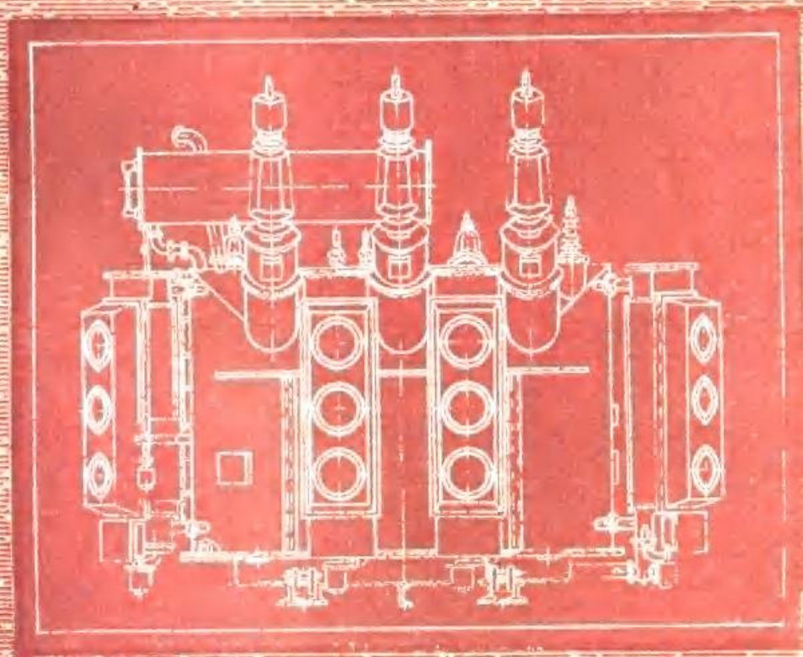


电力变压器计算

路长柏 朱英浩 等编



黑龙江科学技术出版社

内 容 提 要

•本书主要叙述了电压为220千伏及以下电力变压器计算的基本知识,较为详尽地阐明了电力变压器计算的基本公式和计算方法,并介绍了电子计算机在变压器计算中的应用。

本书内容对特种变压器的某些计算也具有重要参考价值。

本书可作为高等工业学校电机、电力及有关专业的教学参考书,也可作为从事变压器设计和制造、维修和试验等工程技术人员的参考书。

封面设计: 仁 之

电 力 变 压 器 计 算

路长柏 朱英浩 等编

黑龙江科学技术出版社出版

(哈尔滨市南岗区建设街35号)

哈尔滨市龙江印刷厂印刷·黑龙江省新华书店发行

开本787×1092毫米21.375·印张·字数500·千字

1986年1月第一版·1986年1月第一次印刷

印数: 1—5,000

书 号: 15217·131 定价: 4.35元

序 言

电力变压器是电力系统中的重要设备之一。随着我国社会主义现代化建设的发展，特别是随着电力网向超高压、大容量方向的发展，对电力变压器提出了新的更高要求。近年来，我国在变压器的理论研究和生产实践方面均取得了可喜的成就。

变压器的种类繁多，一般可分为电力变压器和特种变压器。本书主要阐述电力变压器的计算，而对于特种变压器——电炉变压器、整流变压器、矿用变压器、高压试验变压器、变流器和电抗器等计算未予讨论。尽管如此，本书对于这些变压器的某些计算仍具有重要参考价值，因为它们的铁芯、线圈以及发热和冷却等的计算都和电力变压器基本相同。

电力变压器计算与变压器结构密切相关，如果缺乏变压器结构知识，则很难完成计算任务，为此，本书在叙述计算理论和方法的同时，也介绍了一些在结构方面必需具备的基本知识。

本书主要介绍电压为 220 千伏及以下的电力变压器的计算，但对于更高电压等级（330千伏、500千伏等）的电力变压器的特点，如绝缘技术等问题，在相应章节中也做了适当阐述。

目前，有关变压器计算方面的书籍在国内尚不多见，编者结合多年来的教学和生产实践经验，编写了本书。它可作为高等工业学校电机和电力类有关专业的教学参考书，并可作为变压器制造厂、变压器维修、运行、安装和试验部门的工程技术人员的参考书，

本书由哈尔滨电工学院路长柏和沈阳变压器研究所朱英浩主编。参加编写的有朱英浩（第一章、第九章）、宋铁章（第二章、第十一章）、张怀灵（第三章、第四章、第八章和第十章）、路长柏（第五章）、李文海（第六章）、蒋守诚（第七章）、王学群（第十二章）等。全书由路长柏修改定稿。

在本书的编写过程中，沈阳变压器厂曲延文工程师作了大量组织工作，谨以本书志以深切悼念。

沈阳变压器厂宋桂珍工程师曾为本书编写了10千伏、110千伏和220千伏变压器计算例题，限于篇幅而删去。

本书承蒙哈尔滨工业大学孔昌平、王耀臣和黑龙江省电力局陈若珊审阅，在此表示感谢。

哈尔滨电工学院研究生刘文里编制了附录四的 110 千伏三线圈变压器计算程序，并与手算结果进行了对比计算。

由于编者水平所限，书中欠妥和错误之处难免，恳请读者指正。

编 者

一九八二年五月

主 要 符 号

A —电流	H_0 —铁窗高度	q —线圈表面的热负荷
A_c —铁芯柱截面积	H_P —线圈平均高度	R —直流电阻
A_e —铁轭截面积	I_1 —一次线圈电流	R_{zk} —负载阻抗的电阻分量
a —裸导线厚度	I_2 —二次线圈电流	R_b —油箱内壁半径
B_c —铁芯柱中磁通密度	I_0 —空载电流、中性线电流	S —导线截面积
B_d —油箱内壁宽度	I_{0v} —空载电流有功分量	S_1 —一次线圈导线截面积
B_m —最大磁通密度	I_{0w} —空载电流无功分量	S_2 —二次线圈导线截面积
b —裸导线高度	I'_{0w} —励磁电流	S_N —变压器额定容量
c —变压器有效材料成本	I''_{0w} —接缝励磁电流	S_Z —变压器每柱容量
c_d —发电成本	I_ϕ —相电流	T_B —变压器计算年限
C_G —变压器的净值	I_N —额定电流	U_1 —一次线圈电压
C_B —变压器的制造成本	K —电压(电流)比	U_2 —二次线圈电压
c_{B10} —十年内变压器总投资	K_c —磁密为10000高斯时每 公斤硅钢片损耗	U_N —额定电压
c_{F10} —十年内变压器总运行 费用	K_j —负载系数	U_{zk} —阻抗电压
c_k —线圈成本	K_1 —短路电流倍数	U_r —阻抗电压的有功分量
c_0 —铁芯成本	K_k —电流密度为1安培/毫 米 ² 时每公斤导线损耗	U_x —阻抗电压的无功分量
c_{10} —十年变电成本	k_0 —迭片系数	U_ϕ —相电压
D —铁芯柱直径	K_g —自耦变压器效益系数	W —匝数
ΣD —等值漏磁空道面积	L_b —油箱内壁长度	W_N —额定匝数
d —导线直径、铁芯柱直径	l_c —铁芯长度	W_1 —一次线圈匝数
E —电场强度	l_P —线圈平均长度	W_2 —二次线圈匝数
E_b —击穿电场强度	m —相数、线圈间绝缘距离	x_{zk} —负载阻抗的电抗分量
e_z —每匝电势	m_b —并联导线根数	Δ —电流密度、相邻线段固 体绝缘的等效厚度
F_a —轴向电力	m_0 —两铁芯柱中心距	Ψ —磁链数
F_r —辐向电力	m_1 —套有线圈的铁芯柱数	ω —角频率
f —频率	P_0 —空载损耗	ρ —纵向洛氏系数
f_0 —铁芯柱截面积利用系数	P_{fz} —负载损耗	ρ_i —横向洛氏系数
G_F —铁芯硅钢片总重量	p_Z —年折旧率和维修费之和	τ —温升、年负载小时数
G_k —导线总重量	p_0 —单位空载损耗	λ —漏磁宽度、介质导热系 数
H —线圈端部到铁轭的距离	p_1 —单位负载损耗	
H_c —线圈净高度	Q —热量	ε_y —油的介电系数
H_x —电抗高度		ε_z —纸的介电系数

