

# 电机学

上册

李发海 陈汤铭 朱东起 编著  
郑逢时 张麟征

科学出版社

## 内 容 简 介

本书是作者在清华大学电机系讲授《电机学》讲义的基础上编写而成的。全书分上、下二册。

下册着重阐明同步电机和异步电机的基本工作原理，其中第三篇介绍了同步电机的绕组、电势、磁势、对称运行、并联运行、不对称运行、突然短路、振荡以及同步电动机和补偿机。第四篇介绍了异步电动机的基本工作原理、机械特性、起动、调速、单相异步电动机、异步电机的其他运行方式、交流换向器式电动机以及交流电机的发热和冷却问题。

本书系按教学要求编写的，可作为工科大学电机系各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。

## 电 机 学

### 下 册

李发海 陈汤铭 朱东起 编著  
郑逢时 张麟征

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1982年12月第一版 开本：787×1092 1/32

1982年12月第一次印刷 印张：21 插页：2

印数：0001—11,650 字数：485,000

统一书号：15031·459

本社书号：2898·15—5

定价：3.30元

TM3  
21  
3:2

B7 22 105  
**电 机 学**

下 册

李发海 陈汤铭 朱东起 编著  
郑逢时 张麟征

科 学 出 版 社

1 9 8 2

館圖北  
藏書京

A942512

## 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、下二册。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。在编写过程中力求作到循序渐进，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

## 内 容 简 介

本书是作者在清华大学电机系讲授《电机学》讲义的基础上编写而成的。全书分上、下二册。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。

上册着重阐明变压器和直流电机的基本工作原理。其中第一篇介绍了变压器的运行原理、三相变压器的对称及不对称运行、三绕组变压器、变压器的并联运行、过渡过程、发热与冷却以及其他用途的变压器。第二篇介绍了直流电机的基本工作原理、特性、换向、特殊用途的直流电机以及整流供电的直流电动机。书末附有若干习题。

本书系按教学要求编写的。可作为工科大学电机系各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。

## 电 机 学

### 上 册

李发海 陈汤铭 朱东起 编著  
郑逢时 张麟征

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1982年8月第一版 开本：787×1092 1/32

1982年8月第一次印刷 印张：15 插页：2

印数：0001—13,400 字数：344,000

统一书号：15031·414

本社书号：2643·15—5

定价：2.35元

# 目 录

## 第一篇 变 压 器

第一章 变压器的用途、分类与结构.....	1
§ 1-1 变压器的用途与分类 .....	1
§ 1-2 变压器的主要结构部件 .....	4
§ 1-3 变压器的额定数据.....	14
第二章 变压器的运行分析 .....	17
§ 2-1 概述 .....	17
§ 2-2 变压器的无载运行 .....	18
§ 2-3 变压器的负载运行 .....	32
§ 2-4 标么值 .....	47
§ 2-5 变压器参数的计算和测定 .....	51
§ 2-6 变压器的运行性能 .....	64
第三章 三相变压器的磁路、绕组联接组及不对称运行... 70	70
§ 3-1 概述 .....	70
§ 3-2 三相变压器的磁路系统 .....	70
§ 3-3 绕组的标志方式 .....	72
§ 3-4 三相变压器的绕组联接 .....	75
§ 3-5 三相变压器无载运行时的电势波形 .....	87
§ 3-6 三相变压器不对称运行问题 .....	93
§ 3-7 V/V 联接变压器 .....	109
第四章 三绕组变压器和自耦变压器 .....	112
§ 4-1 概述 .....	112
§ 4-2 三绕组变压器 .....	113
§ 4-3 自耦变压器 .....	120

第五章 变压器的并联运行 .....	131
§ 5-1 概述 .....	131
§ 5-2 变压器变比不等时的并联运行 .....	133
§ 5-3 变压器的联接组别对并联运行的影响 .....	137
§ 5-4 并联运行时的负载分配 .....	138
第六章 变压器的过渡过程 .....	144
§ 6-1 概述 .....	144
§ 6-2 过电流现象 .....	144
§ 6-3 过电压现象 .....	157
第七章 其他用途的变压器 .....	171
§ 7-1 概述 .....	171
§ 7-2 调压变压器 .....	171
§ 7-3 焊接变压器 .....	177
§ 7-4 整流变压器 .....	179
§ 7-5 电炉变压器 .....	191
§ 7-6 量测用的互感器 .....	195
第八章 变压器的发热与冷却 .....	202
§ 8-1 概述 .....	202
§ 8-2 油浸变压器的发热与冷却 .....	203
§ 8-3 变压器的各种冷却方式 .....	212
§ 8-4 变压器的使用年限 .....	215

