

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

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

1 9 8 7

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

北京朝阳区门内大街137号

中国科学院开封印刷厂印刷

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

1987年12月第三次印刷 印张：15 插页 2

印数：23,801—26,850 字数：341,000

统一书号：15031·414

本社书号：2643·15-5

定价：3.55 元

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

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
§ 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_{cA} 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 Σe	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)放大器	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

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,除了在输电线路上产生很大的损耗外,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

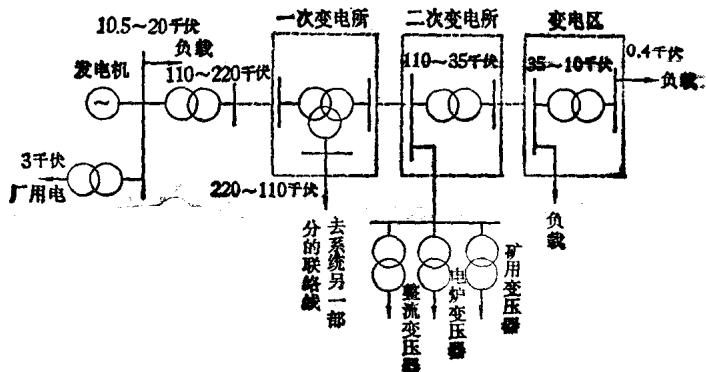


图 1-1 简单的电力系统图

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。

按调压方式来分,有:

1. 无励磁调压变压器;
2. 有载调压变压器.

关于特殊用途的变压器,是根据冶金、矿山、化工、交通部门的具体要求设计制造的专用变压器。大致有以下几种:

1. 整流变压器,用于把交流电能变换为直流电能的场合;
2. 电炉变压器,用于把电能转换为热能的场合;
3. 供高压试验用的试验变压器;
4. 供矿井下配电用的矿用变压器;
5. 供船舶用的船用变压器;
6. 中频变压器(供 1000—8000 赫兹交流系统用);
7. 大电流变压器.

随着我国国民经济的发展和电力系统中发电机容量与输电电压的不断提高,要求生产更大容量、更高电压的电力变压器。同时,为了加强电力系统的集中控制,改善供电质量,应该生产有载调压和有自动调压装置的电力变压器。

