

运行变压器，损耗有规律
最优能效法，助您高效益

变压器 最优能效技术 与节能管理

牛迎水 编著

BIANYAQI

ZUIYOU NENGXIAO JISHU

YU JIENENG GUANLI



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

变压器 最优能效技术 与节能管理

牛迎水 编著

BIANYAQI

ZUIYOU NENGXIAO JISHU

YU JIENENG GUANLI



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

能效是单位能源带来的效率和效益。对某一稳定的负载区间,选用不同容量的节能变压器,形成不同的负载系数,产生不同的损耗率,但必有一个最小值,称其为变压器最优能效。

本书以变压器最新国家标准和经济运行理论为依据,分析了影响变压器能效的因素,定义了运行变压器的高能效和高能耗标准,创新性提出了变压器最优能效概念和标准,衡量了不同系列、不同性能变压器存在的节能空间,论证了实现最优能效的节能技术,提炼了实施最优能效节能的管理方法,是一部图表并茂的变压器节能专著。

本书既可作为变压器能效管理者的工作手册,也可作为变压器节能专业培训教材,对生产厂商、相关规划设计、运行管理、学术研究等人员均有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

变压器最优能效技术与节能管理/牛迎水编著. —北京:中国电力出版社, 2016. 5

ISBN 978-7-5123-8932-8

I. ①变… II. ①牛… III. ①变压器-节能-技术 IV. ①TM4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 033450 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 5 月第一版 2016 年 5 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 23 印张 417 千字

印数 0001—2500 册 定价 55.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开图层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

能源是国民经济的基础，是经济持续发展和人民生活质量改善的重要保障。二十一世纪以来，能源供需矛盾凸显，环境污染日趋突出。相关资料表明，当今的中国是世界第二大能源消费国，而国家的能源利用效率仅为 33%，比国际先进水平低了近 10%，节能潜力巨大。提高能源效率、“节能优先”是实现能源可持续发展的有效途径，是在今后相当长的时期内都不可以动摇和改变的基本国策，是实现可持续发展的根本措施。

能效，是能源效率的简称，是指能源开发、加工、输送、转换、利用等各个过程的效率。能源效率是单位能源所带来的经济效益多少的问题，效益多说明能源效率高。所谓“高能效”，是指用更少的能源投入提供同等的能源服务。电力节能是国家节能与能效管理的重要方面，是落实国家节能战略的重要环节和有效途径。国家《节约用电管理办法》规定，供用电单位要“加强用电管理，采取技术上可行、经济上合理的节电措施，减少电能的直接和间接损耗，提高能源效率和保护环境”。

电力变压器是国民经济各行各业中广泛使用的电气设备，是供用电设备中重要的耗电元件，使用量大、运行时间长。无论是在变压器的新增选择，还是在变压器的运行过程中均存在很大的节能潜力，尤其是运行在配电网的中小型变压器。降低变压器损耗、提高供配电设备能效是实现电网运行优质高效的基础，不仅是政府和社会关注的问题，而且也是单位自身降本增效的重要环节。在国家层面，依托能效“领跑者”制度，不断更新和提高变压器的技术性能指标标准，明确了节能变压器门槛，强制淘汰高能耗变压器；在单位选择和使用层面，更多的是考虑变压器新增购买时的成本。而事实上，在如今的变压器技术性能条件下，正确、科学地选择和使用大容量变压器，可以深度挖掘变压器潜在的高能效，不仅可以满足用电需要，而且在较短的时期内能够获得丰厚的效益，实现变压器最优能效运行。如何通过理论支持和典型实践将这些技术广泛地宣传与推广，得到广大使用者的认可与信赖，这是本书所研究项目的宗旨所在。

对某一稳定的负载区间，选用不同容量的节能型变压器，形成不同的负载

系数，产生不同的损耗率，但必有一个最小值，称其为变压器最优能效。本书以变压器最新国家标准和经济运行理论为依据，深度分析了影响变压器能效的因素，科学定义了运行变压器的高能效和高能耗标准，创新性提出了变压器最优能效概念和标准，全面衡量了不同系列、不同性能变压器存在的节能空间，翔实论证了实现最优能效的节能技术，汇总提炼了实施最优能效节能的管理方法，是一部图表并茂、深入浅出、通俗易懂的变压器节能专著。用通俗简练的语言来阐述本书内容，就是“话说变压器，品性各相异；负载与效率，运行有规律；同是节能变，能效有高低；‘大马拉小车’，高效又经济；巧用变压器，节能增效益；高能效管理，利国又利己”。

