

电 机 学

(第二版)

李发海 陈汤铭 郑逢时 张麟征 朱东起 编著

科学出版社

电 机 学

(第 二 版)

李发海 陈汤铭 朱东起 编著
郑逢时 张麟征

科 学 出 版 社

1 9 9 1

内 容 简 介

本书第一版于1982年出版,1987年获机械委颁发的全国高等学校机电类、兵工类优秀教材奖。本书是在第一版的基础上按照新的教学大纲的要求经全面修订改写而成的。

第二版保留了第一版的体系,仍分为变压器、直流电机、同步电机、异步电机四篇,但篇幅从三十四章压缩为二十九章,并将书末附录中的习题增补为思考题和习题插在每章后边。书中着重讲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,使读者通过本书的学习,掌握电机的基本理论和基本分析方法,提高解决各种电机实际问题的能力。

本书可作为普通高等学校和成人高等学校电机系各专业电机学课程的教材或参考书,也可供从事电机设计和运行的科技人员学习、参考。

电 机 学

(第二版)

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

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

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 1/16

1991年8月第二版 印张:34 3/4

1991年8月第四次印刷 字数:805 000

印数:26 851—30 850

ISBN 7-03-002288-2/TM·27

定价:18.00元

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,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,均已售缺。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,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。原书经全面修订改写后,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,本书难免还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

前言	i
第一版 前言	ii

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	3
§1-3 变压器的发热与温升	8
§1-4 变压器的额定数据	9
思考题	11
习题	11
第二章 变压器的运行分析	12
§2-1 概述	12
§2-2 变压器的无载运行	12
§2-3 变压器的负载运行	21
§2-4 标么值	29
§2-5 变压器参数的测定	32
§2-6 变压器的运行性能	36
思考题	39
习题	41
第三章 三相变压器的磁路、绕组联接组及不对称运行	45
§3-1 概述	45
§3-2 三相变压器的磁路系统	45
§3-3 绕组的标志方式	46
§3-4 三相变压器的绕组接法和联接组别	48
§3-5 三相变压器无载运行时的电势波形	54
§3-6 三相变压器不对称运行问题	57
思考题	66
习题	68
第四章 变压器的并联运行	70
§4-1 概述	70
§4-2 变压器变比不等时的并联运行	71
§4-3 变压器的联接组别对并联运行的影响	73
§4-4 并联运行时的负载分配	74

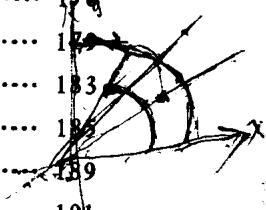
思考题	76
习题	77
第五章 变压器的过渡过程	78
§5-1 概述	78
§5-2 过电流现象	78
§5-3 过电压现象	85
思考题	85
习题	86
第六章 其他类型的变压器	87
§6-1 概述	87
§6-2 三绕组变压器	87
§6-3 自耦变压器	91
§6-4 整流变压器	97
§6-5 量测用的互感器	101
思考题	104
习题	105

第二篇 直流电机

第七章 直流电机的用途、基本工作原理与结构	107
§7-1 直流电机及其用途	107
§7-2 直流电机的基本工作原理	107
§7-3 直流电机的主要结构	111
§7-4 国产直流电机系列及型号	116
思考题	117
习题	117
第八章 直流电机的励磁磁场	118
§8-1 概述	118
§8-2 各段磁路的磁场及所消耗的磁势	119
§8-3 励磁磁势和磁化特性曲线	120
思考题	121
习题	122
第九章 直流电机的电枢绕组	123
§9-1 概述	123
§9-2 电枢绕组结构示意	123
§9-3 单叠绕组	123
§9-4 单波绕组	128
§9-5 直流机电枢绕组的感应电势	131
§9-6 直流机电枢绕组的电磁转矩	134
思考题	136

习题	136
第十章 直流发电机	138
§10-1 概述	138
§10-2 直流发电机的运行原理	139
§10-3 直流发电机的电枢反应	141
§10-4 直流发电机的运行特性	145
思考题	155
习题	155
第十一章 直流电动机	157
§11-1 概述	157
§11-2 直流电动机的运行原理	157
§11-3 直流电动机的工作特性和机械特性	159
§11-4 直流电动机的起动	164
§11-5 直流电动机的调速	166
§11-6 直流电动机的电磁制动	170
思考题	174
习题	174
第十二章 直流电机的换向	178
§12-1 概述	178
§12-2 换向元件电流分析	178
§12-3 换向时产生火花的原因	183
§12-4 改善换向的措施	183
§12-5 调整换向的方法——无火花区试验	189
§12-6 直流电机的环火	191
思考题	193
习题	194
第十三章 特殊直流电机	195
§13-1 概述	195
§13-2 单极直流电机	195
§13-3 交磁电机放大机	196
§13-4 永磁直流电机	198
思考题	203
习题	203
第十四章 整流供电的直流电动机	204
§14-1 概述	204
§14-2 整流供电时直流电动机的电压及电流波形	204
§14-3 整流供电对直流电动机的影响	208
§14-4 整流供电对换向的影响	209
思考题	210

