



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

清华大学电气工程系列教材

电机学

Electric Machinery

孙旭东 王善铭 编著

Sun Xudong Wang Shanming

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

清华大学电气工程系列教材

电机学

Electric Machinery

孙旭东 王善铭 编著

Sun Xudong Wang Shanming

清华大学出版社

北京

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电机学/孙旭东,王善铭编著. —北京:清华大学出版社,2006.9

(清华大学电气工程系列教材)

ISBN 7-302-13668-8

I. 电… II. ①孙… ②王… III. 电机学—高等学校—教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 097537 号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:佟丽霞

文稿编辑:张占奎

印刷者:清华大学印刷厂

装订者:三河市化甲屯小学装订二厂

发行者:新华书店总店北京发行所

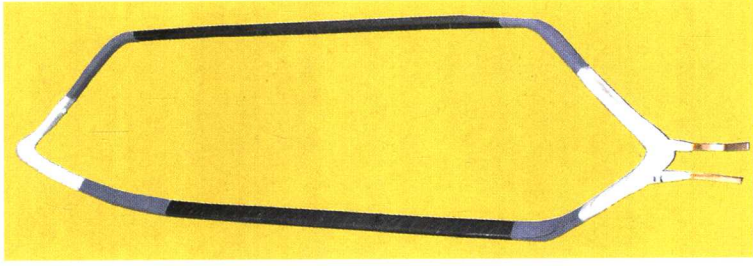
开 本:185×260 印张:21.5 插页:2 字数:506千字

版 次:2006年9月第1版 2006年9月第1次印刷

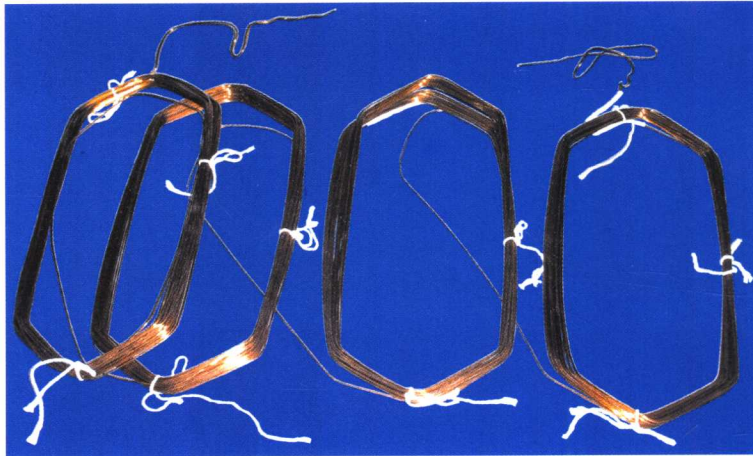
书 号:ISBN 7-302-13668-8/TM·88

印 数:1~3000

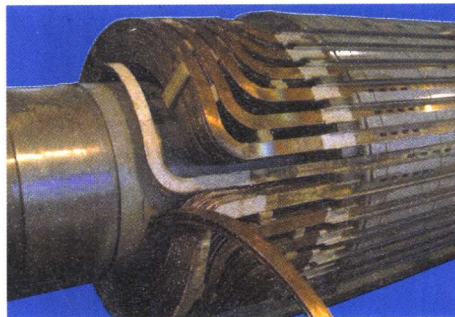
定 价:29.90元



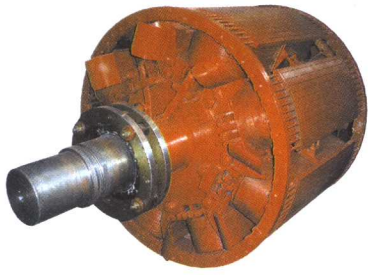
彩图 1 高压交流电机定子线圈(成形线圈)



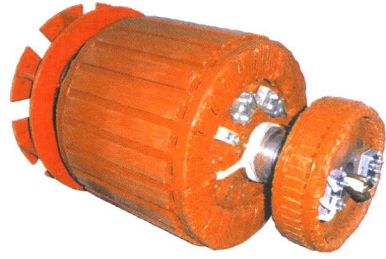
彩图 2 低压交流电机的一个线圈组(漆包线绕制的散嵌线圈)