本书是作者基于 30 年来的工作经验积累，参阅了大量的国家标准规范、专著论文，精心编著而成的，非常方便读者在变压器能效管理及节能工作中实时对照查阅，旨在帮助同仁们“治理配变高损耗、推动用电高能效、实现多方效益高”。

由于作者阅历和水平有限，不足和不妥之处在所难免，恳请广大读者和技术同仁批评指正。

作者

目 录

前言

第 1 章

变压器的基础知识

1.1 变压器的分类	1
1.2 变压器的构成	6
1.3 变压器的原理与型号	19
1.4 变压器的铭牌参数	24
1.4.1 额定参数	24
1.4.2 技术参数	26
1.4.3 温升与额定使用条件	28
1.5 变压器绕组的联结方式	29
1.5.1 星形联结 (Y 联结)	29
1.5.2 三角形联结 (D 联结)	29
1.5.3 开口三角形联结	30
1.5.4 曲折形联结 (Z 联结)	30
1.5.5 常见的绕组联结适用范围	30
1.6 变压器的接线组别	31
1.6.1 Yyn0 联结	32
1.6.2 Dyn11 联结	33
1.6.3 Yzn11 联结	34
1.6.4 注意事项	35
1.7 干式变压器	35
1.7.1 干式变压器的型号	36
1.7.2 干式变压器的分类	38
1.7.3 干式变压器的结构特点与运行	39
1.7.4 干式变压器的发展	40

1.8	箱式变电站	41
1.8.1	概述	41
1.8.2	美式箱变	42
1.8.3	欧式箱变	43
1.8.4	国产箱变	45

第2章

变压器的能效理论与规律

2.1	变压器运行能效的理论依据与规律	47
2.1.1	变压器的有功损耗及其运行能效	47
2.1.2	变压器的无功损耗及其对能效的影响	59
2.1.3	变压器的综合功率损耗及其能效特性	68
2.2	变压器的静态能效	73
2.2.1	能效标准的内容	74
2.2.2	变压器的能效标准	75
2.2.3	变压器的静态能效参数对其能效的影响	86
2.3	变压器的动态能效	96
2.3.1	变压器的运行状态	96
2.3.2	变压器的容量与能效	101
2.3.3	变压器的功率因数与能效	118
2.3.4	变压器的负载波动损耗系数与能效	122

第3章

变压器的能效标准与最优能效

3.1	变压器损耗率计算参数的确定	134
3.1.1	以2级能效参数为静态能效标准	134
3.1.2	以功率因数0.95作为动态无功能效标准	135
3.1.3	以负载系数0.75作为高能效负载边界	135
3.1.4	以适中的负荷波动确定负荷波动损耗系数	137
3.2	变压器的能效标准	144
3.2.1	油浸式变压器的能效标准	144
3.2.2	干式变压器的能效标准	148

3.2.3	电力变压器的能效标准	151
3.3	变压器的最优能效标准	156
3.3.1	变压器的最优能效	156
3.3.2	油浸式变压器的最优能效标准	158
3.3.3	干式变压器的最优能效标准	173
3.3.4	电力变压器的最优能效标准	183

第4章

变压器最优能效的节能技术

4.1	油浸式变压器最优能效的节能技术	199
4.1.1	S11 型变压器最优能效的节能技术	199
4.1.2	S9 型变压器最优能效的节能技术	213
4.1.3	S7 型变压器最优能效的节能技术	227
4.1.4	S15 型 1 级能效变压器的最优能效特性	239
4.1.5	SH15 型非晶合金变压器的最优能效特性	247
4.2	干式变压器最优能效的节能技术	255
4.2.1	SC11 型变压器最优能效的节能技术	255
4.2.2	SC9 型变压器最优能效的节能技术	267
4.2.3	SC15 型 1 级能效变压器的最优能效特性	279
4.2.4	SCH15 型非晶合金变压器的最优能效特性	287
4.3	S9 型电力变压器最优能效的节能技术	295
4.3.1	35kV 变压器最优能效的节能技术	295
4.3.2	66kV 电力变压器的最优能效节能技术	302
4.3.3	110kV 电力变压器的最优能效节能技术	311
4.4	S11 型电力变压器最优能效特性	321
4.4.1	35kV 变压器最优能效特性	321
4.4.2	66kV 变压器最优能效特性	325
4.4.3	110kV 变压器最优能效特性	331

