



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

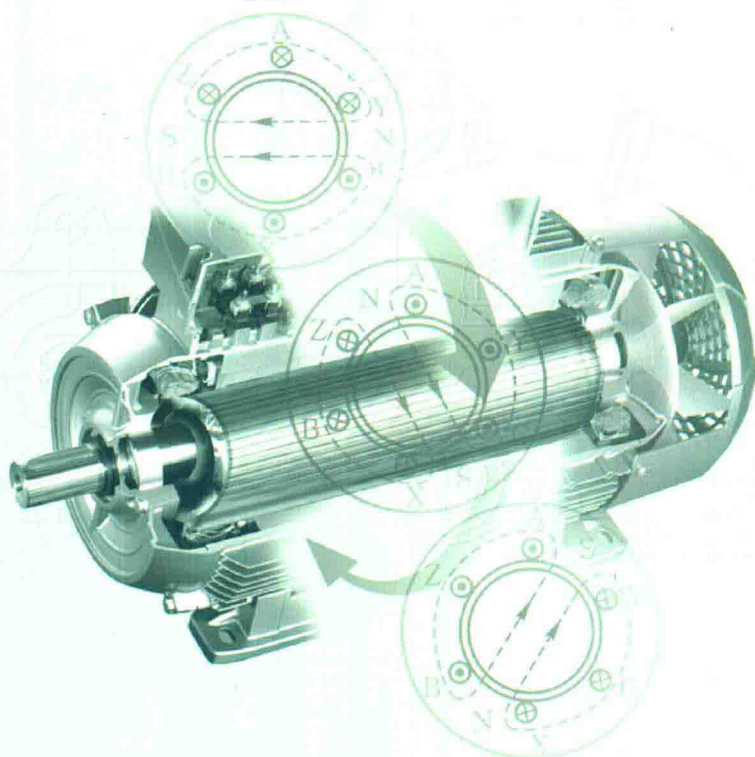


西安交通大学“十三五”规划教材

电机学

(第3版)

阎治安 苏少平 崔新艺 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

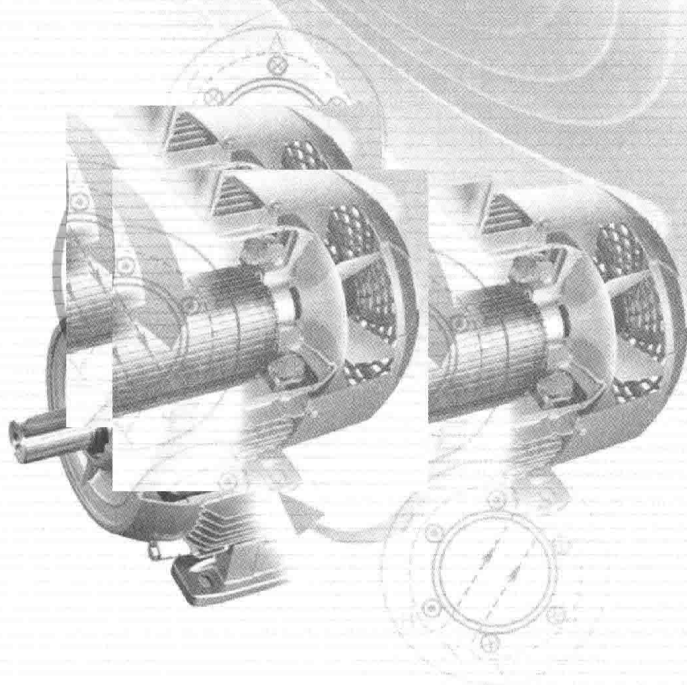


西安交通大学“十三五”规划教材

电机学

(第3版)