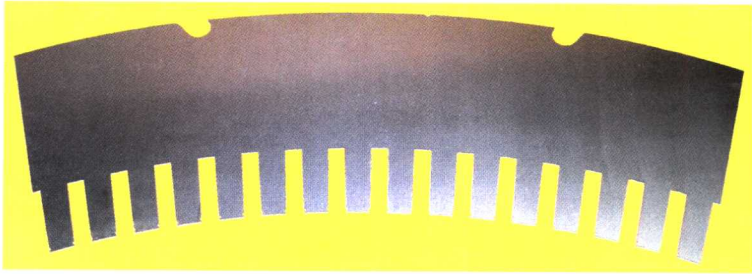
彩图 3 汽轮发电机转子励磁绕组嵌线



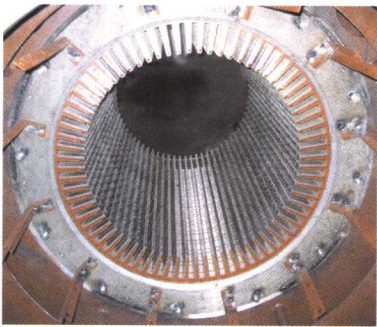
彩图 4 水轮发电机转子



彩图 5 无刷励磁同步电机转子



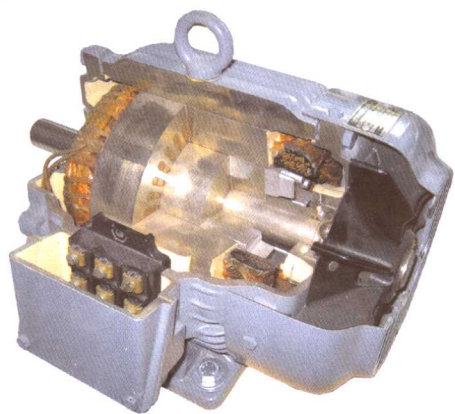
彩图 6 同步电机定子扇形冲片



彩图 7 同步发电机定子铁心



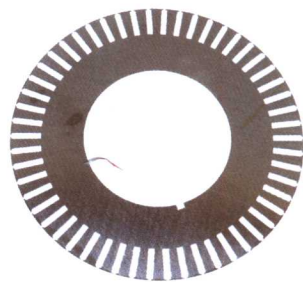
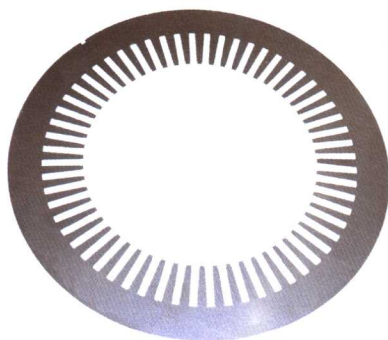
彩图 8 大型同步电动机定子铁心与绕组(局部)



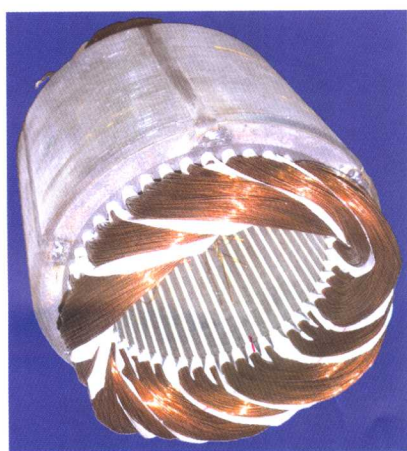
彩图 9 中小型三相笼型异步电机的典型结构



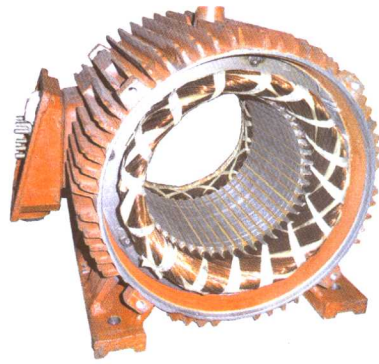
彩图 10 中小型异步电机定子铁心



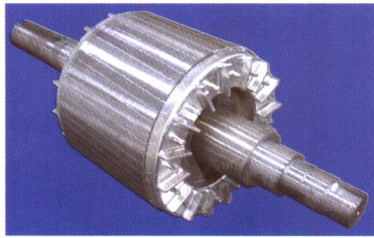
彩图 11 高压异步电机典型定子和转子冲片



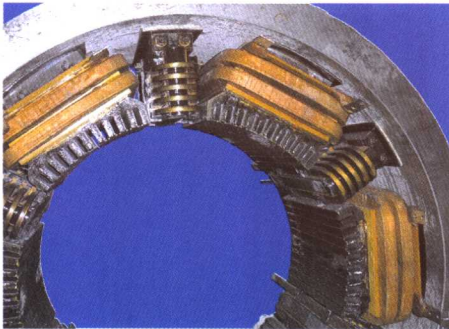
彩图 12 三相异步电机定子铁心与绕组



彩图 13 中小型三相异步电机定子



彩图 14 三相异步电机的笼型转子(铸铝)和绕线转子(未装集电环时)