电 力 变 压 器 计 算

目 录

主要符号

第一章 概 述…………… (1)

- § 1—1 电力变压器在电力网中的应用…………… (1)
- § 1—2 我国电力变压器制造工业的发展…………… (2)
- § 1—3 电力变压器的分类… (3)
- § 1—4 电力变压器铁芯结构的主要型式…………… (4)
- § 1—5 电力变压器线圈结构的主要型式…………… (7)
- § 1—6 油箱及散热器结构的主要型式…………… (10)
- § 1—7 变压器计算的一般程序…………… (11)

第二章 电力变压器设计的一般问题…………… (13)

- § 2—1 电力变压器性能参数的确定…………… (13)
- § 2—2 变压器增长定律…………… (14)
- § 2—3 十年变电成本…………… (16)
- § 2—4 电力变压器主要几何尺寸的理论计算…………… (19)
- § 2—5 工厂的计算方法…………… (25)
- § 2—6 电力变压器的系列设计…………… (28)

第三章 变压器铁芯…………… (31)

- § 3—1 概 述…………… (31)
- § 3—2 铁芯用硅钢片…………… (34)
- § 3—3 铁芯截面积确定…………… (36)
- § 3—4 铁芯计算…………… (41)

第四章 变压器线圈计算…………… (49)

§ 4—1 概 述…………… (49)

§ 4—2 线圈材料…………… (49)

§ 4—3 线圈型式及其选择… (51)

§ 4—4 并联导线换位及换位导线…………… (56)

§ 4—5 线圈高度的确定…………… (63)

§ 4—6 线圈绕向及出头标记…………… (66)

§ 4—7 线圈电压电流计算… (67)

§ 4—8 层式线圈计算…………… (69)

§ 4—9 饼式线圈计算…………… (77)

第五章 电力变压器的绝缘…………… (89)

§ 5—1 概 述 …………… (89)

§ 5—2 电力变压器的绝缘配合与试验电压…………… (90)

§ 5—3 变压器绝缘分类及其所用的主要绝缘材料…………… (98)

§ 5—4 油—隔板结构理论… (101)

§ 5—5 电力变压器主绝缘… (107)

§ 5—6 变压器线圈中的冲击电压分布…………… (119)

§ 5—7 改善瞬变过程中线圈电压分布的方法…………… (124)

§ 5—8 变压器线圈的纵绝缘…………… (129)

§ 5—9 引线绝缘…………… (134)

第六章 阻抗电压计算…………… (137)

§ 6—1 概 述…………… (137)

§ 6—2 三相双线圈变压器的纵向电抗…………… (138)

§ 6—3 双同心式结构的三相

双线圈变压器的纵向电抗.....(142)	§ 9—3 突发短路电流计算...(222)
§ 6—4 三线圈变压器的纵向电抗.....(147)	§ 9—4 短路电动力计算.....(225)
§ 6—5 解析法计算双线圈变压器的电抗.....(149)	第十章 变压器重量计算(239)
§ 6—6 自耦变压器的纵向电抗.....(151)	§ 10—1 概 述.....(239)
§ 6—7 曲折联结的三相变压器的纵向电抗.....(156)	§ 10—2 总油量计算.....(239)
§ 6—8 交错式线圈的漏电抗.....(157)	§ 10—3 变压器总重量计算...(242)
§ 6—9 分裂式线圈的漏电抗.....(162)	§ 10—4 变压器运输重量计算.....(244)
§ 6—10 横向漏电抗.....(166)	第十一章 有载调压变压器(250)
§ 6—11 阻抗电压计算.....(169)	§ 11—1 有载调压变压器在电力系统中的应用.....(250)
第七章 负载损耗计算(170)	§ 11—2 对有载调压变压器的技术要求.....(251)
§ 7—1 概 述.....(170)	§ 11—3 有载调压的基本原理.....(253)
§ 7—2 线圈损耗计算.....(170)	§ 11—4 有载分接开关结构简介.....(257)
§ 7—3 饼式线圈的附加损耗计算.....(171)	§ 11—5 有载调压变压器的设计特点.....(258)
§ 7—4 引线损耗计算.....(179)	第十二章 电子计算机在变压器计算中的应用(273)
§ 7—5 杂散损耗计算.....(180)	§ 12—1 电子计算机在变压器计算中应用概况.....(273)
§ 7—6 负载损耗计算.....(184)	§ 12—2 最优化方法概述.....(274)
§ 7—7 对减小附加损耗措施的分析.....(185)	§ 12—3 变压器铁芯最佳截面计算.....(283)
第八章 变压器温升计算(190)	§ 12—4 变压器性能计算程序的编制.....(285)
§ 8—1 概 述.....(190)	附录一、各种附表(298)
§ 8—2 变压器的温升限值...(193)	附录二、多线圈, 自耦等结构阻抗值计算公式的推导(312)
§ 8—3 温升计算.....(195)	附录三、洛氏系数(ρ)的推导(314)
§ 8—4 铁芯温升计算.....(212)	附录四、110 千伏三级线圈变压器计算程序(317)
§ 8—5 在负载变动情况下变压器的发热与温升计算.....(217)	主要参考文献(335)
第九章 短路电动力计算(221)	
§ 9—1 概 述.....(221)	
§ 9—2 短路电动力分析.....(221)	

