统学科,但相关的新技术发展很快,适当增加的一些相关内容,如电机软起动、双馈电机在风力发电中的应用等。

4. MATLAB 是当今工科学校非常有用的分析工具,书中专门辟出一章,分析 MATLAB 在电机分析计算中的应用,精选几个有代表性的问题,用 MATLAB 进行求解,由于在其他章节对电机动态过程的分析有所压缩,本章适当注重这方面的例子,也发挥 MATLAB 分析解决电机学问题的优势。

5. 考虑不同专业对电机学的要求不同,对部分内容用“*”标出,供相关专业选讲。

6. 启发式教学。在分析主要问题之前,先提出问题,让学生“带着问题学”,这有利于提高学习效率。

7. 考虑电机学内容难教难学,本教材中适当增加了有代表性的例题,同时,针对各章节的重点与难点,精心编写了大量的思考题与习题,通过练习帮助学生掌握和巩固所学知识。

8. 每章前面有简短的提要,帮助读者了解本章的概况;章末有知识点小结,对本章讲述的主要概念、分析方法等进行了归纳和提炼,以帮助学生对本章内容有整体性的把握。

本书由河海大学马宏忠教授任主编,华侨大学方瑞明教授、上海交通大学王建辉副教授任副主编,其中第二章、第四章、第八章及第七章 7.1 节由马宏忠教授编写,第三章、第六章、第七章 7.2~7.5 节及附录由方瑞明副教授编写,第五章由王建辉副教授编写,第一章由南京理工大学张俊芳副教授编写。本书编写初期,陈琳、张志新等提供了大量的帮助。

全书承清华大学著名教授王祥珩先生主审,参加本书审稿的还有清华大学苏鹏声教授。他们提出的宝贵意见,对完善和提高教材质量起到了重要作用,在此表示衷心的感谢。另外,

本书编写过程中还得到高等教育出版社金春英编审的大力支持,在此一并感谢。

由于编者学识水平有限,加之教学科研工作繁忙,尽管我们已经做了不懈的努力,本书难免有缺点和错误,恳请广大读者批评指正并提出宝贵意见。

编者

2008年7月

本书主要符号表

A ——面积;A相	f_1 ——定子电流频率
a ——交流绕组并联支路数;a相;120°复数算子	f_2 ——转子电流频率
a_+ ——直流电机并联支路对数	f_N ——额定频率
B ——磁感应强度;B相	f_ν —— ν 次谐波频率
B_δ ——气隙磁密	H ——磁场强度
B_{ad} ——直轴电枢磁通磁密	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_{aq} ——交轴电枢磁通磁密	I_a ——直流电机的电枢电流
b ——宽度;b相;磁通密度瞬时值	I_m ——交流励磁电流
C ——C相	I_f ——直流励磁电流
C_T ——转矩常数	I_μ ——励磁电流中的磁化分量
C_e ——电动势常数	I_N ——额定电流
c ——比热容;c相	I_0 ——空载电流;零序电流
D_1 ——定子内径	I_k ——短路电流;堵转电流
D_a ——电枢外径	I_{st} ——起动电流
E ——电动势(交流表示有效值)	I_1 ——变压器一次绕组电流;异步电机定子电流
E_p ——相电动势	I_2 ——变压器二次绕组电流;异步电机转子电流
E_0 ——空载电动势	I'_2 —— I_2 的归算值
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_+ ——电流的正序分量
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_- ——电流的负序分量
E'_2 —— E_2 的归算值	i ——电流的瞬时值
E_q —— q 个线圈的合成电动势	J ——转动惯量
e ——电动势的瞬时值	K ——换向片数
e_c ——线圈电动势	k ——变压器的电压比
e_k ——换向电动势	k_i ——电流比
F ——磁动势	k_e ——电动势比
F_a ——电枢磁动势	k_{d1} ——基波分布因数
F_m ——异步电机的励磁磁动势	k_{p1} ——基波节距因数
F_{ad} ——直轴电枢磁动势	k_{w1} ——基波绕组因数
F_{aq} ——交轴电枢磁动势	$k_{d\nu}$ —— ν 次谐波的分布因数
F_{p1} ——单相绕组的基波磁动势	$k_{p\nu}$ —— ν 次谐波的节距因数
$F_{p\nu}$ ——单相绕组的 ν 次谐波磁动势	$k_{w\nu}$ —— ν 次谐波的绕组因数
F_{q1} —— q 个线圈的基波合成磁动势	L ——自感
f ——频率;力;磁动势的瞬时值	