第5章

变压器最优能效的节能管理

5.1	变压器节能管理的意义	338
-----	------------------	-----

5.1.1	落实国家节能战略与节电增效的必然要求	338
5.1.2	实现电网优质高效和单位降本增效的重要环节	339
5.1.3	“损耗率最低的变压器容量选择法”为深度挖掘变压器节 能潜力提供了理论支撑	340
5.1.4	电网企业节能增效的有效途径和必然选择	340
5.2	变压器最优能效的节能管理目标	341
5.2.1	油浸式变压器的最优能效目标	341
5.2.2	干式变压器的最优能效目标	342
5.2.3	电力变压器的最优能效目标	342
5.3	变压器最优能效管理方法	343
5.3.1	“三清一优”配电变压器运行节能管理法	343
5.3.2	“三清一优”管理法的管理目标	344
5.3.3	变压器最优能效管理的内容	344
5.3.4	变压器节能管理原则	345
5.3.5	变压器最优能效管理流程	347
5.4	变压器最优能效节能管理案例	348
5.4.1	110kV 变压器的最优能效管理	348
5.4.2	35kV 变压器的最优能效管理	351
5.4.3	10kV 配电变压器的最优能效管理	354

参考文献	358
------------	-----

变压器的基础知识

变压器是一类无运动部件的电能变换器，是一种旋转速度为零的电机。它改变与电能相关联的电压及电流而不改变频率，是电力系统中广泛应用的重要电气元件之一。

变压器是借助于电磁感应作用，将一种交流电压和电流变成频率相同的另一种或几种不同的电压和电流，并用于电力系统输电、配电和用电的电气设备。它是一种静止的电器，由一个或几个绕组套于铁心上做成。不同绕组间通过磁链的耦合，使电能得以在不同的电回路中传递，以实现传输和分配电能的目的。



1.1 变压器的分类

变压器按照不同的划分方式，可分为不同的类型。

1. 按用途分类

(1) 升压变压器。将低电压升为高电压，通常分布于发电厂，用于电网首端。其在高频领域应用较广，如逆变电源等。

(2) 降压变压器。将高电压降为低一级电压，分布于降压变电站。

(3) 配电变压器。由较高电压降至最末级配电电压，直接作配电用。

(4) 联络变压器。在发电厂升压站中连接有交换功率的两种电压等级母线的变压器，用于电网间的联络。联络变压器多采用三绕组变压器，变压器的高、中压侧绕组完成升压站高、中压侧母线功率交换的功能，而其低压侧第三绕组可作为平衡绕组消除三次谐波，又可作为厂用电备用电源，或连接限制内部过电压用的并联电抗器等。

(5) 厂用变压器。为发电厂的辅助设备供电的变压器。而为变电站的辅助设备供电的变压器称站用变压器。

(6) 分裂变压器。低压绕组分裂成两部分，分别接两台电机。在电力系统中，用得比较多的是双绕组双分裂变压器，它有一个高压绕组和两个分裂的低

压绕组，分裂绕组的额定电压和额定容量相同，它们的总容量等于变压器的总容量。分裂变压器比起普通变压器（在相同容量、电压等级、调压范围及级数，总损耗和短路电压等情况下），材料消耗较多（包括硅钢片、绕组用铜量等），从而使变压器的成本有所增加。

(7) 增压变压器。具有一个能改变线路电压和（或）相位的串联绕组以及一个励磁绕组的变压器。

也有资料按用途划分，分为以下类别：

(1) 电力变压器。用于输配电系统的升、降电压。

(2) 仪用变压器。如电压互感器、电流互感器，用于测量仪表和继电保护装置。

(3) 试验变压器。能产生高压，对电气设备进行高压试验。

(4) 特种变压器。如电炉变压器、整流变压器、调整变压器等。

2. 按绕组型式分类

(1) 双绕组变压器。具有两个独立绕组的变压器，用于连接电力系统中的两个电压等级。

(2) 三绕组变压器。具有三个独立绕组的变压器。当一个绕组接到交流电源后，另外两个绕组就感应出不同的电动势，这种变压器用于需要两种不同电压等级的负载。一般用于电力系统区域变电站中，连接三个电压等级。

