

高等院校教材

电机学

(第四版)

李发海 朱东起 编著



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书是在《电机学》(第三版)的基础上,根据新的教学大纲,适应科技发展的需要,集作者多年的教学经验,全面修订改写而成的。

全书共分六篇:变压器;直流电机;交流电机的绕组电动势和磁动势;同步电机;异步电机和特种电机。

本书以电机的三相、对称、稳态运行为主进行分析,重点阐述各类电机的基本概念、基本理论和基本分析方法。对电机的非正常运行只作物理概念介绍,不作详细定量分析。每章后附思考题和习题。

本书可作为普通高等学校和成人高等学校电气工程及其自动化,以及其他强电类专业本科生的教材,也可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/李发海,朱东起编著.—4版.—北京:科学出版社,2007

(高等院校教材)

ISBN 978-7-03-018991-2

I. 电… II. ①李… ②朱… III. 电机学-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 071248 号

责任编辑:余 江 / 责任校对:郑金红
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1982 年 8 月第一版 开本:B5(720×1000)

1991 年 8 月第二版 印张:31

2001 年 1 月第三版 字数:582 000

2007 年 6 月第四版 2007 年 6 月第十五次印刷

印数:59 387—63 386

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

第四版前言

本书第四版的修订工作，首先是适应“电气工程及其自动化”（或“电气工程与自动化”）专业教学大纲的要求，教材内容作相应的调整，精简了一些次要的内容。其次，考虑到科学技术的发展，特别是电力电子技术与微机技术、控制技术的飞速发展，供给电机的电源，不仅有常规的三相对称、工频、正弦波形的电源，还可以对电源电压（或电流）的幅值、频率、波形等进行灵活控制，从而使传统电机的性能更好满足不同负载的要求，并进一步发展成为多种新型电机。在现代社会中，它们正得到越来越广泛的应用。为此，在本书中也增加了这方面的内容。

根据上述思路，本版“电机学”教材中删去了“变压器的并联运行”、“直流电机的磁路和磁化特性”、“直流电机的换向”、“同步电机的派克方程”等四章，将其中有些内容简化后并入相关章节中。增加了三相移相变压器、异步电动机变频调速方面的内容，特别增设了第六篇“特种电机”，包括“自控式同步电动机”、“永磁电机”、“绕线型双馈异步电动机”、“开关磁阻电机调速系统”等四章，介绍这几种电机的工作原理、运行特性。全书共六篇二十七章。同时与本书配套出版了《电机学习题与题解》（第二版）。

本书由李发海、朱东起教授主编并审定。李发海编写了第一至五章、第十八至二十三章以及第二十六、二十七章，朱东起编写了绪论、第六至十七章以及第二十四、二十五章。本书蒙读者厚爱，前三版已印刷了14次，累计印数近六万册。由于作者水平有限，本书难免存在缺点和错误，欢迎读者批评指正。

编著者

2007年1月于清华园

第三版前言

为了适应社会主义市场经济和科学技术发展的需要,培养面向 21 世纪具有更强适应性的高新科技人才,高等学校电工学科的原有专业正在合并为统一的宽口径专业——电气工程及其自动化专业,《电机学》作为宽口径专业的一门专业基础课,在学时比原来有所削减的情况下,担负为多门后继课程打好坚实基础的任务,为此对教学内容进行了调整.为配合教学内容的变化,我们对 1991 年第二版《电机学》进行了全面修订和改写.

《电机学》第三版是根据新的教学大纲,吸收科技发展成果,集中多年的教学经验重新编写而成的.本书力求做到内容精选,重点突出,努力创新,适合教学.全书仍以电机的三相、对称、稳态为主进行分析,重点阐述各类电机的基本概念、基本理论和基本分析方法.对电机的非正常运行只作物理概念的阐述,不作定量分析.全书基本保留了第二版教材的体系,在各篇内容上均作了一些删减、更新.考虑到直流电机在工业上的实际应用减少,其内容删减较多,并去掉了“特殊直流电机”及“整流供电的直流电动机”二章;在交流电机中删去“同步电机的振荡”、“交流电机的损耗、效率、发热和冷却”二章;为了引导学生更好地学习“电机学”课程,增写了“绪论”;为了后续专业课程的需要,增加了“同步电机的派克方程”一章.另外,将同步电机和异步电机共同的理论问题:交流绕组及电动势、磁动势的分析,单独增设为第三篇.全书共五篇二十七章,篇幅比第二版减少约 1/4.为了学生能更好地理解 and 掌握电机学的主要内容,提高分析和解决问题的能力,与本书配套出版《电机学习题与题解》.