- $L_{1\sigma}$ ——变压器一次绕组(或异步电机定子)的漏磁电感
 $L_{2\sigma}$ ——变压器二次绕组(或异步电机转子)的漏磁电感
 l ——长度
 M ——互感
 m_1 ——交流电机定子相数
 m_2 ——异步电机转子相数
 N ——每相串联匝数
 N_c ——每个线圈的匝数
 n ——转子转速
 n_N ——额定转速
 n_0 ——空载转速
 n_1 ——同步转速
 n_ν —— ν 次谐波旋转磁场的转速
 n_2 ——转子基波旋转磁场相对于转子的转速
 Δn ——异步电机转差
 P ——功率
 P_N ——额定功率
 P_{em} ——电磁功率
 P_{mec} ——总机械功率(即转换功率)
 P_k ——堵转功率;短路功率
 P_1 ——输入功率
 P_2 ——输出功率
 P_0 ——空载功率
 p ——损耗;极对数;时间的微分算子
 p_0 ——空载损耗
 p_{Cu} ——铜损耗
 p_{Fe} ——铁损耗
 p_{ad} ——附加损耗(杂散损耗)
 p_{mec} ——机械损耗
 Q ——槽数;热量
 q ——每极每相槽数
 R ——电阻
 R_{fm} ——频敏变阻器的等效电阻
 R_m ——励磁电阻;磁阻
 R_1 ——变压器一次绕组(或异步电机定子)电阻
 R_2 ——变压器二次绕组(或异步电机转子)电阻
 R'_2 —— R_2 的归算值
 R_f ——励磁绕组电阻
 R_a ——电枢电阻
 R_k ——变压器(或异步电机)的短路电阻
 S ——视在功率
 S_N ——额定视在功率
 s ——转差率
 s_N ——额定转差率
 s_m ——最大转矩时的转差率(临界转差率)
 s_+ ——转子对正向旋转磁场的转差率
 s_- ——转子对反向旋转磁场的转差率
 T ——转矩;电磁转矩;时间常数;周期
 T'_d ——直轴瞬态时间常数
 T_a ——电枢时间常数
 T_f ——励磁绕组时间常数
 T_N ——额定转矩
 T_0 ——空载转矩
 T_{max} ——最大转矩
 T_{st} ——起动转矩
 T_2 ——负载转矩
 t ——时间,温度
 U ——电压(交流表示有效值)
 U_N ——额定电压
 U_p ——相电压
 U_1 ——电源电压;定子端电压
 U_+ ——正序电压
 U_- ——负序电压
 U_0 ——空载电压;零序电压
 U_k ——短路电压;堵转电压
 u ——电压的瞬时值
 ΔU ——电压调整率
 $2\Delta U_a$ ——每对电刷的电压降
 W ——功;能
 W_m ——磁场能量
 X ——电抗
 X_a ——电枢反应电抗
 X_+ ——正序电抗
 X_- ——负序电抗
 X_0 ——零序电抗
 X_{ad} ——直轴电枢反应电抗
 X_{aq} ——交轴电枢反应电抗
 X_σ ——定子漏抗