## 第二篇 直流电机

第九章 直流电机的用途、基本工作原理与结构 .....	219
§ 9-1 直流电机及其用途 .....	219
§ 9-2 直流电机的基本工作原理 .....	220
§ 9-3 直流电机的主要结构 .....	226
§ 9-4 国产直流电机系列及型号 .....	237
第十章 直流电机无载时的磁场 .....	238
§ 10-1 概述 .....	238

§ 10-2	气隙磁场及所消耗的磁势 .....	242
§ 10-3	齿层的磁场和所消耗的磁势 .....	247
§ 10-4	转子磁轭、磁极极身、定子磁轭的磁场和所消耗的 磁势 .....	248
§ 10-5	励磁磁势和无载磁化特性曲线 .....	250
第十一章	直流电机的电枢绕组 .....	253
§ 11-1	概述 .....	253
§ 11-2	环形电枢绕组转化为鼓形电枢绕组 .....	254
§ 11-3	单叠绕组 .....	257
§ 11-4	单波绕组 .....	264
§ 11-5	直流电机电枢绕组的感应电势 .....	268
§ 11-6	直流电机电枢绕组的电磁转矩 .....	274
第十二章	直流电机的电枢反应 .....	278
§ 12-1	概述 .....	278
§ 12-2	电枢磁势 .....	278
§ 12-3	直流电机的横轴电枢反应 .....	285
§ 12-4	直流电机的纵轴电枢反应 .....	292
§ 12-5	补偿磁势 $F_{ak}$ 的计算 .....	297
§ 12-6	用试验法调整电刷的位置——感应法 .....	298
第十三章	直流发电机 .....	300
§ 13-1	概述 .....	300
§ 13-2	直流发电机的运行原理 .....	301
§ 13-3	直流发电机的运行特性 .....	306
第十四章	直流电动机 .....	324
§ 14-1	概述 .....	324
§ 14-2	直流电动机的基本运行原理 .....	324
§ 14-3	直流电动机的工作特性和机械特性 .....	329
§ 14-4	直流电动机的起动 .....	341
§ 14-5	直流电动机的调速 .....	347
§ 14-6	直流电动机的电磁制动 .....	354



第十五章 直流电机的换向 .....	362
§ 15-1 概述 .....	362
§ 15-2 古典换向理论 .....	365
§ 15-3 换向元件中的感应电势 $\Sigma e$ .....	371
§ 15-4 换向时产生火花的原因 .....	376
§ 15-5 改善换向的措施 .....	380
§ 15-6 调整换向的方法——无火花区试验 .....	391
§ 15-7 直流电机的环火 .....	394
第十六章 特殊直流电机 .....	402
§ 16-1 概述 .....	402
§ 16-2 单极直流电机 .....	402
§ 16-3 电机(功率)放大机 .....	408
§ 16-4 永磁直流电机 .....	414
第十七章 整流供电的直流电动机 .....	423
§ 17-1 概述 .....	423
§ 17-2 整流供电时直流电动机的电压及电流波形 .....	424
§ 17-3 整流供电对直流电动机的影响 .....	433
§ 17-4 整流供电对换向的影响 .....	435
参考文献 .....	451
附录 习题 .....	452
第二章习题 .....	452
第三章习题 .....	455
第四章习题 .....	458
第五章习题 .....	460
第十章习题 .....	461
第十一章习题 .....	462
第十二章习题 .....	463
第十三章习题 .....	464
第十四章习题 .....	468