阎治安 苏少平 崔新艺 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

为适应当前教学改革中项目化教学、翻转课堂、慕课(MOOC)、微课等教学模式的需要而改编本教材。本书主要阐述自动化、电气自动化、机电一体化、水电、农电等专业中常用的直流电机、变压器、异步电机、同步电机和特殊用途电机及微特电机的基本原理、结构及运行性能,并对电机实验和电机控制的内容作了一定的介绍,以满足社会发展急速、技术进步迅猛的实际所需。书中各章均附有小结、习题及思考题。本书还有配套的辅导书、实验指导(即《电机学习题解析及实验指导》)和 ppt 课件及其网站,以便学习。本书的编写方针是:由浅入深、承上启下、博采众长、强调应用、删繁就简、推广创新。通过本书的学习,可以为学好电气工程类、控制工程类等各专业后续课程打好坚实的基础。

本书可作为高等院校电类和机电类各专业的研究生、本科生和专科生的教材,亦可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/阎治安,苏少平,崔新艺编著.—3版.—西安:
西安交通大学出版社,2016.8
普通高等教育“十一五”国家级规划教材 西安交通
大学“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5605-8975-6

I. 电… II. ①阎… ②苏… ③崔… 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(2016)第 216596 号

书 名 电机学(第 3 版)
编 著 阎治安 苏少平 崔新艺
责任编辑 贺峰涛 屈晓燕

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 西安建科印务有限责任公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16 印张 20.5 字数 487 千字
版次印次 2016 年 9 月第 3 版 2016 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-8975-6/TM·92
定 价 42.00 元

读者购书、书店添货或发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:eibooks@163.com

版权所有 侵权必究

前 言

本书为满足教学改革的需要,以全国高等学校电工技术类专业教材编审委员会通过的教学大纲为根据,为适应大学电气工程类、控制工程类等各专业面要拓宽的思路而编写,适用于电力系统及其自动化、电机电器及其控制、高电压技术及绝缘、工业自动化、自动化、测控、水利电力、农电等专业。通过本课程的学习,使学生能掌握几种典型电机的结构、原理、特性和应用,并学会其实验方法,提高操作技能,在实际工作中能达到对电机合理使用、正确选择、排除简单故障和开拓创新的目的。并为后续其他专业课的学习打下良好基础。

本书第1版由西安交通大学电机教研室王正茂、阎治安、崔新艺、苏少平四位教师编写,第2版由阎治安、崔新艺、苏少平编写。在编写过程中比较系统地总结了交通大学长期以来在“电机学”方面的教学经验,广泛听取了教研室其他教师的意见,参考了本校教材和以往十多年我校曾采用的汪国梁教授主编的《电机学》教材,并由上海交通大学金如麟教授主审。

为适应当前技术进步和教学改革所需,强调对学生应用能力的培养,推广电机发展新技术,我们在本书第2版基础上,删去了部分过时或较少应用的内容,增加了“特种电机”篇,并对其他章节内容进行了较大幅度的调整改进、充实和修订,编写出本书第3版。

本书第3版由西安交通大学阎治安教授*、苏少平副教授和崔新艺副教授合作编写,具体分工为:阎治安教授负责编写“电机学概述和磁路简介”及第5~9章和第12~13章,与苏少平副教授合作编写“特种电机”篇,并修改第二、三篇;苏少平副教授负责编写第10~11章和第16~20章,与阎治安教授合作编写“特种电机”篇,并修改第一、四篇;崔新艺副教授负责编写第1~4章和第14~15章。全书由阎治安教授负责统筹和组织编写,由山东大学李光友教授和西安交通大学梁得亮教授主审。参加本书审阅工作的还有西安交通大学鱼振民教授、刘新正副教授和高琳副教授等。他们对本书的编写提出了许多宝贵意见,在此向他们表示诚挚的感谢!