第一章 概 述

§ 1—1 电力变压器在电网中的应用

电力变压器是电网中的主要电气设备。变压器将水力或火力发电厂中发电机组所产生的交流电压升高后向电网输出电能的称为升压变压器。发电厂内还要安装厂用电变压器，供起动机组之用。用于降低电压的变压器称为降压变压器。用于联络两种不同电压网络的变压器称为联络变压器（包括自耦变压器与三线圈变压器）。将电压降低到电气设备工作电压的变压器称为配电变压器。配电前用的各级变压器称为输电变压器。

电力系统中的运行电压与负载大小和性质有关，因此，变压器必须具备相应的调压装置。在不励磁条件下调压的变压器称无载调压变压器，在负载下调压的变压器称有载调压变压器，但当负载或线路发生短路故障时，则不能进行调压，因为此时变压器中流

有短路电流。

变压器在电网中的应用情况如图1—1所示。

联接于发电机的升压变压器，在容量上应与发电机容量相匹配，其关系式为

$$S_N = \frac{T_N}{\cos\phi} \quad (1-1)$$

式中 T_N —发电机容量（千瓦）；

$\cos\phi$ —发电机的功率因数；

S_N —联接于发电机的变压器容量（千伏安）。

电力变压器随额定电压的升高，其输送容量和输送距离也相应增大。它们之间的关系如表1—1所示。

一台电力变压器可与一台发电机相联，也可与二台、三台发电机相联，前者称为一机一变制，后者称为多机一变制。与多台发电机相联的变压器称为分裂变压器，即其低压线圈分裂成几个单独的线圈，它可在下列条件下运行：

表 1—1 线路输送容量与输送距离

额定电压 (KV)	输送功率 (KW)	输送距离 (Km)
6	100~1200	4~15
10	200~2000	6~20
35	2000~10000	20~50
60	3500~30000	30~100
110	10000~50000	30~150
220	100000~500000	200~300

1. 多机同时运行；

2. 一机运行，其余机停运；

3. 一机运行，其余机在发生事故状态时运行。

电力变压器的种类繁多，本书仅阐述油浸式电力变压器计算的有关问题。

§ 1—2 我国电力变压器制造工业的发展

我国的电力变压器制造工业，从建国以来，随着国民经济建设的发展，特别是随着电力工业的大规模发展而不断发展。电力变压器单台容量和安装容量迅速增长，电压等级也相继提高。五十年代发展到110千伏级；六十年代发展到220千伏级；七十年代发展到330千伏级；八十年代已发展到500千伏级电力变压器。在五十年代初，我国只能仿制100千伏安的小型电力变压器，到五十年代中期已能仿制31500千伏安的电力变压器，电压等级已发展到110千伏。六十年代初我国由仿制阶段过渡到自行设计和制造阶段，六十年代中期已发展到制造220千伏、120000千伏安的电力变压器。到六十年代末期，电

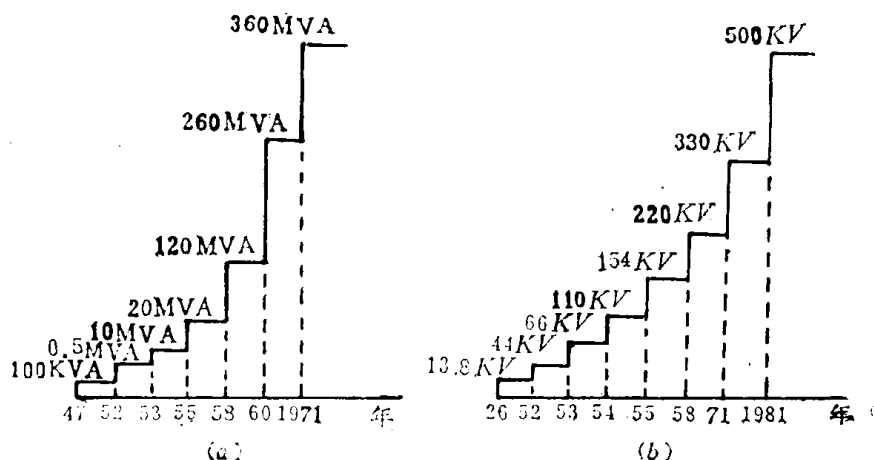


图 1—2 国产电力变压器单台产品的电压和容量增长情况
(a) — 容量增长 (1947—1979); (b) — 电压增长 (1926—1981)

力变压器的容量已发展到260000千伏安。七十年代初期已达到生产330千伏级、360000千伏安电力变压器的水平。我国西北地区的刘关线330千伏系统中所用的升、降压电力变压器、联络用自耦变压器，全部为国产品。

在图1—2中给出了我国电力变压器单台容量和电压的增长情况。

我国生产的电力变压器除供国内使用外，还供出口援外用。出口变压器的电压等级最高已达220千伏；容量达100000千伏安。

在我国电力变压器制造工业发展过程中，变压器结构与性能都有很大改进，现分别概述如下：

1. **铁芯**(图1—3中的17)：开始生产变压器时，铁芯采用单位损耗较大的热轧硅钢片，迭片采用直接缝，铁芯柱采用螺杆夹紧的结构，故硅钢片的利用率低，空载性能差。随着冷轧硅钢片的发展，我国各变压器制造厂已过渡到采用冷轧硅钢片卷料制造铁芯，而铁芯迭片的迭积方式，已由直接缝、半直半斜接缝过渡到全斜接缝。铁芯柱也采用了玻璃粘带绑紧的结构。铁轭仍采用螺杆夹紧，或半干性无纬玻璃粘带扎紧结构型式。铁芯材质与结构的改进，使空载性能得到了很大改善。

2. **线圈**(图1—3中的15)：在六十年代中期以前，线圈全部采用铜导线绕制。目前，除在1.5毫米及以下的以及容量在4000千伏安及以上的电力变压器与220/110千伏

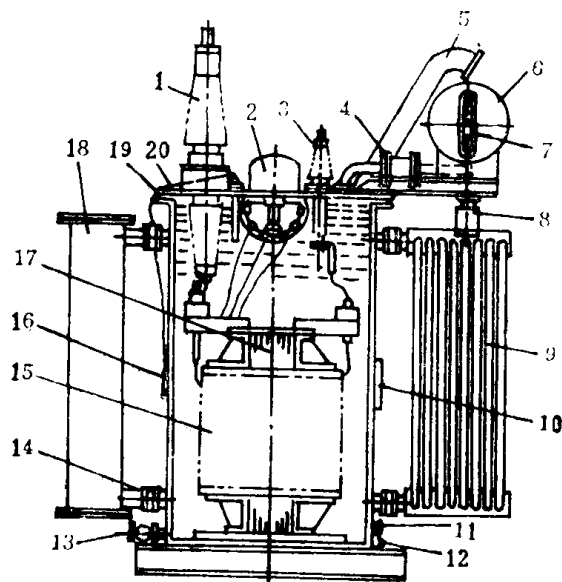


图1—3 变压器结构概况

- 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；6—储油柜；
7—油表；8—吸湿器；9—散热器；10—名牌；
11—接地螺栓；12—油样活门；13—放油阀门；
14—活门；15—线圈；16—信号温度计；17—铁芯；
18—净油器；19—油箱；20—变压器油