# 目 录

## 第三篇 同步电机

第十八章	同步电机的结构与基本工作原理	475
§ 18-1	基本工作原理	475
§ 18-2	同步电机的基本类型与结构	477
第十九章	交流电机的绕组和电势	486
§ 19-1	同步电机的磁路	486
§ 19-2	对电枢绕组的要求	492
§ 19-3	三相单层集中整距绕组	493
§ 19-4	三相单层分布绕组	508
§ 19-5	三相双层分布短距绕组	521
§ 19-6	单双层绕组	534
§ 19-7	齿谐波电势及其减小方法	536
§ 19-8	分数槽绕组	541
第二十章	电枢绕组的磁势	550
§ 20-1	概述	550
§ 20-2	单相整距集中单层绕组的磁势	550
§ 20-3	三相绕组的磁势	567
§ 20-4	绕组的短距和分布对磁势的影响	583
§ 20-5	三相绕组的磁势图	593
§ 20-6	正弦绕组	595
§ 20-7	分数槽三相绕组磁势	600
§ 20-8	漏磁通和漏电抗	604
第二十一章	同步电机的基本电磁关系	613
§ 21-1	同步发电机的无载特性及负载电流对端电压的影响	613

§ 21-2	隐极同步发电机的负载运行——磁势电势向量图 …	615
§ 21-3	隐极同步发电机的负载运行——电势向量图 ……	638
§ 21-4	凸极同步发电机的负载运行——双反应理论 ……	648
§ 21-5	瑞典电工学会向量图法 ……	664
§ 21-6	同步发电机的无载特性曲线、短路特性曲线和同步电抗的测定 ……	667
§ 21-7	同步发电机的零功率因数负载特性曲线及普梯尔电抗的测定 ……	678
§ 21-8	取出转子法 ……	683
§ 21-9	对同步电机电枢电阻的讨论 ……	684
§ 21-10	标么值 ……	685
<b>第二十二章 同步发电机的并联运行</b> ……		<b>690</b>
§ 22-1	并联运行的优点 ……	690
§ 22-2	并联合闸的条件与方法 ……	692
§ 22-3	同步发电机并联运行的理论基础 ……	700
§ 22-4	同步发电机的功角特性和静态稳定 ……	710
§ 22-5	并联运行时无功功率的调节——U形曲线 ……	724
<b>第二十三章 同步电动机</b> ……		<b>729</b>
§ 23-1	概述 ……	729
§ 23-2	同步电动机的运行原理 ……	730
§ 23-3	同步电动机的起动 ……	742
§ 23-4	反应式同步电动机 ……	744
§ 23-5	同步调相机 ……	746
§ 23-6	异步电动机的同步化 ……	749
<b>第二十四章 同步电机的振荡</b> ……		<b>756</b>
§ 24-1	同步电机自由振荡和强制振荡的物理现象 ……	756
§ 24-2	同步发电机在振荡时的转矩平衡方程式 ……	758
§ 24-3	同步发电机单独运行时的强制振荡 ……	769
§ 24-4	同步发电机并联运行与单独运行时振荡的比较 ……	771
<b>第二十五章 同步电机的非正常运行</b> ……		<b>775</b>

§ 25-1	同步电机非正常运行的发生 .....	775
§ 25-2	同步发电机的单相负载运行 .....	776
§ 25-3	负序阻抗和零序阻抗 .....	786
§ 25-4	不对称运行与电机的关系 .....	791
§ 25-5	分析同步发电机突然短路的工具——超导体回路磁链守恒概念 .....	794
§ 25-6	同步发电机无载时三相突然短路的分析 .....	797
§ 25-7	同步发电机负载时三相突然短路的分析 .....	817
§ 25-8	不对称突然短路 .....	821
§ 25-9	突然短路与同步电机及电力系统的关系 .....	825