清华大学电机教研组一贯重视教材建设,自 1964 年科学出版社出版章名涛教授主编的《电机学》以来,累计出版发行已达 30 余万册.为了适应教学需要,于 1982 年由科学出版社出版了新版《电机学》,即由李发海、陈汤铭、郑逢时、张麟征、朱东起编写的《电机学》第一版,已印刷了三次,在全国教材评比中,曾获机械委颁发的全国高等学校机电、兵工类优秀教材二等奖,该书被多所普通高等学校和成人高等学校选作教材,受到广大读者的欢迎.1991 年经过修订,由科学出版社出版了《电机学》第二版,已印刷了四次.第一、二版共印刷了七次,印数近 4 万册.

本书由李发海、朱东起教授主编并审定.李发海编写了第一至第六章及第二十二至第二十七章;朱东起编写了绪论及第七至第二十章;孙旭东(工学博士)副教授编写了第二十一章,并通读了全稿,对文稿和插图进行了整理和校订,对

稿中的名词、术语和符号进行了统一。教研组有关教师也对本书提供了宝贵意见。由于作者水平有限，本书难免有缺点和错误，欢迎读者批评指正。

编著者

2000年1月于清华园

第二版前言

清华大学电机教研组历来重视电机学教材建设。早在 60 年代初，在教研组自编“电机学”讲义的基础上，由章名涛教授主编的《电机学》（上、下册）于 1964 年由科学出版社出版，从而改变了学生只有翻译教材的局面。该书被很多院校选作教科书使用，截止到 70 年代末，已累计出版发行了 30 多万册。进入 80 年代，为了适应科学技术的发展，并根据教研组多年的教学经验，本书编著者编写了新的《电机学》（上、下册），1982 年仍由科学出版社出版。编写该书的指导思想是：力求选材适当，内容全面，重点突出；注意系统性和理论联系实际；在论述上力求由浅入深，循序渐进，富于启发，便于读者理解、掌握和运用。该书出版后同样受到读者的欢迎，至 1988 年已印刷三次，均已售罄。在 1987 年全国教材评比中，获机械委颁发的全国高等学校机电、兵工类优秀教材二等奖。

近年来，为了适应我国社会主义现代化建设发展和改革开放对人才培养的要求，高等学校的强电类专业拓宽了专业面，在教学计划中增设了控制理论、电力电子学、计算机技术、信息技术等方面的新课程，电机学课程的教学时间有较多的削减。为了更好地配合教学内容的变化，使学生有一本适合自学的教材，我们将 1982 年版的《电机学》进行了全面修订改写。

本书第二版保留了原版教材的体系，削减了原版教材中的特殊变压器、特殊电机以及与电机设计关系密切的绕组、参数计算、发热冷却等方面的内容。本书着重阐述各类电机的共同性问题，重点放在对称稳态运行的基本电磁规律及机电能量转换的分析上，突出电机学分析工具和分析方法的介绍及应用，使读者通过学习本书，能掌握电机的基本理论和基本分析方法，有能力解决所遇到的各种实际电机问题。经全面修订改写后，全书篇幅比第一版减少约四分之一，并将原来的上、下两册合并为一册。

这次全面修订改写是在教学改革的进程中进行的。由于编著者水平的局限，加之时间仓促，书中难免还会存在一些错误和不妥之处，欢迎选用本书作教材的任课教师和广大读者批评指正。

编著者

1990 年 7 月于清华园

第一版前言

根据多年来清华大学电机教研组在教学方面的经验，并为适应目前科学技术的发展，编写了本书。

全书分上、下两册。上册包括变压器和直流电机，下册包括同步电机和异步电机。

本书可作为电机系各专业的电机学教材或参考书。书中主要阐述变压器、直流电机、同步电机和异步电机的运行原理、分析方法和运行特性。限于篇幅，对其他类型电机和一些非基本问题未加论述。在编写过程中力求做到循序渐进，由浅入深，物理概念清楚，对电机的基本原理及分析工具、分析方法作了详细的阐述。在交流电机部分，突出用时空向量图来进行分析，目的是使读者在概念上加深对电机内部的电磁规律的理解。此外还有一些较深入或生产发展提出来的新内容。

本书是由李发海、陈汤铭、郑逢时、张麟征、朱东起合编的。李发海同志负责全书内容与符号的统一，以及文字的修改和整理等工作。全书由高景德教授审阅。在编写过程中教研组的其他同志提供了许多宝贵意见，在此向他们深表谢意。