自耦变压器中采用铜导线外，其余的变压器线圈已全部采用铝导线。从线圈结构型式来看，110千伏及以上的线圈由过去采用静电圈补偿结构发展到纠结连续式、全纠结式以及插入电容式等。基本上不采用双饼加包附加绝缘的结构型式。

3. 主绝缘结构：在六十年代中期前，采用厚纸筒大油隙主绝缘结构。六十年代后期开始采用薄纸筒小油隙的主绝缘结构。由于油隙减小，油的击穿场强提高，从而使主绝缘距离大为缩小，例如220千伏级变压器，当线圈间采用厚纸筒大油隙的结构时，主绝缘距离为150毫米，而采用薄纸筒小油隙时则减为84毫米。

4. 油箱（图1—3中的19）结构：由于当前尚不能做到运行中变压器不吊芯检查，为了方便检查，凡是器身重量大于25吨的变压器油箱，都设计成钟罩式油箱，25吨以下

时才设计成平顶油箱。这样，只要吊起钟罩就可检查变压器的器身，从而使起吊设备大为简化。目前，国内各变压器制造厂都在研究不吊芯检查的结构，如果此种结构研制成功，则钟罩式油箱就可不予考虑。

5. 附件：由图1—3可知，变压器的主要附件是套管、分接开关、气体继电器、吸湿器、信号温度计等。随着变压器制造技术的发展，这些附件也有了不少的改进。

套管芯子已由油纸绝缘发展到油纸电容式绝缘结构；有载分接开关已由电抗式发展到电阻式；强迫油循环变压器所用油泵与电动机组，现在已发展到潜油泵，泵与电动机组为一体。

电力变压器的进一步发展趋势是：降低损耗水平，提高单台容量，电压等级向1000~1500千伏的超高压方向发展。

§ 1—3 电力变压器的分类

电力变压器有以下几种分类方法：

1. 按变压器的容量 通常容量为500千伏安及以下的变压器称为小型变压器；630~6300千伏安的变压器称为中型变压器；8000~63000千伏安的变压器称为大型变压器；90000千伏安及以上的称为特大型变压器。

2. 按线圈数 可分为双线圈与三线圈变压器，而三线圈又分为升压结构与降压结构两种，升压结构的低压线圈在中间，降压结构的中压线圈在中间。

3. 按高低压线圈有无电的联系 可分为普通电力变压器与自耦变压器。

4. 按变压器的调压方式 可分为无载调压与有载调压变压器。

5. 按相数 可分为单相与三相变压器。

6. 按冷却方式 可分为油浸自冷、油浸风冷、强油风冷与强油水冷变压器。

7. 按所联接发电机的台数 可分为双分裂与多分裂变压器。双分裂又可分为轴向分裂与辐向分裂变压器，前者是两个低压线圈在轴向上下排列(图1—4a)；后者是两个

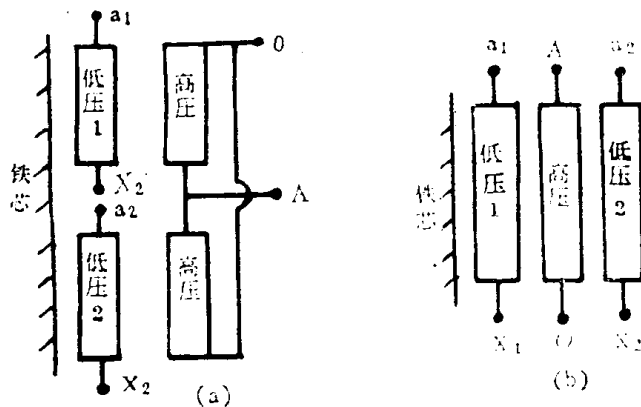


图1—4 分裂式线圈示意图
(a) 一轴向分裂；(b) 一辐向分裂

低压线圈分别位于高压线圈的两侧(图1—4b)。

轴向分裂的分裂变压器一定要采用上下并联的高压线圈，否则不能满足分裂运行的要求。辐向分裂的分裂变压器一定要满足两组低压线圈与高压线圈间都有相同的阻抗电压的要求。

综上所述可知，电力变压器的品种繁多。为了产品的标准化和系列化，上述分类不能任意组合，常用的品种有：

1. 10千伏级6300千伏安及以下为三相双圈油浸自冷式电力变压器；
2. 35千伏级31500千伏安及以下为三相双圈油浸式电力变压器；6300千伏安及以下为油浸自冷式，8000千伏安及以上为油浸风冷式；
3. 60千伏级63000千伏安及以下为三相双圈油浸式电力变压器；6300千伏安及以下为油浸自冷式，8000~40000千伏安为油浸风冷式，50000千伏安及以上为强迫油循环风冷式或水冷式；
4. 110千伏级63000千伏安及以下有三相双圈与三相三圈油浸式电力变压器两种，6300千伏安及以下为油浸自冷式，8000~40000千伏安为油浸风冷式，50000千伏安及以上为强迫油循环风冷式或水冷式；
5. 220千伏级360000千伏安及以下有三相双圈、三相三圈与三相自耦油浸式电力变压器三种。一般都采用强迫油循环风冷式或水冷式。

在各类电力变压器中，由于线圈的结构要求，对于每一电压等级，一般均有一个最小容量：

- 1) 10千伏级的最小容量为10千伏安；
- 2) 35千伏级的最小容量为50千伏安；
- 3) 60千伏级的最小容量为630千伏安；
- 4) 110千伏级的最小容量为3150千伏安；
- 5) 220千伏级的最小容量为31500千伏安。