(3) 多绕组变压器。在电子设备中，常采用多绕组变压器，如电源变压器。

(4) 自耦变压器（单绕组变压器）。只有一个绕组的变压器，也叫单绕组变压器。自耦变压器的二次绕组是一次绕组的一部分，一、二次绕组之间不仅有磁的联系，还有电的联系。用于连接不同电压的电力系统，也可作为普通的升压或降压变压器用。

3. 按相数分类

(1) 单相变压器。用于单相负荷和三相变压器组。

(2) 三相变压器。三个相同容量单相变压器的组合。它有三个铁心柱，每个铁心柱都绕着同一相的两个绕组，一个是高压绕组，另一个是低压绕组。用于三相系统的升、降电压。

(3) 多相变压器。如直流输电工程中的换流变压器，整流用六相变压器。

4. 按容量大小分类

(1) 小型变压器。电压在 35kV 及以下，三相最大额定容量为 2500kVA（单相最大容量为 833kVA）以下的配电变压器。

(2) 中型变压器。电压在 110kV 以下，三相最大额定容量在 100MVA

(单相最大容量 33.3MVA) 以下的电力变压器。

(3) 大型变压器。电压在 220kV 及以上, 三相最大额定容量超过 100MVA (单相最大容量超过 33.3MVA) 的电力变压器。

5. 按调压方式分类

(1) 有载调压变压器。可以在带负荷的条件下调节变比的变压器, 即变压器带有负载调压装置, 在负载运行中能够完成分接电压切换。

变压器加装自动调压、检测控制装置, 在电压超出规定范围时, 能在额定容量范围内带负载自动实现电压调整, 可以减少或避免电压大幅度波动。通常用于电压质量要求较高的变电站母线。与同容量的无励磁变压器相比, 体积较大, 造价较高, 检修调压箱停电时间长。

(2) 无励磁调压变压器。只能在停电的情况下改变分接头位置, 调整电压。用于对电压质量要求不敏感的地区。该类变压器比同容量的有载调压变压器体积小、价格便宜。

6. 按冷却方式分类

当变压器上层油温与下部油温产生温差时, 通过冷却器形成油温对流, 经冷却器冷却后流回油箱, 起到降低变压器温度的作用。按冷却方式分类可分为:

(1) 油浸自冷变压器 (ONAN, 75MVA 及以下变压器)。变压器工作过程中, 油被产生的热量加热而使绕组内部油温分布不均, 形成了密度差而获得了作为油循环驱动力的热浮升力。以油的自然对流作用将热量带到油箱壁和散热管, 然后依靠空气的对流传导将热量散发, 它没有特制的冷却设备。绝大多数配电变压器和许多电力变压器都采用这种方式。容量较小的变压器, 光滑油箱表面就足以将油冷却; 中等容量变压器, 油箱表面要做成皱纹形以增加散热面, 或加装片式或扁管散热器, 使油在散热器中循环流动; 大容量变压器油箱表面应加设辐射散热器。

(2) 油浸风冷变压器 (ONAF, 180MVA 及以下变压器)。在油浸自冷式的基础上, 在油箱壁或片式、扁管散热器上加装冷却风扇, 以增加空气的流量, 其散热量比不装风扇的要增加 30%~40%。

(3) 强迫油循环风冷变压器 (OFAF, 90MVA 及以上变压器)。在冷却器的油回路中装上油泵, 增加油循环的流速, 提高冷却效率。有导向强油风冷变压器是指油箱的冷却油流通过油流导向隔板, 有效地流过铁心和绕组内部, 提高了冷却效果, 降低了绕组的温升。

(4) 强迫油循环水冷变压器 (OFWF, 水力发电厂 75MVA 及以上升压变压器)。是以水作为冷却介质, 用强油循环加强水循环, 以达到较显著的冷

却效果。

(5) 蒸发冷却式变压器。采用相变换热原理，在变压器的绕组和铁心上注入液体冷却介质，依靠冷却介质蒸发潜热使绕组和铁心冷却。蒸发后的蒸汽和冷媒的液体都作为绝缘材料使用。