X_s ——同步电抗	η_N ——额定效率
X_d ——直轴同步电抗	η_{\max} ——最大效率
X_q ——交轴同步电抗	θ ——温升;角度
X_m ——励磁电抗	Λ ——磁导
X_k ——短路电抗	Λ_σ ——漏磁导
X_1 ——变压器一次绕组(或异步电机定子) 漏电抗	λ ——单位面积的磁导;导热系数
X_2 ——变压器二次绕组(或异步电机转子) 漏电抗	μ ——磁导率;转子谐波次数
X'_2 —— X_2 的归算值	μ_0 ——空气磁导率
X'_d ——直轴瞬态电抗	μ_{Fe} ——铁心磁导率
X''_d ——直轴超瞬态电抗	ν ——谐波次数
y ——绕组合成节距	τ ——极距
y_1 ——第一节距	Φ ——磁通量、主磁通
y_2 ——第二节距	Φ_0 ——空载磁通;同步电机的主磁通
y_k ——换向器节距	Φ_a ——电枢反应磁通
Z ——阻抗;电枢导体数	Φ_m ——变压器磁通幅值
Z_m ——励磁阻抗	Φ_σ ——漏磁通
Z_k ——短路阻抗	Φ_{ad} ——直轴电枢反应磁通
Z_+ ——正序阻抗	Φ_{aq} ——交轴电枢反应磁通
Z_- ——负序阻抗	Φ_ν —— ν 次谐波磁通
Z_0 ——零序阻抗	ϕ ——磁通量的瞬时值
Z_1 ——变压器一次绕组(或异步电机定子) 漏阻抗	φ ——相角;功率因数角
Z_2 ——变压器二次绕组(或异步电机转子) 漏阻抗	φ_0 ——空载功率因数角
Z'_2 —— Z_2 的归算值	φ_k ——短路功率因数角
α ——角度;相邻两槽间的电角度(槽距角)	φ —— \dot{U} 和 i 间的夹角
β ——夹角;短距角	Ψ ——磁链
δ ——气隙;功率角(功角)	ψ ——内功率因数角
η ——效率	φ_2 ——异步电机转子的内功率因数角
	Ω ——转子的机械角速度
	Ω_0 ——同步角速度
	ω ——角频率;电角速度

目录

第一章 绪论	1	2.3.1 负载运行时的物理情况	29
1.1 电机概述	1	2.3.2 负载运行时的电磁关系与 基本方程	30
1.1.1 电机在国民经济中的作用	1	2.3.3 二次侧的归算	31
1.1.2 电机工业发展概况	2	2.3.4 等效电路	32
1.1.3 电机分类	3	2.3.5 相量图	33
1.2 本课程的性质、要求及学习方法	3	2.3.6 近似等效电路和简化等效电路	34
1.2.1 电机学课程内容及要求	3	2.4 标么值	34
1.2.2 电机学课程的学习方法	4	2.4.1 标么值的定义	34
1.3 电机学中常用的磁路知识	4	2.4.2 基值	35
1.3.1 描述磁场的几个物理量	4	2.4.3 标么值的优点	35
1.3.2 磁路基本定律	6	2.5 变压器的参数测定	36
1.3.3 电感	11	2.5.1 空载试验	36
1.3.4 铁磁材料的磁化曲线	12	2.5.2 短路试验	38
1.3.5 铁心损耗与磁场储能	13	2.6 变压器的运行性能	43
1.4 电机制造材料	14	2.6.1 电压调整率	43
本章小结	15	2.6.2 损耗与效率	46
思考题	16	2.7 三相变压器及其运行	49
习题	16	2.7.1 三相变压器的磁路	50
第二章 变压器	17	2.7.2 三相变压器的联结组	51
2.1 变压器的工作原理、分类和结构	17	* 2.7.3 三相变压器绕组连接法及磁路 系统对电动势波形的影响	54
2.1.1 原理、分类	17	2.8 变压器的并联运行	57
2.1.2 结构	18	2.9 几种特殊变压器	61
2.1.3 铭牌及额定值	21	2.9.1 三绕组变压器	61
2.1.4 发热、温升与冷却	21	2.9.2 自耦变压器	65
2.2 变压器的空载运行	22	2.9.3 互感器	68
2.2.1 变压器空载运行的物理情况	22	2.9.4 换流变压器	70
2.2.2 参考方向	23	2.9.5 特高压变压器	73
2.2.3 变比	24	2.10 变压器的瞬态过程	76
2.2.4 空载运行的基本方程	25	2.10.1 二次侧突然短路	76
2.2.5 等效电路与相量图	26	2.10.2 变压器空载合闸时的瞬态 过程	79
2.2.6 空载功率	27	2.11 三相变压器的不对称运行	81
* 2.2.7 空载电流分析	27		
2.3 变压器的负载运行	28		