除了超高压变压器外，现在一般不采用单相的结构。

§ 1—4 电力变压器铁芯结构的主要型式

电力变压器的铁芯是变压器的磁路和骨架。根据铁芯与线圈的相对位置，铁芯可分

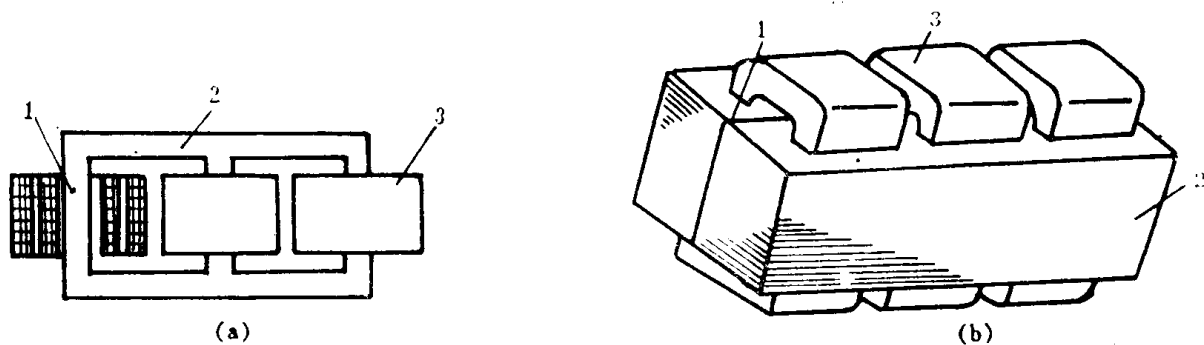


图 1—5 两种主要的铁芯结构型式

(a) — 内铁式; (b) — 外铁式; 1 — 铁芯柱; 2 — 铁轭; 3 — 线圈

为内铁式 (图 1—5a) 与外铁式 (图 1—5b) 两种主要结构型式。在外铁式铁芯结构中, 线圈被铁芯包围; 而在内铁式铁芯结构中铁芯柱被线圈包围。

外铁式铁芯结构具有下列特点:

- (1) 每种容量的铁芯迭片只有一种片宽, 故加工较方便;
- (2) 因铁芯截面为长方形, 故与之相配合的线圈截面也应为长方形, 同时线饼之间面积较大, 这样可使饼间电容增大, 对地电容与饼间电容之比小, 故可改善线圈中的冲击电位分布, 因而超高压变压器采用外铁式铁芯结构时可简化线圈结构;
- (3) 因线圈均由双饼组成, 故线圈的分组比较方便, 同时, 在调整阻抗电压、漏磁与短路机械力时可由不同分组来得到所需值。一般可将线圈分成如图 1—6 所示的几种分组情况。

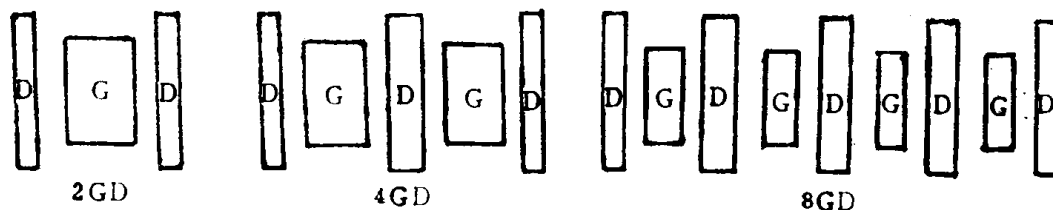


图 1—6 外铁式铁芯的线圈分组数

由于低压线圈靠近铁轭, 因而绝缘比较方便, 故最少的线圈分组数为 $2GD$, 即 2 个高压—低压组。在 $4GD$ 分组中, 中间低压线圈由 2 部分组成; 在 $8GD$ 分组中也是如此。这样, 当对一个 GD 分组的冲击电压分布、漏磁分布、机械力与油流分布等做了全面的试验研究之后, 就不用再对其他 GD 分组进行试验研究了, 如每一 GD 分组的容量定为 150 兆伏安, 则 $8GD$ 就可以达到 1200 兆伏安, 因此采用这种结构具有较大的设计计算的灵活性, 对发展极限容量的电力变压器具有决定性的意义;

(4) 外铁式电力变压器的引线都在上部, 故出线方便, 这一点对三相三线圈及自耦变压器则更方便;

(5) 若将线圈与铁芯之间、线圈与油箱之间都楔紧时, 则整个变压器可放倒运输;

(6) 由三台单相铁芯可组成特殊三相变压器, 这样可制成运输比较困难的发电厂或变电所使用的大容量变压器。特殊三相变压器就是把三个单相变压器运到工地后装上共同的箱盖和套管的变压器。此种结构, 对外铁式铁芯而言, 增加的硅钢片重量不多,