常见油浸式变压器用热交换装置种类构成如图 1-1 所示。

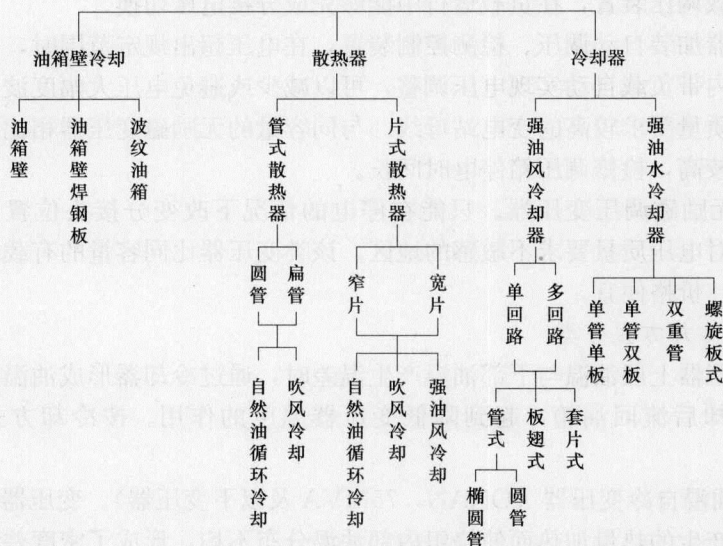


图 1-1 油浸式变压器用热交换装置种类构成

7. 按绝缘介质分类

(1) 油浸式变压器。依靠油作冷却介质，如油浸自冷、油浸风冷、油浸水冷、强迫油循环等。

(2) 干式变压器。环氧树脂浇注干式变压器（简称干变），分为带填料的（石英粉）、纯树脂及绕包三种。干变以空气作为绝缘介质和冷却介质，即依靠空气对流进行冷却，一般用于局部照明、电子线路等小容量变压器。

(3) 气体变压器。多以 SF_6 气体为绝缘介质兼作冷却剂的变压器。具有不燃烧、不爆炸、无排油污染、防潮性能好和噪声小等优点，特别适合于较小容量的变压器。

(4) 高燃点变压器。应用石油类、脂类及硅油类等高燃点油（燃点均在 300°C 以上，如硅油、 β 油）作为冷却介质的变压器。

(5) 固体绝缘变压器。变压器中使用了热管散热器进行冷却，适用于地理使用。

8. 按铁心结构分类

- (1) 心式变压器。用于高压的电力变压器。
- (2) 壳式变压器（任一绕组的外面都有铁心、铁心像外壳一样包着绕组）。用于大电流的特殊变压器，如电炉变压器、电焊变压器；或用于电子仪器及电视、收音机等电源变压器。
- (3) 卷铁心变压器。变压器铁心由厚度小于 0.3mm 的冷轧硅钢片弯曲卷绕而成，每相比传统的叠片式铁心少四个尖角，没有叠片铁心的叠接缝隙。
- (4) 立体铁心变压器。三相心柱呈 $\triangle$ 形排列，铁心不在一个平面上。

9. 按中性点绝缘分类

- (1) 全绝缘变压器。变压器首端与尾端绕组绝缘水平一样，一般为 35kV 以下的配电变压器。
- (2) 半绝缘变压器。即分级绝缘变压器，其中性点部分的绕组绝缘比每相线端绝缘要低，可降低制造成本，一般为 110kV 及以上变压器。

10. 按绕组材料分类

- (1) 铜线变压器。高低压绕组采用铜线材料组成线圈制成的变压器。
- (2) 铝线变压器。高低压绕组采用铝线材料组成线圈制成的变压器。
- (3) 半铜线半铝线变压器（一侧绕组用铜线，另一侧绕组用铝线）。
- (4) 箔式绕组变压器（绕组用铜箔或铝箔绕组）。
- (5) 高温超导变压器。采用高温超导材料取代铜线。液氮取代油进行冷却，因而具有体积小、能耗低、效率高、无油无火灾隐患、不污染环境的优点。高温超导变压器的体积可以减小 40%~60%。但超导线的交流损耗较大，制造成本较高。