15
9
20
40
70
31
U₂
达朗贝尔



习题	211
----	-----

第三篇 同步电机

第十五章 同步电机的结构与基本工作原理	212
§15-1 基本工作原理	212
§15-2 同步电机的基本类型与结构	213
思考题	218
习题	218
第十六章 交流电机的绕组和电势	219
§16-1 同步电机的磁路	219
§16-2 对电枢绕组的要求	222
§16-3 三相单层集中整距绕组	223
§16-4 三相单层分布绕组	230
§16-5 三相双层分布短距绕组	238
§16-6 齿谐波电势及其减小方法	245
§16-7 分数槽绕组	249
思考题	253
习题	254
第十七章 电枢绕组的磁势	257
§17-1 概述	257
§17-2 单相整距集中单层绕组的磁势	257
§17-3 三相绕组的磁势	267
§17-4 绕组的短距和分布对磁势的影响	276
§17-5 三相绕组的磁势图	281
§17-6 分数槽三相绕组磁势	283
思考题	285
习题	285
第十八章 同步电机的基本电磁关系	287
§18-1 同步发电机的无载运行	287
§18-2 对称负载时的电枢反应	293
§18-3 隐极同步发电机的负载运行——磁势电势向量图	297
§18-4 隐极同步发电机的负载运行——电势向量图	306
§18-5 凸极同步发电机的负载运行——双反应理论、电势向量图	312
§18-6 电压变化率及负载下励磁磁势的求法	319
§18-7 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	322
§18-8 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	328
§18-9 取出转子法	331
思考题	332
习题	332

第十九章 同步发电机的并联运行	339
§19-1 并联运行的优点	339
§19-2 并联合闸的条件与方法	340
§19-3 同步发电机并联运行的理论基础	344
§19-4 同步发电机的功角特性和静态稳定	350
§19-5 并联运行时无功功率的调节——U形曲线	358
思考题.....	361
习题.....	361
第二十章 同步电动机	365
§20-1 概述	365
§20-2 同步电动机的运行原理	365
§20-3 同步电动机的自起动	372
§20-4 反应式同步电动机	374
§20-5 同步调相机	375
思考题.....	378
习题.....	378
第二十一章 同步电机的振荡	381
§21-1 振荡的物理现象	381
§21-2 同步电机在振荡过程中转矩平衡方程式	383
§21-3 同步电机的自由振荡和强制振荡	385
思考题.....	386
习题.....	386
第二十二章 同步电机的非正常运行	387
§22-1 同步电机非正常运行的发生	387
§22-2 同步发电机的单相负载运行	387
§22-3 负序阻抗和零序阻抗	393
§22-4 不对称运行与电机的关系	396
§22-5 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	397
§22-6 同步发电机无载时三相突然短路的分析	399
§22-7 突然短路与同步电机及电力系统的关系	410
思考题.....	413
习题.....	414

第四篇 异步电机

第二十三章 三相异步电动机的结构和基本工作原理	415
§23-1 异步电动机的用途	415
§23-2 异步电机的基本类型和主要结构部件	415
§23-3 异步电机的基本工作原理	421
思考题.....	423

习题	423
第二十四章 三相异步电动机的运行原理	424
§24-1 异步电动机在转子不转时 ($n = 0, s = 1$) 的状况	425
§24-2 异步电机在旋转时的电磁关系	437
§24-3 鼠笼转子的极数、相数和参数的折合	445
思考题	452
习题	453
第二十五章 异步电动机的功率、转矩和运行性能	457
§25-1 异步电动机的功率传递、各部分损耗和转矩	457
§25-2 异步电动机的机械特性	461
§25-3 三相异步电动机的运行性能	471
§25-4 三相异步电动机的参数测定	474
§25-5 异步电机的圆图	476
思考题	484
习题	485
第二十六章 三相异步电动机的起动	487
§26-1 概述	487
§26-2 鼠笼式电动机的起动	489
§26-3 绕线式异步电动机的起动	496
§26-4 具有较高最初起动转矩的鼠笼式电动机	498
§26-5 异步电机的附加转矩以及对起动的的影响	503
思考题	505
习题	506
第二十七章 三相异步电动机的调速	507
§27-1 改变定子绕组电压调速	507
§27-2 转子回路串联电阻调速	508
§27-3 串级调速	509
§27-4 变极调速	510
§27-5 变频调速	514
§27-6 电磁调速异步电动机(电磁滑差离合器调速)	517
思考题	518
习题	518
第二十八章 异步电机的其他运行方式	520
§28-1 异步发电机	520
§28-2 异步电机的制动运行	525
§28-3 移相器	527
§28-4 感应调压器	528
思考题	530
习题	530