本书配有辅导书,如参考文献[1]、[4]、[5]等。尤其是阎治安教授、孙萍高级工程师编写的《电机学(第3版)习题解析及实验指导》一书对本书的全部习题和思考题(还有个别选用的选做题),都有详尽解析,并新增了与本书配套的实验内容。

本书的网络支持平台为西安交通大学“电机学网络课堂”,网址为 <http://ee.xjtu.edu>。

* 阎治安教授 2011—2017 年在西京学院任教。

cn/dj。西安交通大学电机学课程组的“电机学课程建设”先后被评为校级和省级精品课程。另外,本书先后被列入“十一五”国家级规划教材、西安交通大学“十一五”规划教材及西安交通大学“十三五”规划教材。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,殷切希望读者批评指正。

编 者

2016 年 5 月

目 录

电机学概述和磁路简介

第一篇 直流电机

第 1 章 直流电机的工作原理、结构及额定值

1.1 直流电机的工作原理	(7)
1.1.1 直流发电机的工作原理	(7)
1.1.2 直流电动机的工作原理	(9)
1.2 直流电机的结构	(10)
1.2.1 定子	(11)
1.2.2 转子	(12)
1.3 电枢绕组	(13)
1.4 直流电机的额定值	(17)
本章小结	(18)
习题与思考题	(18)

第 2 章 直流电机的基本理论

2.1 直流电机的励磁方式	(20)
2.2 空载时直流电机的气隙磁场	(21)
2.3 负载时直流电机的气隙磁场	(21)
2.4 电枢绕组中的感应电势	(25)
2.5 直流电机的电势平衡方程	(26)
2.5.1 直流发电机的电势平衡方程	(26)
2.5.2 直流电动机的电势平衡方程	(26)
2.6 电磁转矩	(27)
2.7 直流电机的损耗和功率平衡方程	(27)
2.7.1 直流电机中的损耗	(27)
2.7.2 直流发电机的功率平衡方程	(28)
2.7.3 直流电动机的功率平衡方程	(29)
本章小结	(31)
习题与思考题	(32)

第3章 直流发电机

3.1 他励直流发电机的运行特性	(34)
3.1.1 开路特性	(34)
3.1.2 外特性	(34)
3.2 并励直流发电机的运行特性	(35)
3.2.1 并励直流发电机的建压条件	(35)
3.2.2 开路特性	(36)
3.2.3 外特性	(36)
3.3 复励直流发电机的运行特性	(36)
3.3.1 开路特性	(37)
3.3.2 外特性	(37)
本章小结	(38)
习题与思考题	(38)

第4章 直流电动机

4.1 直流电动机的起动及改变转向	(40)
4.1.1 电枢回路串电阻起动	(40)
4.1.2 他励直流电动机降低电枢电压起动	(41)
4.1.3 改变直流电动机转向的方法	(41)
4.2 他励直流电动机的工作特性	(41)
4.2.1 转速特性	(41)
4.2.2 转矩特性	(42)
4.2.3 效率特性	(42)
4.3 他励直流电动机的机械特性	(42)
4.3.1 机械特性方程式	(42)
4.3.2 固有机械特性	(43)
4.3.3 人为机械特性	(43)
4.4 串励直流电动机的机械特性	(44)
4.5 复励直流电动机的机械特性	(45)
4.6 负载的机械特性	(45)
4.6.1 恒转矩负载	(46)
4.6.2 泵类负载	(46)
4.6.3 恒功率负载	(46)
4.7 电动机稳定运行的条件	(47)
4.8 他励直流电动机的调速方法	(48)
4.8.1 改变电枢电压调节转速	(48)
4.8.2 调节励磁回路电阻,改变励磁电流 I_f 调节转速	(49)

4.8.3 电枢回路串入调节电阻调节转速	(50)
4.8.4 不同调速方式时电动机的功率与转矩	(51)
4.9 直流电动机的制动	(51)
4.9.1 能耗制动	(52)
4.9.2 反接制动	(53)
4.9.3 回馈制动	(54)
4.10 直流电机的换向	(55)
本章小结	(56)
习题与思考题	(57)