11. 按结构分类

- (1) 全密封变压器。一种能避免变压器内部物质与外部大气之间相互交换的非呼吸式变压器。
- (2) 非晶合金铁心变压器。采用具有软磁特性的非晶合金带材制成的变压器铁心，非晶合金是指一种采用特殊的超快速致冷工艺加工而成的金属材料。
- (3) 调容变压器。一种多容量的配电变压器，它主要是利用安装在变压器上端的调容开关，改变其绕组的联结方式，使其铁心的磁通密度相应地变化，达到降低其容量损耗的目的。这种变压器能改变广大用户用电中“大马拉小车”的不合理现象，优于母子变压器交替使用的方法。
- (4) 防雷变压器。Yzn11 联结的变压器，具有良好的防雷击特性。当该变

压器二次或一次侧遭受雷冲击过电压时,同一心柱的两个半绕组的磁动势互相抵消,一次侧不会感应出过电压或逆变过电压,具有良好的防止正、逆变换过电压性能。

(5) 预装箱式变电站。经过型式试验的用来从高压系统向低压系统输送电能和设备。它包括装在外壳内的变压器、低压和高压开关设备、连接线和辅助设备,即由高压开关设备、电力变压器、低压开关设备、电能计量装置、无功补偿装置、辅助设备和连接件等元件组成的成套配电设备,这些元件在工作中被预先组装在一个或几个箱壳内。

(6) 组合式变压器。俗称美式箱变,也叫箱式变压器。将变压器、高压受电部分的负荷开关及保护装置、低压配电装置、低压计量系统和无功补偿装置组合在一起的成套变配电设备。

(7) 电缆变压器。用高压电缆绕制的干式变压器,绕组为高压交联电缆直接绕制,包括带有高压电缆多股部分的芯部,其内是一个半导体层,半导体层外面是绝缘层。最外层的电缆先用绝缘层再加上一层半导体层。每层绕组中装有隔离件,以便在每层有一个轴向圆环形冷却风道。交联电缆的电压等级就是变压器的电压等级,更适用于 110kV 及以上大容量变压器。

(8) 地下变压器。一种可安装在地坑或直接埋入地下的配电变压器或组合变压器,也称为埋地式变压器。如 ABB 公司生产的地下固体绝缘配电变压器,容量为 25~167kVA;在我国,上海置信电气公司生产的小容量(16~50kVA)地下路灯变压器在中压配电路灯工程中广泛应用。

(9) 超导变压器。利用高温超导材料提高能效、减少电力传输损失的变压器。当前,除技术因素外,超导变压器使用的低温超导线价格比普通铜线高 100 多倍,维持液氧的制冷机的价格也极其昂贵,因此尚处于研发阶段。



1.2 变压器的构成

变压器主要由铁心、绕组、绝缘以及辅助设备组成。也可按照构成部件将其结构分为:器身(铁心、绕组、绝缘、引线)、油箱[本体、附件(如储油柜和油门闸阀等)]、冷却装置(散热器、风扇、油泵等)、保护装置(防爆阀、气体继电器、测温元件、呼吸器等)、出线装置(含套管)。油浸式变压器主体结构示意如图 1-2 所示。

油浸式变压器器身结构示意图如图 1-3 所示。

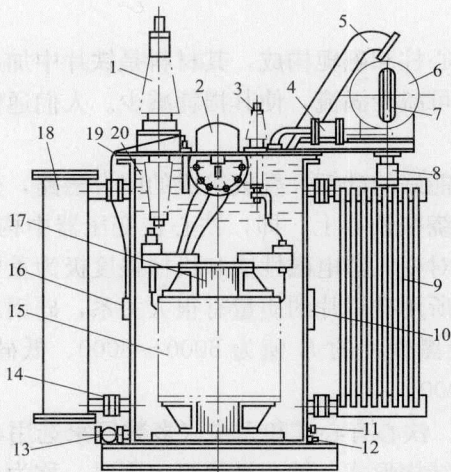


图 1-2 油浸式变压器主体结构示意图

- 1—高压套管；2—分接开关；3—低压套管；4—气体继电器；5—安全气道（防爆管或释压阀）；6—储油柜；
7—油位计；8—吸湿器；9—散热器；10—铭牌；11—接地螺栓；12—油箱活门；13—放油阀门；
14—活门；15—绕组；16—信号温度计；17—铁心；18—净油器；19—油箱；20—变压器油