§ 1-2 变压器的主要结构部件

图 1-2 画出了一台双绕组变压器的示意图。它是把两

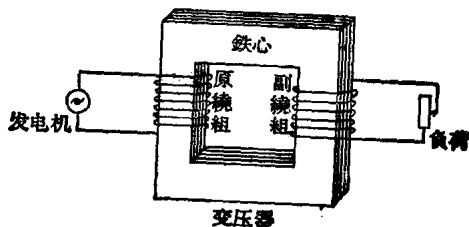


图 1-2 双绕组变压器

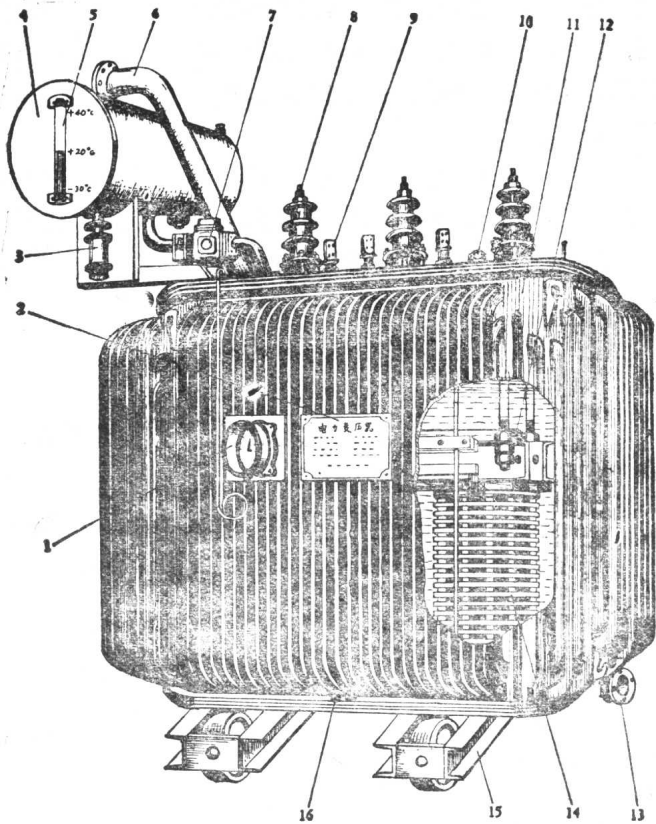


图 1-3 油浸式电力变压器

- 1——讯号式温度计；2——铭牌；3——吸湿器；4——储油柜；
 5——油表；6——安全气道；7——气体继电器；8——高压套管；
 9——低压套管；10——分接开关；11——油箱；12——铁心；
 13——放油阀门；14——线圈及绝缘；15——小车；
 16——接地板

个线圈套在同一个铁心上构成的，这两个线圈都叫做绕组。一般我们把接到交流电源的绕组叫原绕组；把接到负荷(也叫负载)的绕组叫副绕组。有时把原绕组叫做原边或初级；把副

绕组叫做副边或次级。变压器副绕组的电压不等于原绕组的电压。如果副边电压大于原边电压时,叫做升压变压器;否则就是降压变压器。电压高的绕组,也叫高压绕组;电压低的,叫低压绕组。

变压器的铁心和绕组是变压器的主要部分,统称为变压器器身。如果是油浸变压器,应把器身放在灌满变压器油的油箱内。目前,油浸式变压器是生产量最大、应用最广的一种变压器。它的外形结构如图 1-3 所示。

油浸式电力变压器的结构可分为:

1. 器身

包括铁心、线圈、绝缘结构、引线和分接开关等。

2. 油箱

包括油箱本体(箱盖、箱壁和箱底)和一些附件(放油阀门、小车、油样油门、接地螺栓、铭牌等)。

3. 冷却装置

包括散热器或冷却器。

4. 保护装置

包括储油柜、油表、安全气道、吸湿器、测温元件、净油器和气体继电器等。

5. 出线装置

包括高压套管、低压套管等。

简单叙述如下:

一、铁心

铁心是变压器导磁的主磁路,又是器身的机械骨架,它由铁柱、铁轭和夹紧装置组成。根据铁心的结构,变压器可分为心式和壳式两大类型。图 1-4 是心式变压器,绕组套在铁柱上,其中图(a)是单相心式变压器,铁柱上的绕组可以串联,

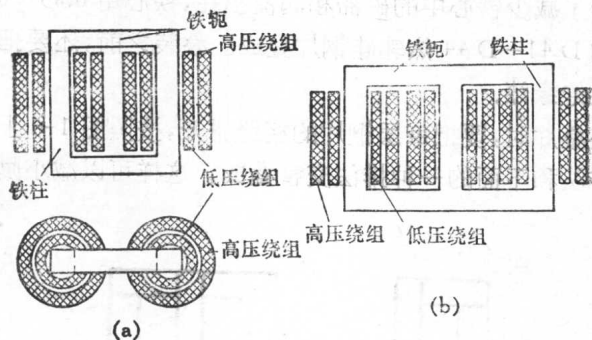
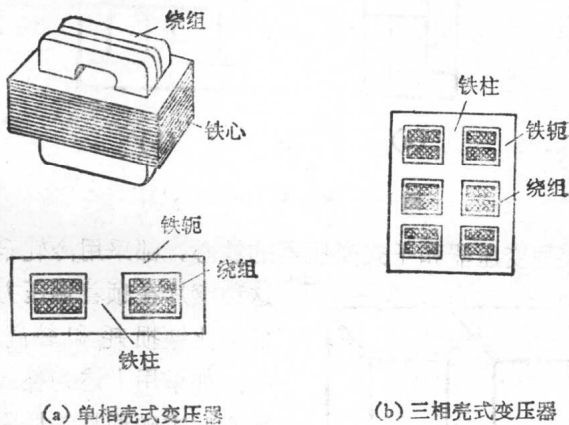