第二篇 变压器

第5章 变压器的结构、原理及额定值

5.1 变压器的用途和工作原理	(60)
5.2 变压器的结构及类型	(61)
5.2.1 绕组	(62)
5.2.2 铁心	(63)
5.2.3 油箱和冷却装置	(65)
5.2.4 总体结构	(66)
5.3 变压器的额定值	(67)
本章小结	(67)
习题与思考题	(68)

第6章 变压器的基本理论

6.1 变压器的空载运行	(69)
6.1.1 变压器空载运行时的物理分析	(69)
6.1.2 磁通和电势、电压的相互关系	(70)
6.1.3 变压器的变比 k 和电压比 K	(71)
6.1.4 变压器空载运行时的等效电路和相量图	(72)
6.2 变压器的负载运行	(73)
6.2.1 变压器负载时的磁势平衡方程	(73)
6.2.2 负载运行时的电势平衡方程	(75)
6.3 变压器的等效电路和相量图	(75)
6.3.1 变压器的折算法	(76)
6.3.2 变压器负载运行时的等效电路	(77)
6.3.3 变压器负载运行的相量图	(79)
6.4 变压器的参数测定和标么值	(80)

6.4.1	变压器的空载试验	(80)
6.4.2	稳态短路试验	(81)
6.4.3	标么值	(82)
6.5	变压器运行时副边电压的变化和调压装置	(83)
6.5.1	电压调整率	(83)
6.5.2	变压器的稳压装置	(84)
6.6	变压器的损耗和效率	(86)
6.6.1	变压器的损耗	(86)
6.6.2	效率	(86)
本章小结		(92)
习题与思考题		(92)

第7章 三相变压器

7.1	三相组式和芯式变压器	(94)
7.1.1	三相组式变压器	(94)
7.1.2	三相芯式变压器	(94)
7.2	三相变压器的联结组	(95)
7.2.1	原、副方绕组感应电势之间的相位关系(即单相变压器的联结组)	(95)
7.2.2	三相变压器的联结组	(96)
7.2.3	三相变压器的标准联结组	(100)
7.3	三相变压器的励磁电流和电势波形	(101)
7.3.1	单相变压器励磁电流的波形	(101)
7.3.2	三相变压器不同联结组中的电势波形	(102)
7.4	变压器的并联运行	(104)
7.5	三相变压器的不对称运行	(108)
7.5.1	对称分量法的原理	(108)
7.5.2	“Y _y ”联结变压器的单相短路时的接线图	(109)
本章小结		(111)
习题与思考题		(112)

第8章 自耦变压器、三绕组变压器和互感器

8.1	自耦变压器	(114)
8.1.1	定义	(114)
8.1.2	变比 k_a	(114)
8.1.3	磁势平衡	(115)
8.1.4	容量关系	(115)
8.1.5	传导容量和电磁容量	(116)

8.2 三绕组变压器	(116)
8.2.1 结构和用途	(116)
8.2.2 三绕组变压器的特性	(117)
8.3 互感器	(118)
8.3.1 电流互感器	(119)
8.3.2 电压互感器	(119)
本章小结	(120)
习题与思考题	(120)

第9章 变压器的暂态运行

9.1 变压器空载合闸	(121)
9.2 变压器暂态短路	(123)
9.2.1 副绕组突然短路时的短路电流	(123)
9.2.2 暂态短路时的机械力	(125)
9.3 过电压现象	(125)
本章小结	(127)
习题与思考题	(127)

第三篇 异步电机

第10章 交流旋转电机的绕组

10.1 三相同步发电机的工作原理	(130)
10.2 交流绕组概述	(130)
10.2.1 相关概念和术语	(131)
10.2.2 交流绕组的构成原则	(132)
10.2.3 电势星形图	(133)
10.3 三相单层绕组	(134)
10.4 三相双层绕组	(137)
10.4.1 双层叠绕组	(137)
10.4.2 双层波绕组	(138)
本章小结	(138)
习题与思考题	(139)