由于水平有限，书中不妥和错误之处在所难免，希望读者批评指正。

编著者

1981年7月于清华园

目 录

第四版前言

第三版前言

第二版前言

第一版前言

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 电机学课程性质及学习方法	2
0-4 电机学中常用的电工定律	3

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的用途、分类与结构	6
1-1 变压器的用途与分类	6
1-2 电力变压器的主要结构部件	7
1-3 变压器的发热与温升	9
1-4 变压器的额定数据	10
思考题	11
习题	11
第二章 变压器的运行分析	12
2-1 变压器各电磁量正方向	12
2-2 变压器空载运行	13
2-3 变压器负载运行	21
2-4 标么值	33
2-5 变压器参数的测定	36
2-6 变压器的运行性能	40
思考题	43
习题	45
第三章 三相变压器	51
3-1 概述	51
3-2 三相变压器的磁路系统	51

3-3 变压器的联结组标号	52
3-4 三相变压器空载运行电动势波形	61
3-5 变压器的并联运行	64
3-6 三相移相变压器	68
思考题	74
习题	76
第四章 三绕组变压器和自耦变压器	78
4-1 概述	78
4-2 三绕组变压器	78
4-3 自耦变压器	83
思考题	89
习题	89
第五章 变压器空载合闸时的冲击电流	92
5-1 概述	92
5-2 过电流现象	92
思考题	99
习题	99

第二篇 直流电机

第六章 直流电机的用途、基本工作原理与结构	100
6-1 直流电机及其用途	100
6-2 直流电机的基本工作原理	101
6-3 直流电机的主要结构	104
思考题	111
习题	111
第七章 直流电机的磁路和电枢绕组	112
7-1 概述	112
7-2 直流电机的磁路和磁化特性	112
7-3 电枢绕组的一般知识	114
7-4 单叠绕组	116
7-5 单波绕组	118
7-6 其他型式电枢绕组简介	121
7-7 直流电机电枢绕组的感应电动势	121
7-8 直流电机电枢绕组的电磁转矩	124

思考题	126
习题	126
第八章 直流发电机	128
8-1 概述	128
8-2 直流发电机的运行原理	129
8-3 直流发电机的电枢反应	132
8-4 直流发电机的运行特性	135
思考题	141
习题	141
第九章 直流电动机	143
9-1 概述	143
9-2 直流电动机的运行原理	143
9-3 直流电动机的工作特性和机械特性	146
9-4 直流电动机的启动	150
9-5 直流电动机的调速	152
9-6 直流电动机的电磁制动	156
思考题	160
习题	161

第三篇 交流电机的绕组电动势和磁动势

第十章 交流电机的绕组和电动势	165
10-1 交流电机的工作原理, 对绕组的基本要求	165
10-2 三相单层集中整距绕组	170
10-3 三相单层分布绕组	179
10-4 三相双层分布短距绕组	186
10-5 齿谐波电动势、分数槽绕组简介	190
思考题	195
习题	195
第十一章 交流电枢绕组的磁动势	200
11-1 单层集中整距绕组的一相磁动势	200
11-2 单层集中整距绕组的三相磁动势	207
11-3 三相双层分布短距绕组的磁动势	213
11-4 椭圆形磁动势	216
思考题	218

习题	219
----------	-----

第四篇 同步电机

第十二章 同步电机的基本类型与结构	222
12-1 同步电机的用途	222
12-2 同步电机的基本类型与结构	223
思考题	227
习题	227
第十三章 同步电机的基本电磁关系	228
13-1 同步发电机的空载运行	228
13-2 对称负载时的电枢反应	234
13-3 隐极同步发电机的磁动势电动势相-矢量图和电动势相量图	237
13-4 凸极同步发电机的双反应理论及电动势相量图	249
思考题	254
习题	255
第十四章 同步发电机的运行特性	259
14-1 同步发电机的空载特性、短路特性和同步电抗的测定	259
14-2 同步发电机零功率因数负载特性及普梯尔电抗的测定	263
14-3 同步发电机的外特性和调整特性	266
14-4 转差法和取出转子法求参数	267
思考题	270
习题	271
第十五章 同步发电机的并联运行	274
15-1 概述	274
15-2 并联合闸的条件与方法	275
15-3 同步发电机并联运行的理论基础	279
15-4 有功功率的调节和静态稳定	284
15-5 并联运行时无功功率的调节——V形曲线	291
思考题	294
习题	294
第十六章 同步电动机	298
16-1 概述	298
16-2 同步电动机的运行原理	298
16-3 同步电动机的启动	305