而线圈的重量不变，如图 1—7 所示；

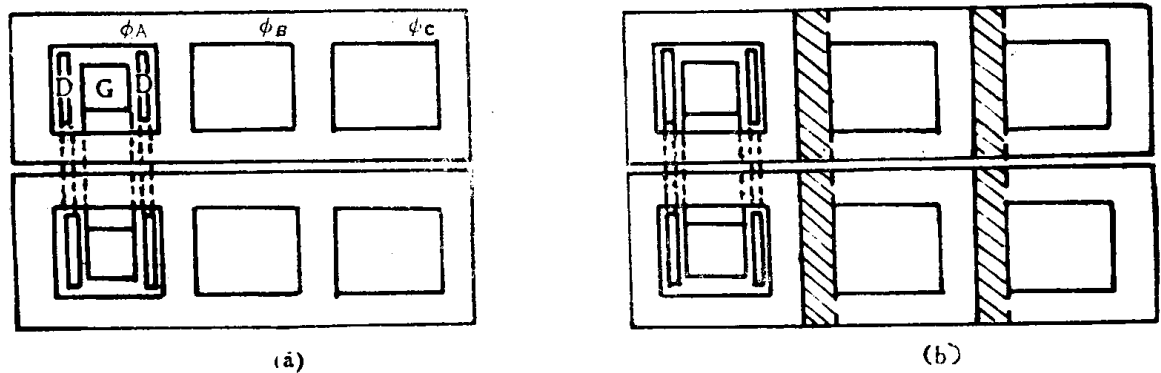


图 1—7 三相外铁式变压器结构示意图（斜线部分为多增加的铁芯部分）
（a）—普通三相外铁式变压器；（b）—特殊三相外铁式变压器三相组

（7）因为外铁式铁芯系水平放置结构，故铁芯需用 T 字梁支撑。为避免漏磁引起的局部过热，T 字钢及上部支撑板外面都要设置磁屏蔽；

（8）当低压线圈流过大电流时，因线圈被铁芯所包围，故电流引起的附加损耗较小；

（9）线饼为垂直放置，油流较好，故线饼的温升不高。

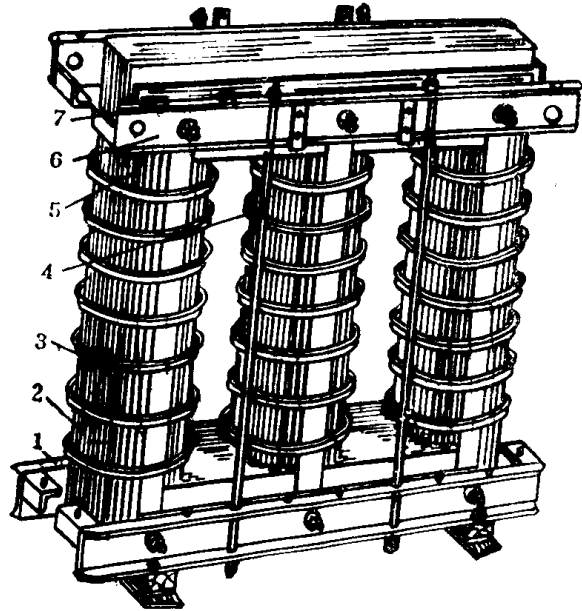


图 1—8 三相三柱式铁芯

1—下夹件；2—铁芯柱；3—铁芯柱绑扎；
4—拉螺杆；5—铁轭螺杆；6—上夹件；7—接地片

外铁式虽有上述特点，但多数制造厂都不采用这种结构，主要是由于下列原因；

（1）线圈需用特殊绕线机绕成长方形，一般绕成单饼后再焊接；

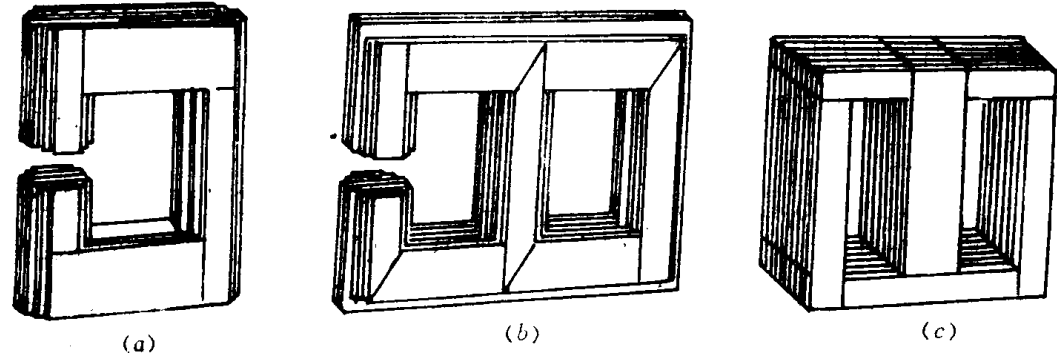
（2）铁芯要在线圈放正位置后，再将铁芯迭片一片一片地在线圈内迭成。

内铁式铁芯结构是我国变压器制造厂普遍采用的铁芯结构型式。图 1—8 所示为中小型变压器采用的三相三柱式铁芯，它具有下列优点：

（1）铁芯可先迭装成形，然后套上在绕线机上绕成的线圈；

（2）线圈为圆形，故绕制方便。内铁式铁芯又分为单相双柱、单相带旁轭、三相三柱、三相五柱式等结构型式，如图 1—9 所示。

上述各种铁芯结构型的特征及适用范围如表 1—2 所示。



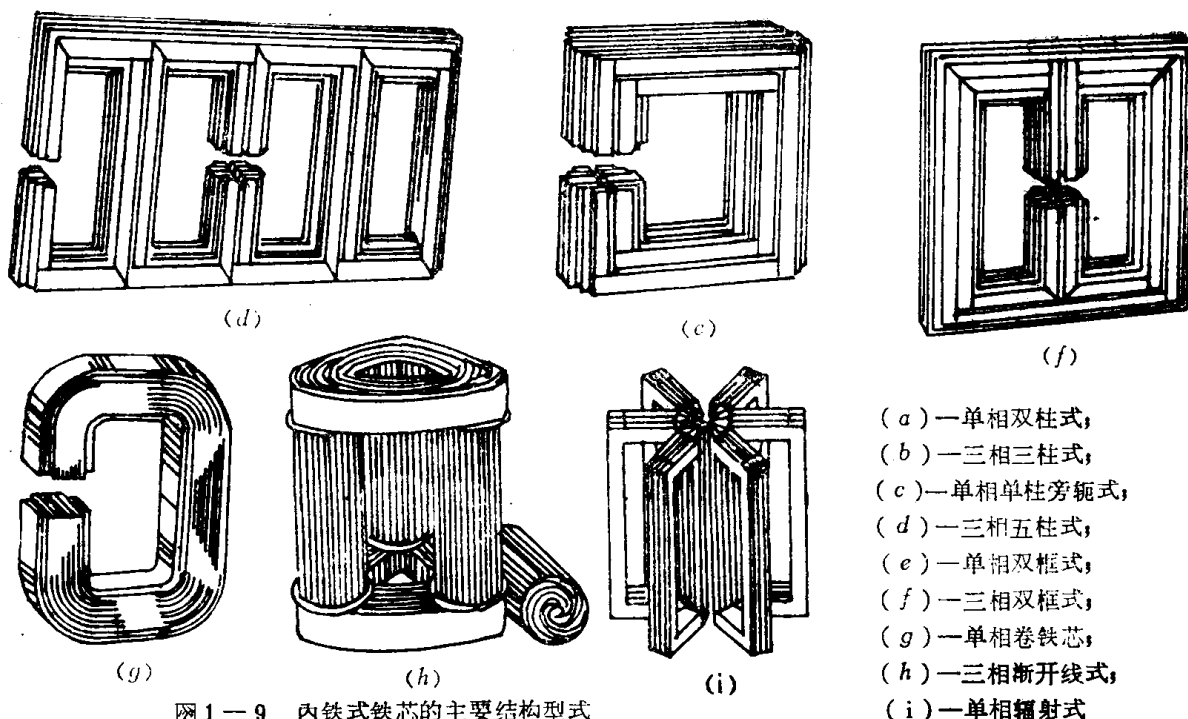


图 1—9 内铁式铁芯的主要结构型式

表 1—2 内铁式铁芯的结构特征和应用范围

型 式	图 号	结 构 特 征	应 用 范 围
单相双柱式铁芯	图 1—9a	铁芯柱与铁轭在同一垂直平面内，以迭接方式连接，结构	广泛应用的典型结构，
三相三柱式铁芯	图 1—9b	简单，工艺装备少，但迭装工作量大。	适用于各类变压器。
单相三柱旁轭式铁芯	图 1—9c	铁轭高度降低，从而铁芯总高度降低，便于运输，并有	单相的适用于低中压
三相五柱式铁芯	图 1—9d	助于减小结构损耗，但单框的硅钢片用量有所增加。单相的旁轭截面为芯柱截面的 $1/2$ ，三相的铁轭和旁轭，如磁通按正弦波考虑时，其截面分别为芯柱截面的 $1/\sqrt{3}$ 。	大电流变压器、高压试验变压器等。三相的适用于特大型变压器，电压互感器等。
单相双框式铁芯	图 1—9e	单相的由截面相等的内外两框构成，三相的由截面相等的一个外框和两个内框构成，在中间芯柱两端内外框有半数迭片连在一起。这种铁芯冷却效果好，并可改善空载性能。	芯柱直径较大，迭片片宽超过硅钢片宽度的特大型变压器。
三相双框式铁芯	图 1—9f		
单铁芯卷	图 1—9g	用带料连续卷成，不需迭装，空载性能好，但线圈绕制需有专用设备。	小型变压器、互感器等
环形或矩形整体式			
c形对接式		用整体矩形锯成两半，套装线圈后用树脂胶合，因有对接的缝隙，空载电流比整体卷铁芯大。	小型变压器、互感器等
三相渐开线式铁芯	图 1—9h	芯柱迭片用成形机压成渐开线型式，迭装方便，铁轭用带料卷成，生产机械化程度高。铁轭截面为芯柱截面的 $1/\sqrt{3}$ ，芯柱外径与其内孔之比为 $4.5 \sim 6$ 。这种结构的三相磁路对称，可节约硅钢片用量，但空载电流和噪音较大。	过去曾发展过此种结构，现已不采用。
单相辐射式铁芯	图 1—9i	芯柱迭片排列成辐射状，旁轭沿芯柱圆周径向对装，这种结构可降低铁芯总高度，减小结构损耗，但制造费工，空载性能较差。	特大型变压器和高压并联电抗器