## 第四篇 异步电机

第二十六章	三相异步电动机的结构和基本工作原理 .....	831
§ 26-1	异步电机的用途 .....	831
§ 26-2	异步电机的基本类型和主要结构部件 .....	832
§ 26-3	国产三相异步电动机系列及型号 .....	837
§ 26-4	异步电机的基本工作原理 .....	838
第二十七章	三相异步电动机的运行原理 .....	842
§ 27-1	异步电动机在转子不转时 ( $n=0, s=1$ ) 的状况 .....	843
§ 27-2	异步电机在旋转时的电磁关系 .....	862
§ 27-3	鼠笼转子的极数、相数和参数的折合 .....	873
第二十八章	异步电动机的功率、转矩和运行性能 .....	885
§ 28-1	异步电动机的功率传递、各部分损耗和转矩 .....	885
§ 28-2	异步电动机的机械特性 .....	892
§ 28-3	转矩的实用公式 .....	899
§ 28-4	三相异步电动机的运行性能 .....	901
§ 28-5	异步电机的圆图 .....	906
§ 28-6	异步电机的准确圆图 .....	920
第二十九章	三相异步电动机的起动 .....	927
§ 29-1	概述 .....	927

§ 29-2	鼠笼式电动机的起动 .....	929
§ 29-3	绕线式异步电动机的起动 .....	939
§ 29-4	具有较高最初起动转矩的鼠笼式电动机 .....	942
§ 29-5	异步电机的附加转矩以及对起动的影响 .....	951
第三十章	三相异步电动机的调速 .....	957
§ 30-1	概述 .....	957
§ 30-2	转子回路串联电阻调速 .....	957
§ 30-3	串级调速 .....	959
§ 30-4	电磁调速异步电动机(电磁滑差离合器调速) .....	961
§ 30-5	改变定子端电压调速 .....	963
§ 30-6	变频调速 .....	964
§ 30-7	变极调速 .....	967
第三十一章	异步电机的其他运行方式 .....	993
§ 31-1	概述 .....	993
§ 31-2	异步发电机 .....	993
§ 31-3	异步电机的制动运行 .....	1008
§ 31-4	移相器 .....	1012
§ 31-5	感应调压器 .....	1014
§ 31-6	三相异步电机转子电路里具有不对称阻抗的分析 .....	1017
§ 31-7	三相异步电机转子为单相,但所加电源电压是对称的 .....	1028
第三十二章	单相异步电动机 .....	1033
§ 32-1	概述 .....	1033
§ 32-2	单相异步电动机的工作原理 .....	1033
§ 32-3	单相电容电动机 .....	1042
§ 32-4	遮极式电动机 .....	1058
第三十三章	交流换向器式电机 .....	1069
§ 33-1	概述 .....	1069
§ 33-2	异步电动机副边回路串入附加电势时的转速调节 .....	1069
§ 33-3	三相并联换向器电动机 .....	1074

§ 33-4 单相串励换向器电动机 .....	1086
第三十四章 交流电机的损耗、效率、发热和冷却 .....	1092
§ 34-1 概述 .....	1092
§ 34-2 交流电机的损耗和效率 .....	1093
§ 34-3 大型同步电机的发热与冷却 .....	1101
§ 34-4 大型汽轮发电机的冷却方式 .....	1104
参考文献 .....	1113
附录习题 .....	1114

# 第一篇 变 压 器

---

## 第一章 变压器的用途、分类与结构

### § 1-1 变压器的用途与分类

#### 一、变压器的用途

为了把发电厂发出的电能,比较经济地传输,合理地分配以及安全地使用,都要用到电力变压器. 电力变压器是一个静止的电器,它是由绕在同一个铁心上的两个或两个以上的线圈,通过交变的磁通相互联系着. 它的功能是把一种等级的电压与电流变成为同频率的另一种等级的电压与电流.

图 1-1 是一个简单的输配电系统图. 由于发电机发出的电压不可能太高,一般只有 10.5—20 千伏,要想把发出的大功率的电能直接送到很远的用电区去,几乎是不可能的. 这是因为,低电压大电流输电,除了在输电线路产生很大的损耗外,线路上产生的压降也足以使电能送不出去. 为此,需要用升压变压器把发电机的端电压升高到较高的输电电压. 当输电的功率一定时,电流就减小了,这样就能比较经济地把电能送出去. 一般说来,当输电距离越远、输送的功率越大时,要求的输电电压也越高. 例如,输电距离为 200—400 公里,输送容量为 20—30 万千瓦的输电线,输电电压一般需要 220 千伏;输电距离在 1000 公里以上,则要求有更高的输电电压.