图 1-4 心式变压器



(a) 单相壳式变压器

(b) 三相壳式变压器

图 1-5 壳式变压器

也可以并联；图 (b) 是三相心式变压器，每一铁柱上的绕组，构成一个相。图 1-5 是壳式变压器，它具有分支的磁路系统，围绕在绕组的两面，好像是绕组的一个外壳，因此，它的机械强度高，但制造复杂，用料多。心式变压器结构简单，绕组的装配、绝缘都比较容易，国产电力变压器几乎都采用心式铁心结构。

为了减少铁心中的磁滞和涡流损耗,铁心用 0.35—0.5 毫米厚的 D 41—D 44 热轧硅钢片叠成。叠装之前,还要把硅钢片涂上绝缘漆。

在叠片时,要把每层钢片的接缝错开,按照图 1-6 上面的一种排法和下面的一种排法交替叠成,这样可以减小励磁电流。

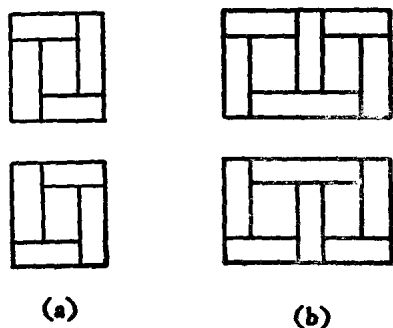


图 1-6 铁心各层硅钢片叠装法

大型变压器和干式变压器的铁心,都采用冷轧硅钢片。

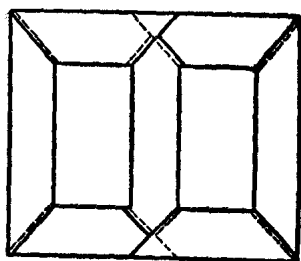


图 1-7 用冷轧硅钢片时的叠装法

这种钢片在顺着辗压方向有较低的比铁损耗和较高的导磁率。如果用上述的叠装方法叠铁心,主磁通从铁柱到铁轭的拐弯处会引起附加损耗。为此采用图 1-7 所示的斜切钢片叠装法。

铁柱的截面,在小型变压器里是方形或长方形的,如图 1-8 (a) 所示;在大型变压器里,为了充分利用线圈内的空间,铁柱的截面做成阶梯形的,如图 1-8 (b) 所示。当铁柱直径为 380 毫米及以上时,还要在铁心

中间留出油道。

除了上述的叠片方式外，目前国内还有生产渐开线型的铁心。这种结构，是把一定尺寸的硅钢片卷成渐开线形状，然后叠成圆柱形构成铁柱，如图 1-9(b) 所示；再用宽度等于轭高的带钢卷成三角形状，作为铁轭，如图 1-9(a) 所示。把三个铁柱对称地放在铁轭上，用穿心螺栓紧固，就得到对称的三相磁路系统，铁轭截面只有铁柱的 $1/\sqrt{3}$ 。这种结构的优点、

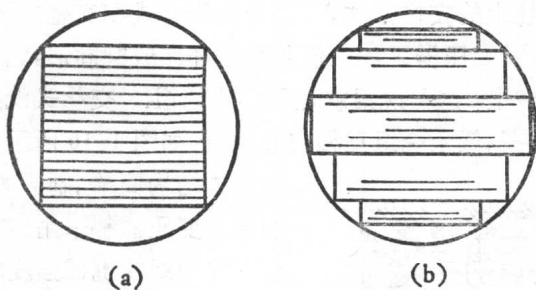


图 1-8 铁心柱截面

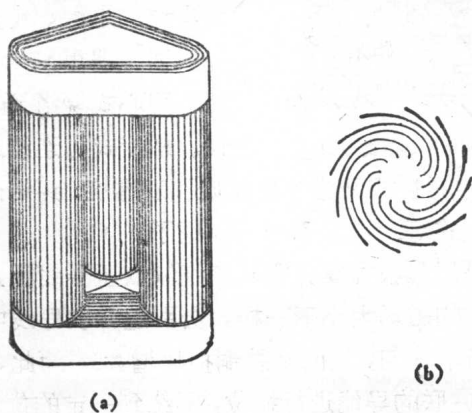


图 1-9 渐开线铁心