选择铁芯结构时，主要是考虑使空载电流和空载损耗小、噪音低、电压波形保持正弦波形。

§ 1—5 电力变压器线圈结构的主要型式

电力变压器线圈结构，主要取决于变压器的容量、额定电压和使用条件。

本节主要叙述同心式线圈的结构型式。

我国生产的电力变压器常用的线圈如图1—10所示，其基本结构特征如表1—3所示。

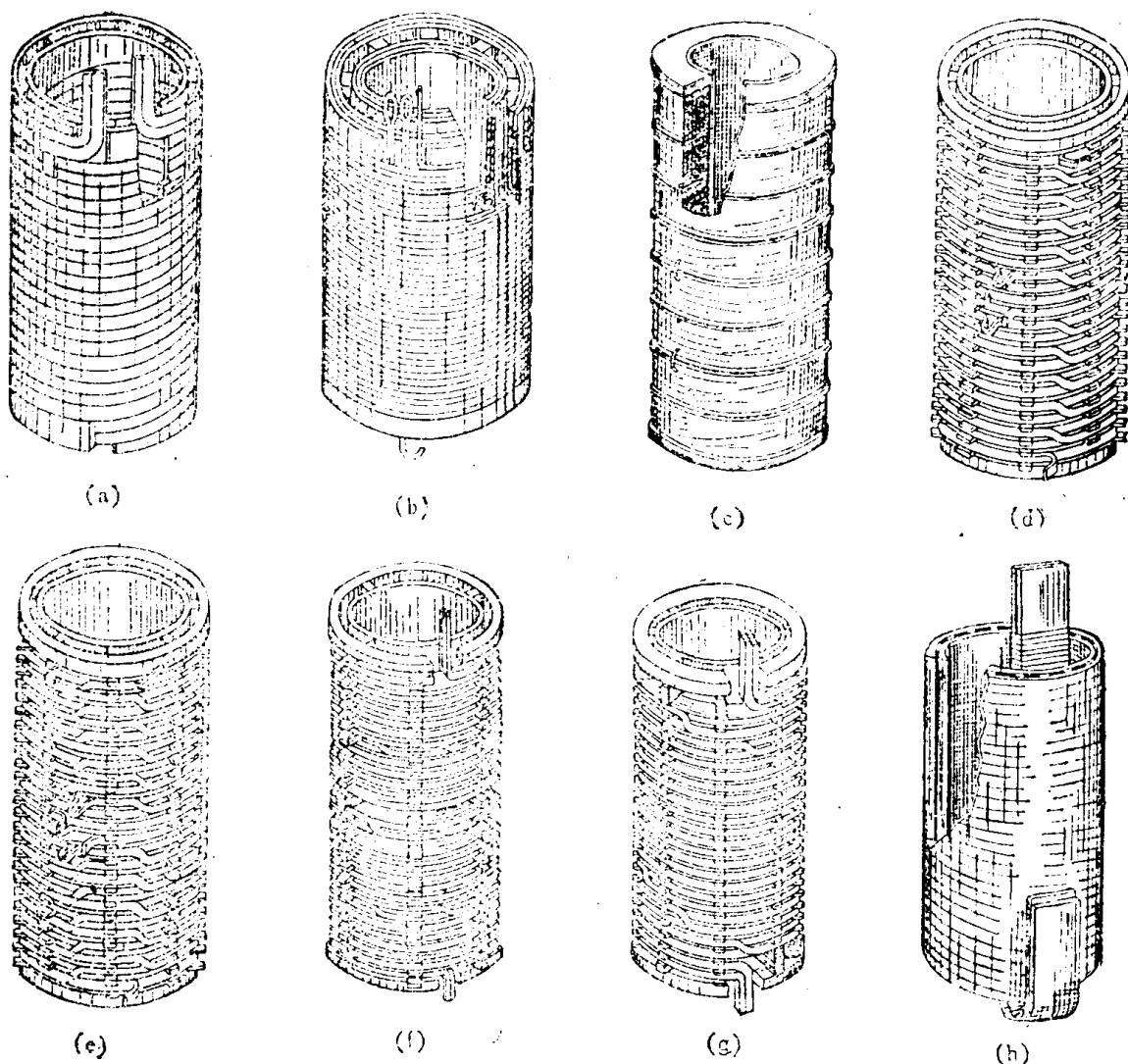


图 1—10 同心式线圈的结构型式

(a) — 双层式; (b) — 多层式; (c) — 分段式; (d) — 连续式;
(e) — 纠结式; (f) — 单螺旋式; (g) — 双螺旋式; (h) — 箔式

表 1—3 常用线圈的基本特征和应用范围

型 式	图 号	结 构 特 征	应 用 范 围
层 (圆筒) 式 (单层、 双层、多层)	图1—10a 图1—10b	同心式线圈的最简单型式。工艺性能好, 便于绕制, 层间油道散热效率高, 但端部支撑的稳定性较差。低压线圈用1~6根扁导线并绕而成。高压线圈用圆导线 (或扁导线) 在绝缘筒 (或固定于绝缘筒上的撑条) 上绕成。35千伏高压线圈为了使起始电压分布均匀, 在线圈内层放置静电屏, 与线圈端相连接。层间绝缘为电缆纸或油道。线圈两端用绝缘件填平。	一般用于三相容量为500千伏安及以下, 电压为1千伏的低压线圈 一般用于三相容量为500千伏安及以下, 电压为3~15千伏的线圈, 如放置静电屏, 则可用于35千伏的高压线圈。
分 段 式	图1—10c	相当于将多层层式线圈沿轴向分成若干线段组成。线段间放置绝缘纸圈。这种线圈可降低层间绝缘所承受的工作电压, 但制造工艺比层式复杂。	电压互感器或高压试验变压器的高压线圈。
连 续 式	图1—10d	能在很大范围内适应容量和电压的要求, 机械强度高, 但较费工。由1~6根扁导线在固定于绝缘筒或置于绕线模的撑条上并绕成饼状线段, 线段间的联接如1—11所示。线段数通常为偶数, 段间用油道或纸圈交错隔开, 两端有油道和绝缘圈。	可用于三相容量为630千伏安及以上, 电压为3~110千伏的线圈。线段间用油道和纸圈交错隔开时, 可用于三相容量为630~6300千伏安, 电压为3~35千伏的线圈。
纠 结 式	图1—10e	与连续式相似, 但焊接头较多。线匝由一根导线组成时, 用两根导线并绕, 由两根导线并绕组成时, 用四根导线并绕, 为增大匝间电容, 改善在冲击电压作用下的起始电压分布, 线圈不是依次排列, 而是交叉纠结相联接, 如图1—12所示。	可用于三相容量为6300千伏安及以上, 电压为110~303千伏的线圈。