当电能送到用电地区后,还要用降压变压器把输电电压降低为配电电压,然后再送到各用电分区,最后再经配电变压

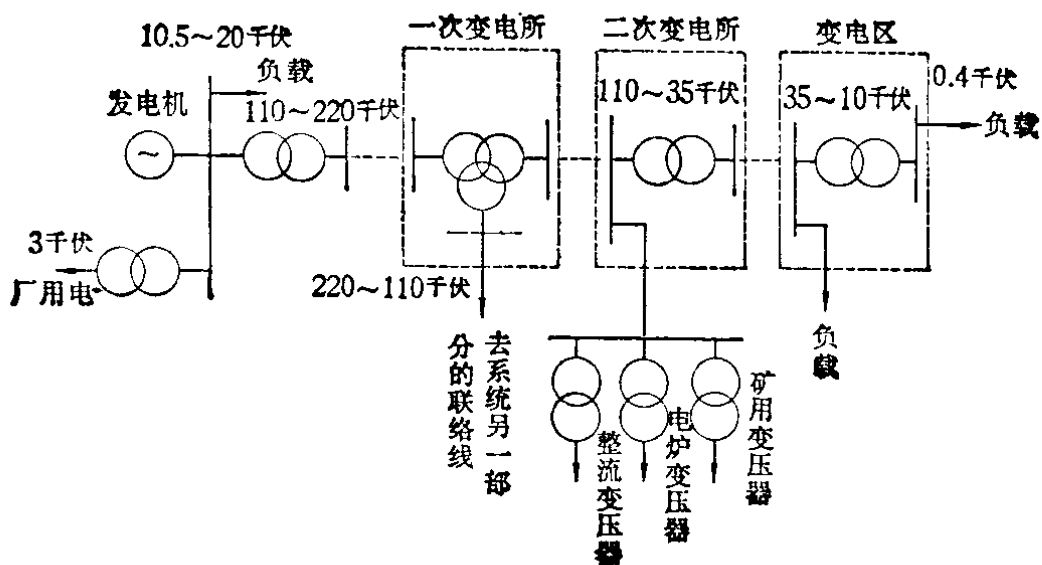


图 1-1 简单的电力系统图

器把电压降到用户所需要的电压等级，供用户使用。用户使用的电压，对大型动力设备，采用 6 千伏或 10 千伏；对小型动力设备和照明用电则为 380/220 伏。

为了把两个不同电压等级的电力系统彼此联系起来，常常用到三绕组变压器，如图 1-1 中的联络变压器。此外，还有各种专门用途的变压器，如整流变压器、电炉变压器等。

由此可见，变压器的用途是十分广泛的，其品种、规格也很多。通常，变压器的安装容量大约是发电机安装容量的 6—8 倍。所以变压器的生产和使用有重要的意义。

## 二、变压器的分类

变压器的种类很多，一般分为电力变压器和特种变压器两大类。电力变压器是电力系统中输配电的主要设备。容量从几十千伏安到几十万千伏安；电压等级从几百伏到 500 千伏以上。

电力变压器按它的用途分类有：

1. 升压变压器；



2. 降压变压器；
3. 配电变压器；
4. 联络变压器(联接几个不同电压等级的电力系统)；
5. 厂用电变压器(供发电厂本身用电)。

按变压器的结构,可以分为:

1. 双绕组变压器；
2. 三绕组变压器；
3. 多绕组变压器；
4. 自耦变压器。

电力系统中用的最多的是双绕组变压器, 其次是三绕组变压器和自耦变压器, 至于多绕组变压器, 一般用作为特种用途的变压器。

如果按相数来分, 有:

1. 单相变压器；
2. 三相变压器；
3. 多相变压器。

根据变压器冷却条件来分, 有:

1. 油浸自冷变压器；
2. 干式空气自冷变压器(这种变压器不需要变压器油, 铁心和线圈都由空气直接冷却)；
3. 干式浇铸绝缘变压器；
4. 油浸风冷变压器；
5. 油浸水冷变压器；
6. 强迫油循环风冷变压器；
7. 强迫油循环水冷变压器。

按线圈使用的金属材料来分, 有:

1. 铜线变压器；
2. 铝线变压器。