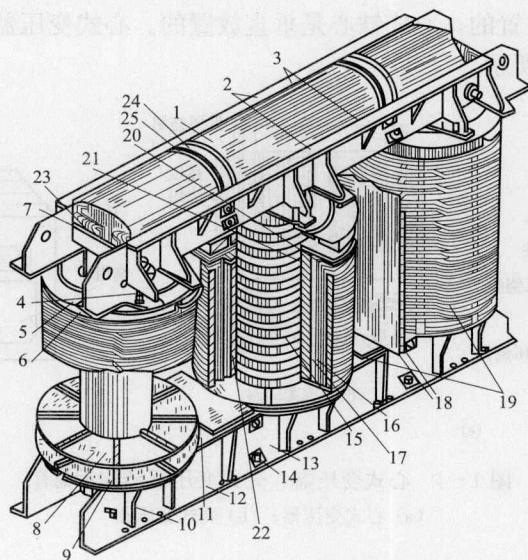


图 1-3 油浸式变压器器身结构示意图

- 1—铁轭；2—上夹件；3—上夹件绝缘；4—压钉；5—绝缘纸圈；6—压板；7—方铁；8—下铁轭绝缘；
9—平衡绝缘；10—下夹件加强筋；11—下夹件上肢板；12—下夹件下肢板；13—下夹件腹板；
14—铁轭螺杆；15—铁心柱；16—绝缘纸筒；17—油隙撑条；18—相间隔板；19—高压绕组；
20—角环；21—静电环；22—低压绕组；23—方铁绝缘；24—钢拉板；25—绝缘板

1. 铁心

变压器铁心由铁心柱和磁轭构成，其材料是铁片中加入硅以降低钢片的导电性，增加电阻率，可减少涡流，使其损耗减少。人们通常把加了硅的钢片称为硅钢片。

铁心是用导磁性能好的硅钢片叠放组成的闭合磁路，变压器的一次绕组线圈和二次绕组线圈都绕在铁心上。即，铁心在变压器中构成一个闭合的磁路，是安装线圈的骨架，对变压器电磁性能和机械强度极为重要。

变压器的质量与所用硅钢片的质量有很大关系，硅钢片的质量通常用磁通密度 B 来表示，一般黑铁片的 B 值为 $6000 \sim 8000$ 、低硅片为 $9000 \sim 11000$ ，高硅片为 $12000 \sim 16000$ 。

(1) 铁心的分类。铁心有铁心式和壳式（多数厂家选用心式，只有少数厂家选用壳式）两种基本结构形式。铁心被绕组包围时，称为心式；绕组被铁心包围时，称为壳式。电力变压器普遍采用心式铁心，其铁心柱截面为圆形立放，高低压绕组截面亦为圆形（实为环形）同心地套在铁心柱上，绕组包围铁心。壳式铁心截面为长方形卧放，绕组截面亦为长方形套在铁心柱上卧放，两边有旁轭，铁心包围绕组，主要用于家用视频电器或特大型变压器。一般情况下，壳式铁心是水平放置的，心式铁心是垂直放置的。心式变压器、壳式变压器结构示意图如图 1-4 所示。

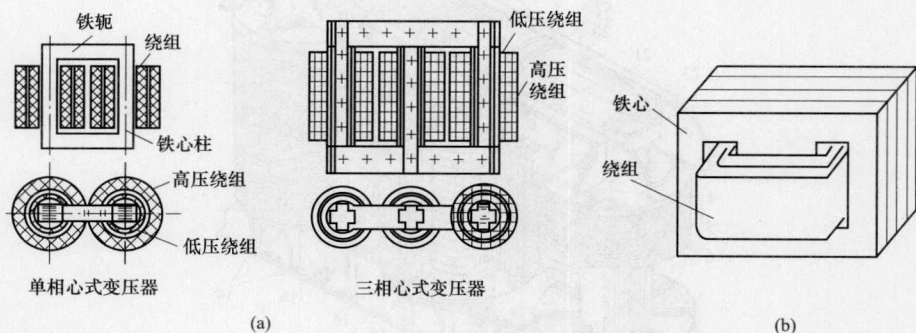


图 1-4 心式变压器、壳式变压器结构示意图

(a) 心式变压器；(b) 壳式变压器

(2) 铁心的叠装。变压器铁心通常采用厚度为 $0.23 \sim 0.35\text{mm}$ 表面涂有绝缘漆的硅钢片分层叠装。硅钢片两面经氧化形成漆膜，片间有良好绝缘，以增加铁心中的涡流路径，降低涡流损失。大型变压器铁心还设有油道，以利变压器油循环，加强散热效果。