第二十九章 交流电机的损耗、效率、发热和冷却	531
§29-1 概述	531
§29-2 交流电机的损耗和效率	531
§29-3 大型同步电机的发热与冷却	536
§29-4 大型汽轮发电机的冷却方式	537
思考题.....	542
习题.....	542
参考文献	543

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

1. 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组成的，线圈之间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。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，最后再经配电变压器把电压降到用户所需要的电压等级，供用户使用。大型动力设备，采用 6 千伏或 10 千伏；小型动力设备和照明用电则为 380/220 伏。

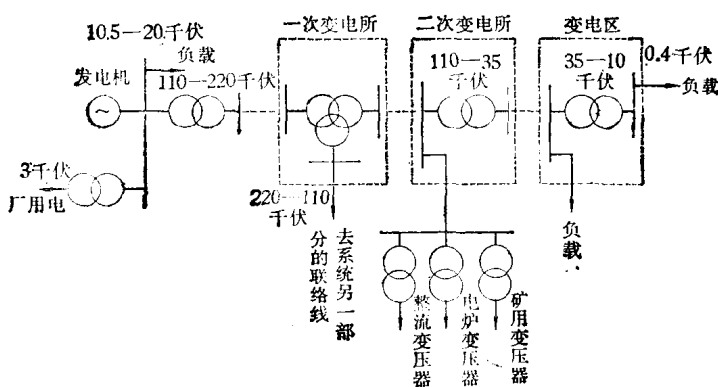


图 1-1 简单的电力系统图

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，变压器的用途十分广泛，其品种、规格也很多。通常，变压器的安装容量约为发电机安装容量的 6—8 倍。所以变压器的生产和使用具有重要意义。

2. 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。

电力系统中用得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。

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 是一台双绕组变压器的示意图。它是把两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。

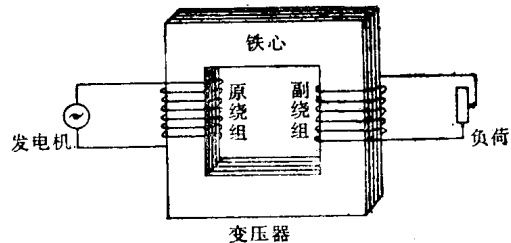


图 1-2 双绕组变压器

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:

1. 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，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 D41—D44 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