2.11.1 对称分量法	82	4.3.2 转子绕组短路	134
2.11.2 Yyn 联结三相变压器单相运行	83	4.4 转子旋转时的异步电机及其等效电路	138
本章小结	85	4.4.1 转子绕组的电动势和电流	138
思考题	88	4.4.2 平衡方程	138
习题	89	4.4.3 频率归算	139
第三章 交流电机的基本理论	93	4.4.4 等效电路与相量图	141
3.1 交流电机的工作原理	93	4.4.5 异步电机等效电路的简化	142
3.1.1 同步电机的工作原理	93	4.5 异步电动机的功率方程和转矩方程	144
3.1.2 异步电机的工作原理	94	4.5.1 异步电动机的功率关系	144
3.2 交流电机的绕组和电动势	95	4.5.2 异步电动机的转矩关系	147
3.2.1 交流电机绕组的要求	95	* 4.6 异步电机的参数测定	149
3.2.2 三相双层绕组	96	4.7 三相异步电动机的机械特性	152
3.2.3 正弦磁场下交流绕组的感应电动势	99	4.7.1 电磁转矩的一般表达式形式(物理表达式)	152
* 3.2.4 感应电动势中的高次谐波	103	4.7.2 机械特性的参数表达式	152
3.3 交流电机绕组的磁动势	107	* 4.7.3 实用表达式	155
3.3.1 概述	107	* 4.7.4 稳定运行问题	156
3.3.2 单相绕组的磁动势——脉振磁动势	107	* 4.8 异步电机的工作特性	158
3.3.3 三相绕组的磁动势——旋转磁动势	114	4.9 三相异步电动机的起动	160
* 3.3.4 交流电机的气隙磁场和励磁电抗	117	4.9.1 起动电流与起动转矩	160
本章小结	120	4.9.2 普通三相笼型异步电动机的起动	161
思考题	121	4.9.3 高起动转矩的三相笼型异步电动机	165
习题	122	4.9.4 绕线转子三相异步电动机的起动	167
第四章 异步电机	124	* 4.9.5 三相异步电动机的软起动	169
4.1 异步电机的基本类型和基本结构	124	4.10 三相异步电动机的调速	170
4.1.1 异步电机的结构	124	4.10.1 概述	170
4.1.2 异步电动机的分类	127	4.10.2 变极调速	170
4.1.3 异步电动机的铭牌额定值、技术数据	128	4.10.3 变频调速	172
4.2 异步电机的基本工作原理	129	4.10.4 改变转差率调速	174
4.2.1 异步电机的基本工作原理	129	* 4.11 三相异步电机的电制动	176
4.2.2 异步电机的三种运行状态	130	4.12 异步发电机	178
* 4.2.3 异步电机的主磁通与漏磁通	132	4.13 单相异步电动机简介	181
4.3 转子静止时的异步电机	132	本章小结	183
4.3.1 转子绕组开路	133	思考题	186