思考题	307
习题	308
第十七章 同步电机的非正常运行	311
17-1 概述	311
17-2 不对称运行的相序方程和等效电路	312
17-3 几种不对称稳态短路的分析	316
17-4 负序和零序参数的测定	321
17-5 不对称运行对同步电机的影响	322
17-6 超导体闭合回路磁链守恒定则	323
17-7 同步发电机空载时三相突然短路的分析	324
17-8 突然短路与同步电机及电力系统的关系	335
思考题	337
习题	338

第五篇 异步电机

第十八章 三相异步电动机的结构和基本工作原理	340
18-1 异步电动机的用途与分类	340
18-2 三相异步电动机的结构	340
18-3 三相异步电动机的额定值	342
18-4 三相异步电动机的简单工作原理	343
思考题	344
习题	345
第十九章 三相异步电动机的运行原理	346
19-1 三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系	346
19-2 三相异步电动机转子堵转时的电磁关系	352
19-3 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	359
思考题	367
习题	368
第二十章 异步电动机的功率、转矩与运行性能	372
20-1 三相异步电动机的功率与转矩关系	372
20-2 三相异步电动机的机械特性	374
20-3 三相异步电动机的工作特性	382
20-4 三相异步电动机参数的测定	385
思考题	387

习题	388
第二十一章 三相异步电动机的启动	391
21-1 三相异步电动机的直接启动	391
21-2 三相鼠笼型异步电动机降压启动	392
21-3 高启动转矩的三相鼠笼型异步电动机	396
21-4 绕线型三相异步电动机的启动	399
思考题	401
习题	401
第二十二章 三相异步电动机的调速	403
22-1 概述	403
22-2 改变定子电压调速	403
22-3 转子回路串接电阻调速	404
22-4 变极调速	405
22-5 变频调速	406
22-6 交流电机矢量控制基本概念	408
22-7 鼠笼式异步电动机的转矩直接控制	414
思考题	422
习题	423
第二十三章 三相异步电机的其他运行方式	424
23-1 三相异步发电机	424
23-2 感应调压器	426
思考题	429
习题	429

第六篇 特种电机

第二十四章 自控式同步电动机	430
24-1 概述	430
24-2 交直交自控式同步电动机的工作原理	430
24-3 转子位置检测器	434
24-4 交直交自控式同步电动机的运行性能	436
24-5 交交变频同步电动机的工作原理	439
思考题	442
第二十五章 永磁电机	444
25-1 概述	444

25-2	永磁磁路的磁化特性	444
25-3	永磁磁路中电枢反应的影响	448
25-4	永磁材料和永磁电机结构简介	449
25-5	永磁无刷直流电动机	451
	思考题	457
第二十六章	绕线型双馈异步电动机	458
26-1	双馈电动机的特点	458
26-2	双馈电机转子电流及功率	462
26-3	双馈电机在各种运行状态的功率流动关系	462
26-4	双馈异步电动机调速系统的组成	466
	思考题	466
第二十七章	开关磁阻电机调速系统	467
27-1	开关磁阻电机基本运行原理	467
27-2	开关磁阻电机的电磁转矩	468
27-3	开关磁阻电机调速系统	470
	思考题	473
	参考文献	475

绪 论

0-1 电机在国民经济中的作用

现代社会中，电能是使用最广泛的一种能源。在电能的生产、输送和使用等方面，电机起着重要的作用。

电机主要包括发电机、变压器和电动机等类型。发电机可把机械能转换为电能，主要用于生产电能的发电厂。在火电厂、水电厂和核电厂中，水轮机、汽轮机带动发电机，把燃料烧的热能、水流的机械能或原子核裂变的原子能都转变为电能。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，应采用高压输电，输电电压为 110kV、220kV、330kV、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，由于各种用电设备如电动机、电炉、电灯等需要不同的低电压，例如 6kV、1kV、380V、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。在电能的生产、输送、分配、消费中的发电机、变压器、电力线路、负载等联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的发电机，每个发电机都向系统提供电能；电力系统中接有大量的、各式各样的负载，每个负载都从系统中取用电能。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设备。

电动机将电能转换为机械能，用来驱动各种用途的生产机械。机械制造业、冶金工业、煤炭工业、石油工业、轻纺工业、化学工业及其他各工矿企业中，广泛地应用各种电动机。例如用电动机拖动各种机床、轧钢机、电铲、卷扬机、纺织机、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、饲料粉碎机等都由电动机拖动。