第11章 交流绕组中的感应电势

11.1 一个线圈的感应电势	(140)
11.1.1 导体的感应电势	(140)
11.1.2 线圈的电势	(141)

11.2 交流分布绕组的感应电势	(143)
11.2.1 线圈组的电势	(143)
11.2.2 单层绕组的相电势	(144)
11.2.3 双层绕组的相电势	(145)
11.3 高次谐波电势及其削弱方法	(145)
本章小结	(147)
习题与思考题	(147)

第 12 章 交流绕组产生的磁势

12.1 交流电机定子单相绕组中的磁势——脉振磁势	(149)
12.1.1 整距集中绕组的磁势	(149)
12.1.2 矩形波磁势的谐波分析法	(150)
12.1.3 整距分布绕组的磁势及分布系数	(152)
12.1.4 双层短距绕组的磁势及短距系数	(153)
12.2 单相脉振磁势的分解	(155)
12.2.1 数学分解	(155)
12.2.2 图解分析	(156)
12.3 三相绕组的基波合成磁势——旋转磁势	(157)
12.3.1 三相绕组中的各相磁势	(157)
12.3.2 用数学变换求合成磁势	(158)
12.3.3 三相基波合成磁势的结论	(159)
12.4* 三相合成磁势中的高次谐波磁势	(160)
12.5 交流旋转电机中的主磁通和漏磁通	(161)
12.5.1 主磁通	(161)
12.5.2 漏磁通及漏电抗	(161)
12.5.3 影响漏电抗大小的因素	(162)
本章小结	(163)
习题及思考题	(163)

第 13 章 异步电机的基本理论

13.1 异步电机的结构及额定值	(165)
13.1.1 定子	(165)
13.1.2 气隙	(167)
13.1.3 转子	(167)
13.1.4 异步电动机的型号及额定值	(168)
13.2 异步电机的三种运行状态	(169)
13.2.1 三相异步电动机的工作原理——异步电机作为电动机状态时	(169)

13.2.2	异步电机作为发电机运行状态	(170)
13.2.3	异步电机在制动状态下运行	(170)
13.3	异步电动机的电势平衡	(171)
13.3.1	定子绕组的电势平衡方程	(171)
13.3.2	转子绕组的电势平衡方程	(172)
13.4	异步电动机的磁势平衡	(173)
13.4.1	转子磁势的大小和转速	(173)
13.4.2	磁势平衡方程	(174)
13.5	异步电动机的等效电路及相量图	(175)
13.5.1	把转子旋转的异步电动机折算为堵转时的异步电动机 ——频率折算	(175)
13.5.2	异步电动机的转子绕组折算和等效电路	(176)
13.5.3	异步电动机的相量图分析	(178)
13.5.4	等效电路的简化——异步电动机的近似等效电路	(178)
13.6	三相异步电动机的功率平衡及转矩平衡方程	(179)
13.6.1	功率平衡方程及效率	(179)
13.6.2	转矩平衡方程	(180)
13.7	异步电动机的电磁转矩和机械特性	(183)
13.7.1	电磁转矩	(183)
13.7.2	机械特性	(184)
13.7.3	异步电动机的最大转矩及过载能力	(185)
13.7.4	异步电动机的启动电流和启动转矩	(186)
13.7.5*	转矩的实用公式	(187)
13.8	异步电动机的工作特性	(189)
13.9*	三相异步电动机的参数测定	(191)
13.9.1	空载试验	(191)
13.9.2	堵转试验	(192)
	本章小结	(193)
	习题与思考题	(194)

第 14 章 三相异步电动机的起动及速度调节

14.1	异步电动机的起动性能	(197)
14.2	鼠笼式异步电动机的起动方法	(197)
14.2.1	直接起动	(197)
14.2.2	降压起动	(198)
14.2.3	软起动	(200)
14.3	绕线式异步电动机的起动	(201)
14.3.1	转子回路串电阻起动	(201)