习题	187	5.5.4 同步调相机	245
第五章 同步电机	190	* 5.6 同步发电机的不对称运行	246
5.1 同步电机的基本知识	190	5.6.1 同步发电机不对称运行时的 各相序阻抗和等效电路	246
5.1.1 同步电机的用途和基本类型	190	5.6.2 三相同步发电机的不对称稳定 短路	250
5.1.2 同步电机的基本结构	190	5.6.3 负序和零序参数的测定	253
5.1.3 同步电机的额定值	195	5.6.4 不对称运行对发电机的影响	255
5.2 同步电机的运行原理	195	* 5.7 同步电机的突然短路	255
5.2.1 同步发电机的空载运行	195	5.7.1 超导闭合线圈磁链守恒原理	256
5.2.2 对称负载时的电枢反应	202	5.7.2 对称突然短路的物理过程	257
5.2.3 隐极同步发电机的电动势方程式、 同步电抗和时空矢量图	205	5.7.3 瞬态电抗和超瞬态电抗及其 测定方法	261
5.2.4 凸极同步发电机的双反应理论、 电动势方程式、同步电抗和 时空矢量图	208	5.7.4 突然短路电流及其衰减时间 常数的计算	264
5.3 同步发电机的运行特性	214	5.7.5 不对称突然短路概念	269
5.3.1 同步发电机的空载特性和 短路特性	215	5.7.6 突然短路对电机的影响	270
5.3.2 同步发电机的零功率因数 负载特性	216	本章小结	271
5.3.3 同步发电机的短路比和直轴 同步电抗	219	思考题	273
5.3.4 同步发电机的外特性和调整 特性	221	习题	275
5.3.5 电压调整率和额定励磁磁动势 的求法	223	第六章 直流电机	281
5.3.6 同步发电机稳态参数的测定	225	6.1 直流电机概述	281
5.4 同步发电机的并联运行	226	6.1.1 直流电机的基本工作原理 及其分类	281
5.4.1 并联投入的条件和方法	227	6.1.2 直流电机的基本结构	284
5.4.2 同步发电机的功率和转矩 平衡方程式	230	6.1.3 直流电机的型号和额定值	287
5.4.3 同步发电机的功角特性	231	6.2 电枢绕组和电枢反应	288
5.4.4 同步发电机与大电网并联运行时 有功功率的调节和静态稳定	233	6.2.1 电枢绕组简介	288
5.4.5 无功功率的调节和 V 形 曲线	236	6.2.2 电枢电动势及电磁转矩	293
5.5 同步电动机和同步调相机	239	6.2.3 电枢反应	295
5.5.1 同步电动机的基本方程式、 矢量图和功角特性	239	* 6.2.4 换向概述	298
5.5.2 无功功率的调节	241	6.3 直流电机运行	302
5.5.3 同步电动机的起动方法	242	6.3.1 直流电机的基本方程	302
		6.3.2 直流发电机	305
		6.3.3 直流电动机	310
		本章小结	315
		思考题	317
		习题	317
		第七章 其他电机简介	319

7.1 双馈异步发电机及其在风力发电中的应用	319	电机	334
7.1.1 双馈异步发电机工作原理	319	7.7.2 作为执行元件使用的控制电机	335
7.1.2 等值电路	320	本章小结	335
7.1.3 双馈电机在风力发电中的应用	321	思考题	336
7.2 永磁同步电机及其在风力发电中的应用	322	习题	337
7.2.1 永磁同步电机	322	第八章 MATLAB 在电机分析计算中的应用	338
7.2.2 永磁同步发电机及其在风力发电中的应用	324	8.1 MATLAB 简介	338
7.3 永磁无刷直流电动机	325	8.1.1 MATLAB 概述	338
7.3.1 基本结构	326	8.1.2 MATLAB 快速入门	338
7.3.2 工作原理	327	8.1.3 Simulink 简介	342
7.3.3 运行特性	328	8.2 MATLAB 在电机分析计算中的应用实例	343
7.4 开关磁阻电机	328	8.2.1 变压器问题	343
7.4.1 结构特点	329	8.2.2 异步电机问题	348
7.4.2 工作原理	329	8.2.3 同步电机问题	352
7.4.3 运行特性	329	本章小结	355
7.5 步进电动机	330	习题	355
7.5.1 基本结构	330	附录 A	356
7.5.2 工作原理	330	A.1 三相单层绕组	356
7.5.3 转速	331	A.2 电机选用	358
7.6 直线电机简介	332	A.2.1 电机的发热、绝缘与冷却	358
7.6.1 直线电机的分类及工作原理	332	A.2.2 电机的工作制	360
7.6.2 直线电机在轨道交通中的应用	333	A.2.3 电机的选择	361
7.7 控制电机简介	334	A.3 dq0 变换	362
7.7.1 作为测量元件使用的控制		附录 B	365
		参考文献	372