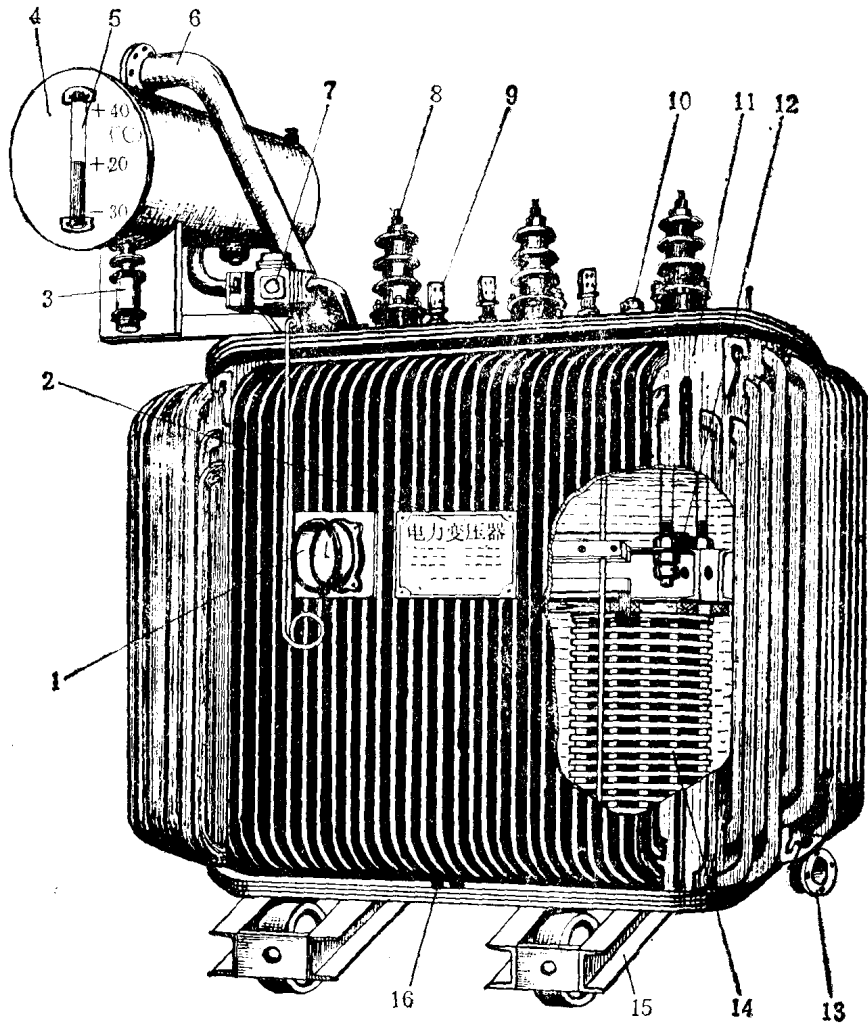


图 1-3 油浸式电力变压器

- 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

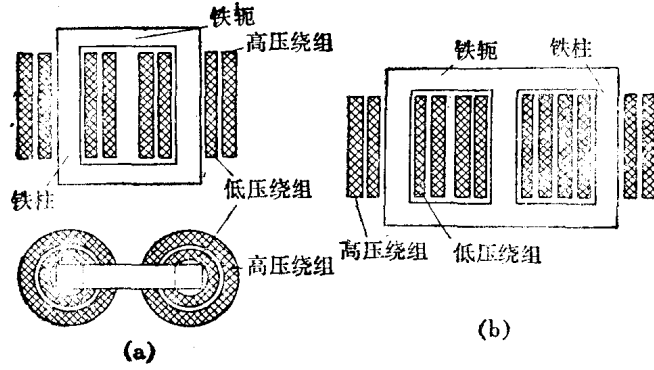


图 1-4 心式变压器

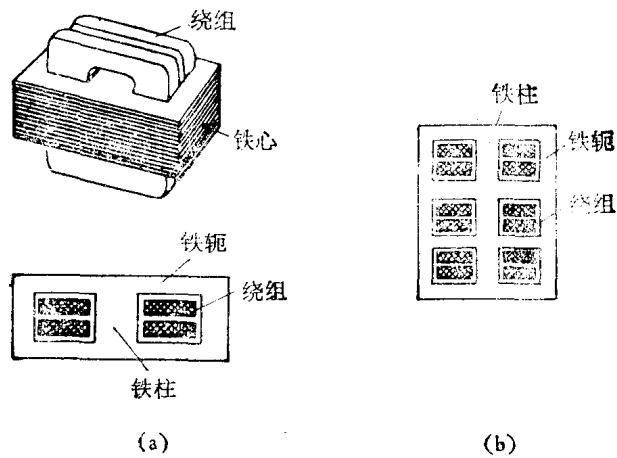


图 1-5 壳式变压器
(a) 单相壳式变压器；(b) 三相壳式变压器

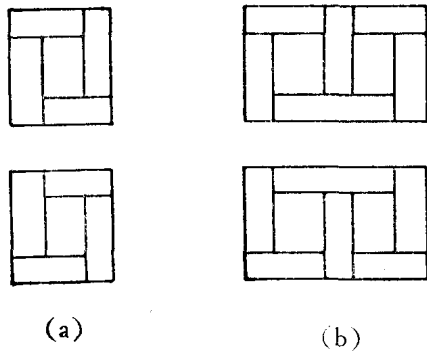


图 1-6 铁心各层硅钢片叠装法

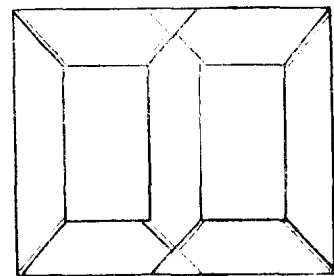


图 1-7 用冷轧硅钢片时的叠装法

交替叠成,这样可以减小励磁电流。

大型变压器和干式变压器的铁心都采用冷轧硅钢片压制而成。

这种硅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。