14.3.2	转子回路串频敏变阻器起动	(202)
14.4	改善起动性能的三相鼠笼式异步电动机	(203)
14.5	异步电动机的调速方法综述	(205)
14.6	三相异步电动机的变极调速	(206)
14.6.1	单绕组变极三相异步电动机的变速原理	(206)
14.6.2	单绕组变极三相异步电动机的转动方向分析	(207)
14.6.3	变极三相电动机接法及其功率与转矩的关系	(207)
14.7	异步电动机变频调速	(210)
14.7.1	从基频向低变频调速	(210)
14.7.2	从基频向高变频调速	(212)
14.8	改变定子电压调速	(213)
14.9	绕线式转子异步电动机调速	(214)
14.9.1	在转子回路中串电阻调速	(214)
14.9.2	在转子回路接入附加电势调速——串级调速	(215)
	本章小结	(217)
	习题与思考题	(217)

第 15 章 单相异步电动机

15.1	单相异步电动机结构及分类	(220)
15.2	单相异步电动机的磁场和机械特性	(220)
15.2.1	一相定子绕组通电时的磁场和机械特性	(220)
15.2.2	两相定子绕组通电时的磁场和机械特性	(221)
15.3	各种类型的单相异步电动机	(222)
	本章小结	(226)
	习题与思考题	(226)

第四篇 同步电机

第 16 章 同步电机原理和结构

16.1	同步发电机原理简述	(228)
16.1.1	结构模型	(228)
16.1.2	工作原理	(228)
16.1.3	同步电机的运行方式	(229)
16.2	同步发电机的型式和结构	(229)
16.2.1	两种基本型式	(229)
16.2.2	同步电机的结构特点	(230)

16.2.3 同步发电机励磁方式简介	(231)
16.3 同步电机额定值和型号	(233)
16.3.1 额定值	(233)
16.3.2 国产同步电机型号	(233)
本章小结	(233)
习题与思考题	(234)

第 17 章 同步发电机的基本理论

17.1 空载运行分析	(235)
17.1.1 空载气隙磁场	(235)
17.1.2 空载特性	(236)
17.2 负载运行和电枢反应分析	(236)
17.2.1 负载后的磁势分析	(236)
17.2.2 电枢反应	(237)
17.2.3 电枢反应电抗和同步电抗	(240)
17.3 同步发电机的电势方程及相量图	(241)
17.4 同步发电机的基本特性及电抗测定	(243)
17.4.1 短路特性	(243)
17.4.2 利用短路特性和空载特性求同步电抗	(243)
17.4.3 零功率因数负载特性	(244)
17.4.4 利用零功率因数特性和空载特性求取同步电抗和漏抗	(245)
17.4.5 外特性和电压调整率	(245)
本章小结	(247)
习题与思考题	(248)

第 18 章 同步发电机的并网运行

18.1 并联条件及并联方法	(250)
18.2 功率平衡方程和功角特性	(253)
18.2.1 功率平衡方程	(253)
18.2.2 功角及功角特性	(254)
18.3 并网后有功功率及无功功率的调节、V 形曲线	(256)
18.3.1 有功功率的调节	(256)
18.3.2 无功功率的调节	(257)
本章小结	(261)
习题与思考题	(261)

第 19 章 同步电动机

19.1 同步电动机工作原理	(263)
----------------------	-------

19.2	同步电动机电势平衡和相量图	(264)
19.3	同步电动机的优点	(264)
19.4	同步电动机的功角特性	(265)
19.5	同步电动机的异步起动法	(266)
19.6	磁阻同步电动机	(268)
19.7	开关磁阻电动机简介	(269)
	本章小结	(270)
	习题与思考题	(270)