第一章 绪论

电机是利用电磁原理进行能量转换或信号传递的电气设备,或把与电能有关的能量转换成机械能,是实现电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制电磁机械装置。电机广泛应用于工业、农业、交通运输、日常生活、文教、医疗以及国防、人造卫星等领域。

电机学是讲述电机基本结构、基本原理及运行特性的一门学科。电机学课程与其他后续专业课程联系密切,因此只有学好该课程才能为以后其他课程的学习和将来从事电气工作奠定基础。

1.1 电机概述

1.1.1 电机在国民经济中的作用

电能与各种形式的能量相比,具有明显的优越性,适宜于大量生产、集中管理、远距离传输、灵活分配和自动控制,而且清洁环保。电机是能量转换或信号传递的核心电气设备之一,主要包括发电机、变压器和电动机等类型。不同类型的电机虽然性能不相同,但它们都是一种能量转换装置。长期以来,电机在国民经济发展中起着重要的作用,广泛应用在各行各业和日常生活中。

1. 电力系统中电能的生产、传输和分配

电力系统包括发电、输变电、配电、用电等环节。电机主要包括发电机、变压器和电动机等类型。发电机主要用在生产电能的发电厂,把机械能转换为电能。在火电厂,通过汽轮机带动发电机,把燃料燃烧所产生的热能转变为电能;在水电厂,水轮机带动发电机,把水流的机械能转变为电能;在核电厂,把原子核裂变产生的原子能通过发电机转变为电能。

电力变压器主要在电力系统变电站中用于改变电压、传输电能。因为发电机出口电压一般比较低,为了减少远距离输电中的电能损失,需要采用高压输电。只有通过变压器才能把发电机出口的低电压升高到输电系统的高电压。由于各种用电设备如电动机、电炉、电灯等需要不同的低电压,因此还要由变压器把输电线的高电压降低到各个用电区所需的低电压。

电动机是电力系统的主要用电设备,它把电能转换成机械能。

2. 驱动生产机械和装备

电动机在工业、农业、交通运输业以及日常生活等领域广泛被用来驱动各种用途的生产机械和装备。比如工矿企业的各种机床、矿山机械、交通运输机械、起重机械、化工机械、农用机械、电动工具、家用电器以及文教、医疗器械等都是依靠电动机来拖动的。

3. 控制系统中的重要元件

随着工业自动化水平不断提高,各种高科技领域,如航天、计算机、通信等领域



第一章
讲义

第一章
教学视频



电机概述

广泛应用各种控制电机。在现代军事装备中,电机已成为不可缺少的重要元件或子系统,如火炮自动瞄准、雷达自动定位等都离不开各种控制电机。

随着现代社会的发展,电机工业在国民经济中将起着更加重要的作用。

1.1.2 电机工业发展概况

电机是随着生产的发展而产生和发展的,而电机的发展反过来又促进社会生产力的不断提高。电机的发展可以分为以下两个时期。

第一个时期是从发现电磁感应现象开始,直到19世纪末和20世纪初,各种电机和变压器的基本形式已具备,称为电机发展初期。可分为四个阶段,即:

① 电磁感应定律的发现。在1831年法拉第提出了电磁感应定律后,出现了各种各样原始形式的发电机。

② 直流电机的发展。由于电能在工业上最早的应用是照明和电化学工业,所以最初发展的是直流发电机。

③ 单相交流电的应用。在19世纪70年代,人们尝试用交流电传输电能,1876年,交流电已被应用于照明装置。相继出现了原始形式的同步发电机和变压器。

④ 三相交流电的应用。由于单相交流电动机无法自行起动,1885年制成了二相交流异步电机的模型。直到1889—1897年间,才制成了三相电动机和三相变压器,建成了第一个三相交流输电系统。从此,交流三相制发电厂迅速发展,高速运转的汽轮发电机代替了以蒸汽机为原动机的发电机。

第二个时期是从20世纪初直到现在,称为近代发展时期。20世纪是由电气化时代进入原子能、计算机及自动化的时代,对电机的运行性能、单位容量的重量、体积等方面提出了更多的要求,而且随着自动控制系统和计算装置的发展,在旋转电机的理论上,发展了多种高精度、快响应的控制电机。与此同时,由于电力电子学等学科的渗透,使电机学科得到了新的发展。

中华人民共和国成立前,我国的电机工业极端落后,全国只有少数几家规模小、设备差、生产能力低的电机制造厂。中华人民共和国成立以来,我国的电机制造工业发生了巨大的变化。经过50多年的努力,不仅建成了独立自主和完整的体系,而且有一些产品已经达到或接近世界先进水平。近年来已生产了大型水轮发电机(如三峡电站的70万千瓦水轮发电机)、大型汽轮发电机、大型直流电动机、大型异步电动机和同步电动机;在中小型电机和控制电机方面,自行设计和生产了新系列电机。在电动机调速系统方面,随着大功率电力电子元件及微电子器件的出现和变频技术的发展,使交流异步机的调速在平滑度、范围和效率方面都得到了很大改进。由于生产上的需要,近几年来,对电机的新原理、新结构、新工艺、新材料、新的运行方式和调试方法,进行了许多探索、研究和试验工作,取得了一定的成就。

当前科学技术突飞猛进,电机在制造上向着大型、巨型发展。在应用上由于电力电子技术的迅速发展,使大容量同步电机的励磁装置体积减小、重量减轻、效率更高,发电系统的性能和可靠性得到了很大提高;由于计算技术迅速发展,使某些特种电机能快速响应、快速起停以及能做模仿人的动作等更复杂的运动。由于应用了控制技术,电机具有更好的特性,使各类电机成为各种机电系统中极其重要的元件。

电机学科历史悠久,有系统的理论和丰富的工程实践。随着生产技术和科学技术水平的发展,电机在不断地深化和更新。



1.1.3 电机分类

电机的应用非常广泛,但由于使用场合不同,原理也有一定差别,运行情况也不尽相同,从不同角度可以将电机划分为不同类型。

① 从能量转换角度可分为:

发电机(机械能→电能)

电动机(电能→机械能)

变压器(一种形式的电能→另一种形式的电能)

② 从工作原理角度可分为:

变压器

直流电机

交流电机:异步电机、同步电机

③ 从运行情况可分为:

旋转电机

直线电机

静止电机(变压器)

此外,还有其他分类方法,每一种分类都不是绝对的,这里不再介绍。

1.2 本课程的性质、要求及学习方法

1.2.1 电机学课程内容及要求

电机在国民经济中的应用非常广泛,同时,电机学课程与后续专业课程联系密切,因此学好该课程是为以后专业课程的学习和工作奠定基础。

一、课程内容

电机学课程是对四种典型电机(变压器、直流电机、异步电机、同步电机)进行理论分析。课程内容的重点是讲述电机的基本原理、基本结构、运行特性和应用。

二、课程特点及要求

“电机学”是一门学科基础课,是一门既带基础课程性质又带专业课程性质的课程,是从基础课程到专业课程过渡的桥梁。

通过本课程的学习,可获得电机的基本理论、基本知识和基本技能,为学习后续专业课程做好准备,为今后从事相关工作打下基础。

通过学习,应达到下列基本要求:

(1) 对磁路的计算方法及交流铁心线圈的性能有基本的了解。

(2) 对变压器和三种主要电机(直流电机、异步电机和同步电机)的基本结构要有一定认识。对各种电机中气隙磁场的性质和时间、空间关系要有深入的了解。

(3) 对各种电机正常稳态运行时的分析方法和运行性能,要牢固掌握。要能正确地建立电压方程和转矩方程,弄清电机中的能量转换关系;对稳态运行时电机的参数要有清晰的物理概念,能熟练地运用等效电路和复数来计算交流电机的性能。

(4) 对电机中的能量关系、感应电动势、电磁功率、电磁转矩和机电能量转换过程要有一个基本的了解。



电机制造材料

1.2.2 电机学课程的学习方法

在电机学课程的学习过程中,要不断总结电机的共性,同时要注意各种电机的区别,再结合实验和一定数量习题的练习,这样学起来就会转难为易,兴趣越来越浓。

共性包括以下几个方面:

(1) 电机结构:有定子、转子;有磁路、电路。

(2) 电机原理:电和磁是构成电机的两大要素,缺一不可。电机通过电磁感应实现能量转换。

(3) 分析方法:先找平衡方程,再画出等效电路和相量图;先分析工作原理,再分析运行特性。

1.3 电机学中常用的磁路知识

1.3.1 描述磁场的几个物理量

一、磁场、磁感应强度

电流、运动电荷或变化电场的周围空间存在着一种特殊形态的物质,人们称之为磁场。载流导体在磁场中受力。当载流导体单元与磁感[应]线相垂直时,作用在该导体单元上的洛伦磁力 dF 可表示为

$$dF = IBdl$$

式中, I 表示载流导体中的电流,单位是 A(安[培]); dl 是微小导体单元长度,单位是 m(米); dF 为该微小导体单元上受到的电磁力,单位是 N(牛[顿]);而 B 表示磁场的强弱,是导体单元所在空间磁场性质的一个基本物理量,称为磁感应强度,它是一个矢量,单位是 T(特[斯拉])。

二、磁感线、磁通量

磁场是矢量,既有大小又有方向。在给定的磁场中某一点的磁感应强度 B 的大小和方向都是确定的。磁感线是一种假想的用于表示磁场大小和方向的有向曲线,规定曲线上每一点的切线方向就是该点的磁感应强度 B 的方向,磁感线的疏密程度用来表示该处磁感应强度 B 的大小。磁场强的地方,磁感线密;磁场弱的地方,磁感线稀。磁感线也称磁力线或 B 线。磁感线具有以下特征:

- 磁感线的回转方向和电流方向之间的关系遵守右手螺旋法则。
- 磁场中的磁感线不会相交。
- 载流导线周围的磁感线都是围绕电流的闭合曲线,没有起点,也没有终点。
- 对均匀磁场来说,磁场中的磁感线相互平行,各处的磁感线密度相等。

通过磁场中某一面积的磁感线数称为通过该面积的磁通量,简称磁通,用符号 Φ 表示,单位是 Wb(韦[伯])。

磁感应强度 B 、平面面积 A 和磁通量的关系如下。

(1) 均匀垂直:若某一平面上磁感应强度分布均匀,且与该平面相垂直时,有

$$\Phi = BA$$

(2) 均匀不垂直:某一平面上磁感应强度分布均匀,且与该平面不垂直时,有

$$\Phi = BA\cos\theta$$

思考:什么是磁感线?什么是磁通量?

思考:磁感线和磁通量的关系是什么?