在国防、文教、医疗及日常生活中，也广泛应用各种小功率电机和微型电机。随着国民经济的发展，工业生产自动化水平不断提高，各种高科技领域如计算机、通信、人造卫星等行业也广泛地应用各种控制电机。

近 30 年来，由于大功率电力电子器件以及微电子技术、微型计算机技术的一系列进展促进了交流调速技术的发展，已经生产出多种电机交流调速系统，不

仅提高了生产机械的性能，而且节省了大量电能。

随着现代社会的发展，电力和电机工业在国民经济中仍将起着重要作用，并将得到更大的发展。

0-2 电机的分类

电机在各个领域内都得到广泛的应用，种类繁多，性能各异，分类方法也很多。主要有两种常用的分类方法。

从能量传递、转换的功能及用途来分，电机有下列几类：

- (1) 变压器 主要是改变交流电的电压，也有改变相数、阻抗及相位的。
- (2) 发电机 把机械能转换为电能。
- (3) 电动机 把电能转换为机械能。
- (4) 控制电机 作为自动控制系统的控制元件。

这一种分类方法中，电动机与发电机的功能不同，用途也不一样，但从运行原理上看，电动机运行和发电机运行不过是电机的两种运行状态，它们之间可逆，而且电机还可以运行于其他的状态。

另一种分类方法是按照电机的结构特点及电源性质分类，电机主要有下列几类：

- (1) 变压器 属于静止的不旋转设备。
- (2) 旋转电机 包括直流电机和交流电机，交流电机中因结构不同又分为同步电机和异步电机。

直流电机——电源为直流电的电机。

交流同步电机——交流电机的一种，运行中转速恒为同步转速。电力系统中的发电机都是同步电机。

交流异步电机——也是一种交流电机，运行中转速不为同步转速。异步电机主要用于电动机。

还有其他分类方法，但不论哪种方法都不是绝对的。

本教材按照变压器、直流电机、同步电机、异步电机的顺序分别进行阐述。从具体电机入手，分析其主要原理，使初学者易于掌握。

0-3 电机学课程性质及学习方法

电机学是电气工程及其自动化等专业的主要技术基础理论课，电机学将系统地阐述变压器、直流电机、同步电机和异步电机的基本电磁关系、分析方法、运行性能、各种运行方式等内容，为进一步学习以上各有关专业的专业课程打下坚实的理论基础。本课程的先修课有高等数学、物理、电路及磁路等。

电机学与物理、电路及磁路等课程的性质有很多不同之处。

(1) 电机学是基础理论课，又带有专业性。电机学具体分析各种类型电机，比较实际，不像电路及磁路课中分析的电阻、电感、电容电路不代表具体的电器设备。

(2) 电机学通过对具体电机的分析阐述基本电磁规律，具有复杂性和综合性的特点。在电机中，各种电、磁、力、热等方面的物理定律同时在一台电机上起作用，相互制约，必须综合考虑。

根据电机学课程的性质，在学习方法上要掌握以下几点：

(1) 理论联系实际。首先学好电机的基本理论，掌握电磁规律，加深对物理概念的理解。对具体电机结构也要有一定了解，否则不可能深入掌握理论。

(2) 重视学习能力的培养。从具体电机入手掌握分析电机理论的工具，学习分析电机理论问题的方法并能灵活应用。重视数学计算，提高定量计算的能力。

(3) 抓主要矛盾，培养工程观点。在分析复杂的实际问题中，常常需要忽略一些次要因素，抓主要矛盾加以解决，这样所得的结果在工程应用上已经足够正确。在某种条件下的次要因素，在另一条件下又可能成为有决定影响的主要因素，要根据研究的问题及条件而变。

(4) 重视试验，培养动手能力。通过电机学实验，打好强电实验的基本功，为专业课程的实验打好基础。

0-4 电机学中常用的电工定律

1. 电路定律

1) 基尔霍夫电流定律

在电路任意一个节点处，电流的代数和恒等于零。

$$\sum i = 0$$

对于正弦交流电路，则有

$$\sum I = 0$$

2) 基尔霍夫电压定律

电路中任一回路内各段电压的代数和恒等于零。

$$\sum u = 0$$

对于正弦交流电路，则有

$$\sum U = 0$$

亦可表达为任一电回路电压降的代数和等于电动势的代数和。