彩图 15 直流电机定子主极和换向极




彩图 16 直流电机电枢绕组线棒

清华大学电气工程系列教材编委会

主 任 王赞基

编 委 邱阿瑞 梁曦东 夏 清
袁建生 周双喜 谈克雄
王祥珩

前言



随着高等学校素质教育的开展和对培养学生创造能力要求的提高,电气工程及其自动化专业的教学体系、教学内容、教学模式等都处于改革和探索之中。“电机学”作为该专业学生必修的一门重要的专业基础课,其教学要求和内容也相应有所调整。清华大学的“电机学”课程已被安排在一个学期内完成,课内学时数比原来削减了 1/3。在这种情况下,如何使学生较好地理解和掌握电机学的核心内容,为其以后在电气工程领域中的学习和研究打下坚实的基础,并使其通过本课程的学习,提高分析和解决工程实际问题的能力,提高自主学习和进行创造性思维的能力,是我们在教学实践中一直思考和探索的问题。这本《电机学》教材就是为了配合培养计划和教学要求的新变化而编写的,是反映我们的思考与探索、体现我们的教学理念的一个阶段性总结。

笔者所在的清华大学电力电子与电机系统研究所(原电机教研组)一贯重视教材建设。自 20 世纪 60 年代起,本所教师已经编著出版了多种《电机学》教材,它们被多所普通高等学校、成人高等学校和广播电视大学选做教材,受到了广大读者的欢迎。这种优良传统和积淀下来的教学成果,为我们在新形势下编写一本适用的教材奠定了坚实的基础。本书在继承和发扬这些教材的优点的同时,在指导思想、内容体系和教学方式等方面进行了新的探索和尝试。

1. 指导思想

电机学通常被认为是一门难教难学的课程,主要原因是电机学中物理概念多、电磁关系复杂,且有学生一时难以适应的工程问题分析方法。但这也说明电机学的学习具有一定的挑战性,在激励学生思考和探索问题方面具有优势。勤思多问,是学好电机学的必由之路。这与当前高等学校特别是研究型大学的教学要求是非常契合的。如何发挥好电机学在培养学生学习能力方面的积极作用,是教师在教学实践中重点考虑的问题。

编写本书的指导思想,就是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。目标是为高等学校电气工程及其自动化专业以及相关专业的学生提供一本便于自主学习的专业基础课教材或参考书。

2. 内容体系

电机学阐述变压器、同步电机、异步电机和直流电机这四类通用电机的工作原理和分析方法。在以往的教材中,直流电机与交流电机的内容是相互独立的。但交、直流电机内部都有交变的电磁感应关系,物理本质是相同的。因此,本书将电机学内容按照先交流电机、后直流电机的次序编排,并把直流电机作为交流电机的一个特例来介绍,从而把交、直流电机统一起来。这是一种以交流电机为主线的新的编写思路和体系,希望藉此能更好地揭示交、直流电机的共同规律,使学生对电机运行原理有更全面深入的理解,便于进一步学习电机和电力电子变流器构成的系统。我们在近几年的教学中已采用了这种内容体系,取得了较好的教学效果,但仍需通过更多的教学实践来对其进行检验、改进和完善。

电机理论和技术是在不断发展的,学生只有掌握了扎实的基本理论,才会有正确处理复杂工程实际问题的能力,才能有开拓创新的坚实基础。基于这种认识,本教材把对电机的核心问题——内部电磁关系的分析(而不是特性的分析)置于更重要的地位,并围绕这个核心,把电机学的基本物理概念和基本分析方法讲得透彻,使学生掌握得准确牢固,而不追求内容的多而全。本教材的具体内容根据以下主要原则来选择:

(1) 以激发学生自主学习、探究问题的积极性为出发点,根据专业基础课的定位,选择电气工程各二级学科共同需要的最基本、最主要的内容。

(2) 侧重于使学生理解掌握基本概念和基本分析方法,辅助以运行特性分析。

(3) 注意与先修课程和后续课程在内容上的衔接,避免重复。

(4) 适当融入一些电机新技术发展的内容,如异步电动机的软起动、异步发电机用于风力发电等。对这些新内容不单列章节专门介绍,而是将其与基本内容有机地融合在一起,以使读者能够用联系和发展的观点来学习和思考,提高其学习兴趣,培养其探索的意识。