第 20 章 同步发电机的异常运行

20.1	三相同步发电机不对称运行的分析方法	(272)
20.2	稳态不对称短路分析	(274)
20.2.1	单相线对中性点短路	(274)
20.2.2	两相线对线短路	(275)
20.3	三相突然短路分析	(276)
20.3.1	分析的基本方法——超导闭合回路磁链不变原则	(276)
20.3.2	三相突然短路的物理过程	(276)
20.3.3	突然短路时的电抗	(278)
20.4	突然短路电流	(279)
20.5	同步电机的振荡	(280)
20.6	不对称运行和突然短路的影响	(282)
20.6.1	不对称运行影响	(282)
20.6.2	突然短路的影响	(282)
	本章小结	(282)
	习题与思考题	(283)

第五篇 特种电机

第 21 章 特种用途的电机

21.1	直流弧焊机	(286)
21.1.1	电源外特性与焊接电弧的关系	(286)
21.1.2	对弧焊机的要求	(287)
21.1.3	旋转式直流弧焊机的结构和原理	(287)
21.2	汽车用电机	(288)
21.2.1	汽车用发电机	(289)
21.2.2	汽车用起动机	(293)
21.2.3	汽车用磁电机	(294)

21.3 无刷直流电动机	(295)
21.4 防爆电动机	(297)
21.4.1 概述	(297)
21.4.2 分类	(297)
21.4.3 结构特点及要求	(298)
本章小结	(299)
习题与思考题	(299)

第 22 章 微特电机

22.1 步进电动机	(301)
22.1.1 概述	(301)
22.1.2 反应式步进电动机的原理	(302)
22.1.3 步进电动机的基本特点及特性	(303)
22.2 自整角机	(304)
22.2.1 结构	(304)
22.2.2 类型	(305)
22.2.3 控制式自整角机的原理	(306)
22.2.4 力矩式自整角机的原理功能简述	(307)
22.3 电机扩大机	(308)
22.3.1 结构	(308)
22.3.2 原理	(309)
本章小结	(311)
习题与思考题	(311)

参考文献	(312)
------------	-------

电机学概述和磁路简介

电机是一种利用电磁感应原理进行机电能量转换或信号传递的电气设备或机电元件。电机学是关于电机基本理论的专业基础课程。这里首先对本门课程的有关情况、特点、分析方法及学习本课程所依托的有关物理、电路、磁路等基础知识作以简单介绍。

一、为什么要学习“电机学”？

这是由于电机在国民经济中的广泛应用和该课程与其它课程的紧密联系所决定的。例如：

① 电机在电力系统中的作用。同步发电机是电力系统的电源，变压器是输、配电的关键设备，异步电动机是电厂各种转动机械的原动机，直流电机在电厂某种场合中起重要作用。这充分说明电机与电力工业的发展是息息相关的。

② 工厂里车、铣、刨、磨、钻等机床都靠电动机来拖动。

③ 交通运输中的电力机车和无轨电车也是用电动机来拖动。

④ 农村用的脱粒机、收割机、磨面机、抽水机等也离不开电机。

⑤ 文教、医疗系统中的不少设备靠电机来驱动。

⑥ 国防上雷达天线和人造卫星的自动控制系统也要用许许多多的被称作“控制电机”的微电机来作为元件进行工作和执行命令。

⑦ 日常生活中的家用电器绝大多数都离不开电机。

这就足以说明电机的应用已渗透到国民经济的各个领域。

对于电力系统专业的技术人员来说，必然要从事电力系统稳定性研究，但若不了解系统的电源——同步发电机的特性，也就不能解决好稳定性问题；对于从事电气自动化专业的人员若不清楚所控制的对象即各类电动机的特性，也谈不上搞好自动控制的问题。故“电机学”课程是学好后续各专业课程的重要技术基础课。

二、“电机学”课程的内容和电机的类型

(1) 课程内容

普通电机学课程通常选择 4 种典型电机——变压器、直流电机、异步电机和同步电机来进行理论分析。重点讲述这 4 种电机的原理、结构、特性和应用。

(2) 电机的类型

电机的类型有多种划分方法，通常按以下几种类型来划分：

① 从能量转换角度划分

电机	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)