3. 主要特色和教学法

本书包括绪论、变压器、交流电机的共同问题、同步电机、异步电机和直流电机 6 部分。主要阐述各类电机的共同性问题,重点为对称稳态运行时基本电磁规律的分析,突出基本概念、基本理论和基本分析方法。本书的特色和在教学法方面所做的考虑如下。

(1) 本书以适合学生自主学习为出发点,优先考虑阐述的清晰和可读性。对内容取舍和难易程度、实际应用问题、插图、例题及习题等进行了细致考虑和精心安排,做到内容精选、重点突出、详略得当、循序渐进、由浅入深。在内容表述中,力求准确、精练,但不过于简略,而是注意把分析思路讲清楚,富于启发,便于学生理解、掌握和应用。为了引导学生更好地学习电机学,在“绪论”中介绍了本课程的特点,并对学习方法提出了有益的建议。

(2) 本书特别强调基本物理概念,因为它们是企业创新能力的基础,是一个学生知识中最有长久价值的部分。书中对主要物理概念采取了精讲、多练的处理方式,对交流电机还强调采用时空相矢量图的定性分析,目的是使学生从物理概念上加深对电机内部电磁规律的理解,从而能更好地掌握电机的基本理论和基本分析方法,有能力解决电机工程实际问题。

(3) 为了便于学生自主学习,本书精选了一些典型例题,并做了详细解答。书中还针

对各章节内容的重点和难点,精心编写了大量的练习题、思考题和习题,以引导学生理解掌握本课程的重要知识,培养和提高学生分析解决问题的能力。练习题主要采用问答的形式,围绕每一节的基本概念和重要内容来设置,反映了对每一节内容学习的基本要求,便于学生在学习了每一节内容后及时练习和检查。在每章后,设有较多的思考题,其难度比练习题要大一些,或者具有一定的综合性,可供学生在学习完一章内容后对所学内容进行复习和总结时选用。这些练习题和思考题,体现了电机学学习中要求积极思考、注重理解物理概念的特点,是为学好电机学而应着重选做的题目。此外,每章的最后还安排了数量较多的习题,主要是需要计算求解的题目,这些题目难度不等,学生可根据个人的情况选做。此外,教师在教学中,还可根据学生的理解能力和掌握情况,适当提供一些参考文献或者工程应用实例作为补充,以扩展学生的思路。

(4) 在每章末尾都有一个小结,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把握。

(5) 书中采用大量的插图来帮助学生理解。还提供了一些实际电机的彩色照片,来加深学生对电机结构和工作原理的感性认识,激发学生进一步探求的欲望。

(6) 为了便于读者掌握专业名词和阅读英文文献,书中用黑体标出了中文主要名词并给出了对应的英文,最后还给出了中英文名词索引,以便于读者查阅。全书的名词和符号采用或参照了最新的有关国家标准和全国科学技术名词审定委员会公布的《电工名词 1998》、《电力名词 2002》等文献。

本书可供普通高等学校和成人高等学校电气工程学科相关专业电机学课程的教材或参考书,也可供有关科技人员学习参考。为了便于学生更好地理解和掌握电机学的主要内容,提高分析和解决问题的能力,将出版本书的配套教材《电机学学习指导》。

本书由孙旭东和王善铭编著。孙旭东撰写了绪论和第 1 篇、第 4 篇和第 5 篇,王善铭撰写了第 2 篇和第 3 篇。研究所的有关教师对本书提出了宝贵建议。本书是作者在繁忙的教学、科研和行政工作中利用闲暇时间完成的,尽管我们已经做了不懈的努力,力求在传承清华大学《电机学》教材建设的优良传统和丰富成果的基础上,有所创新,编写出一本精品教材。但是由于编者学识水平有限,本书难免有缺点和错误,恳请广大读者批评指正和提出宝贵意见。

编著者

2006 年 6 月于清华园

目录



绪论.....	1
0.1 电机在国民经济中的作用	1
0.2 电机的分类	2
0.3 电机学课程性质和学习方法	3
0.4 电机学中常用的电工定律	4

第1篇 变 压 器

第1章 变压器的用途、分类、基本结构和额定值	15
1.1 变压器的用途和分类.....	15
1.2 变压器的基本结构.....	16
1.3 变压器的额定值.....	19
小结	20
思考题	20
习题	20
第2章 变压器的运行分析	21
2.1 变压器的空载运行.....	21
2.2 变压器的负载运行.....	28
2.3 变压器参数的测定.....	36
2.4 标么值.....	39
2.5 变压器的运行特性.....	42
小结	45
思考题	46

习题	47
第 3 章 三相变压器	52
3.1 三相变压器的磁路系统	52
3.2 三相变压器的电路系统——绕组联结方式和联结组	53
3.3 三相变压器的空载电动势波形	58
3.4 变压器的并联运行	59
小结	62
思考题	62
习题	63
第 4 章 自耦变压器、三绕组变压器和互感器	65
4.1 自耦变压器	65
4.2 三绕组变压器	68
4.3 互感器	70
小结	71
思考题	72
习题	72
第 2 篇 交流电机的共同问题	
第 5 章 交流电机的绕组和电动势	74
5.1 交流电机的基本工作原理,对交流绕组的基本要求	74
5.2 三相单层集中整距绕组及其电动势	78
5.3 三相单层分布绕组及其电动势	86
5.4 三相双层分布短距绕组及其电动势	91
小结	96
思考题	96
习题	97
第 6 章 交流绕组的磁动势	101
6.1 单层集中整距绕组的磁动势	101
6.2 三相双层分布短距绕组的磁动势	111
6.3 椭圆形磁动势	115
小结	117
思考题	118
习题	119

第3篇 同步电机

第7章 同步电机的用途、分类、基本结构和额定值	121
7.1 同步电机的用途和分类	121
7.2 同步电机的基本结构	122
7.3 同步电机的额定值	126
小结.....	127
思考题.....	127
习题.....	127
第8章 同步发电机的电磁关系和分析方法	128
8.1 同步发电机的空载运行	128
8.2 同步发电机负载时的电枢反应	133
8.3 隐极同步发电机的时空相矢量图和相量图	137
8.4 凸极同步发电机的双反应理论和相量图	142
8.5 同步发电机的电压调整率和负载时励磁磁动势的求法	148
小结.....	149
思考题.....	150
习题.....	151
第9章 同步发电机的运行特性	155
9.1 同步发电机的空载特性、短路特性和同步电抗的测定.....	155
9.2 同步发电机的零功率因数负载特性和保梯电抗的测定	157
9.3 同步发电机的外特性和调整特性	161
小结.....	163
思考题.....	163
习题.....	164
第10章 同步发电机的并联运行	167
10.1 同步发电机并联合闸的条件和方法	168
10.2 同步发电机并联运行分析	171
10.3 有功功率调节和静态稳定	175
10.4 无功功率调节和V形曲线	180
小结	183
思考题	184
习题	184

第 11 章 同步电动机	188
11.1 同步电动机的运行分析	188
11.2 同步电动机的起动	192
小结	193
思考题	193
习题	194
第 12 章 同步电机的不对称运行	197
12.1 不对称运行的方程式和等效电路	197
12.2 不对称稳态短路的分析	201
小结	204
思考题	205
习题	205
第 4 篇 异步电机	
第 13 章 异步电机的用途、分类、基本结构和额定值	207
13.1 异步电机的用途、分类和基本结构	207
13.2 三相异步电动机的额定值	209
小结	211
思考题	211
习题	211
第 14 章 三相异步电机的运行原理	212
14.1 三相异步电机转子不转时的电磁关系	212
14.2 三相异步电机转子旋转时的电磁关系	221
小结	231
思考题	232
习题	234
第 15 章 三相异步电动机的功率、转矩和运行特性	237
15.1 三相异步电动机的功率与转矩关系	237
15.2 三相异步电动机的机械特性	240
15.3 三相异步电动机的工作特性	244
15.4 三相异步电动机参数的测定	245
小结	247
思考题	247
习题	249

第 16 章 三相异步电动机的起动、调速和制动	251
16.1 三相异步电动机的起动	251
16.2 三相异步电动机的调速	259
16.3 三相异步电动机的电制动	262
小结	264
思考题	264
习题	265
第 17 章 三相异步电机的其他运行方式	267
17.1 三相异步发电机	267
17.2 感应调压器	269
小结	270
思考题	270
习题	271

第 5 篇 直流电机

第 18 章 直流电机的基本工作原理和结构	272
18.1 直流电机的用途和基本工作原理	272
18.2 直流电机的主要结构	276
18.3 直流电机的额定值	279
小结	280
思考题	280
习题	280
第 19 章 直流电机的运行原理	281
19.1 直流电机的电枢绕组	281
19.2 直流电机的磁场和电枢反应	286
19.3 直流电机的换向	291
19.4 电枢绕组的感应电动势和电磁转矩	294
19.5 直流电机的基本方程式	296
小结	302
思考题	302
习题	304
第 20 章 直流电机的运行特性	306
20.1 直流发电机的运行特性	306

20.2 直流电动机的运行特性	310
20.3 直流电动机的调速	313
20.4 直流电动机的起动和制动	316
小结	318
思考题	318
习题	319
名词索引	323
参考文献	329