螺旋式	图1—10 f及g	外形与连续式相似，其一匝相当于连续式的一段（单螺旋式）、二段（双螺旋式）或四段（四螺旋式）。绕制简便，但由于线圈高度的限制，匝数稍多的线圈不能采用。	可用于三相容量为800千伏安以上，电压为35千伏及以下的大电流线圈和有载调压变压器的调压线圈。
箱式	图1—10h	与多层层式相似，但每一层为一匝，箱的宽度等于线圈的高度。这种线圈具有空间利用率高，可自动绕制，生产效率高优点。	可用于中小型变压器线圈

对于 60 千伏及以上的高压线圈采用饼式线圈，包括连续式、纠结连续式与纠结式，其线端均设有静电环。中性点的绝缘水平为60千伏及以上时也必须装有静电环。为了降低沿撑条的场强，纠结式线圈应根据每段匝数决定引出线的位置。纠结式线圈的油道可分为向外油道和向内油道，如图 1—13所示。向外油道与向内油道承受的冲击电压梯度不同，向内油道约承受 1.5 倍向外油道的冲击电压梯度。当冲击电压梯度较小时，

油道尺寸应根据温升条件决定。

对于电压等级相同的中压线圈与高压线圈不能采用同一纵绝缘结构，因为线圈位于外部，对地电容比位于内部时小，故中压线圈中的冲击电压分布状况要差，因此中压线圈的纵绝缘应加强。

35及60千伏级的中压线圈一般采用连续式结构。60千伏级的中压线圈两端应加静电环。

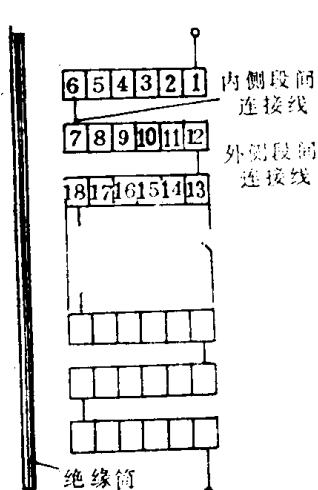


图1—11 连续式线圈段间连接

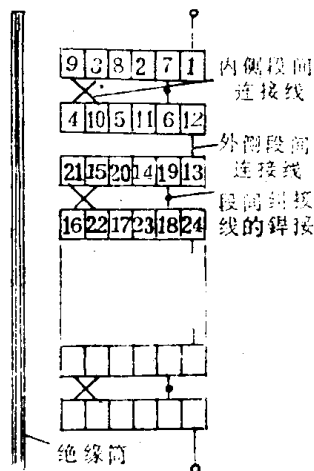
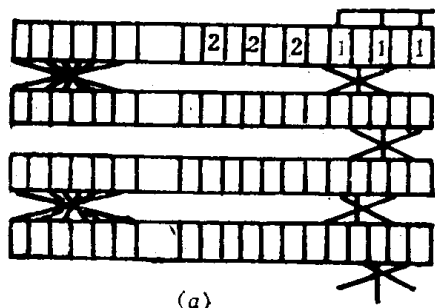
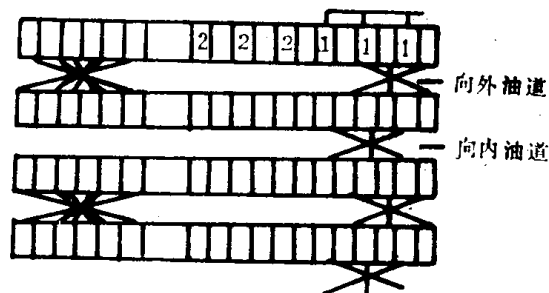


图1—12 纠结式线圈段间连接



(a)



(b)

图1—13 三根并绕插花纠结式线圈示意图

(a) 单一单纠结； (b) 双一双纠结

110 千伏级中压线圈则根据并联导线根数决定线圈型式。容量越大，每匝电势越高，匝数就越少，但并联根数增多。小容量的110千伏线圈导线为2根并联及以下时，则采用纠结连续式。当线圈导线为3与4根并联时可采用插入电容式结构（图1—14）。线圈采用插入电容式结构时也应注意有向内、向外油道的差别。内屏蔽线的外部换位处与线段内部换位处的电位相同，故屏蔽线可不与线圈相连接。

当110千伏级中压线圈导线具有5根以上并联时，由于线段匝数不多，可选用螺旋式线圈。

当采用连续式线圈作为低压线圈时，因为它一般均位于内部，故散热较外部线圈困

难，因此，选用电流密度时要注意这一特点。另外，高压线圈内一般有分接线段作为调整电压之用，同时由于纵绝缘的要求，油道有一定的排列方式，而低压线圈的油道大小则要从安匝平衡上来选用。

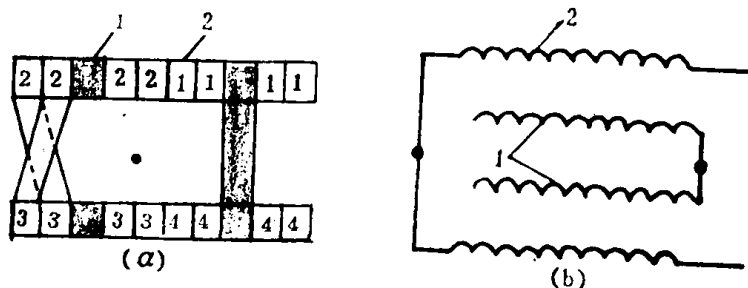


图 1—14 插入电容式线圈连接图

(a)一段间连接；(b)一接线图；1—屏蔽线匝；2—工作线匝
螺旋间要换位。四螺旋式线圈实际上是二个双螺旋式线圈在轴向相邻绕制而成。

中小容量的变压器采用单螺旋式低压线圈时，如冷却条件允许，可设计成半螺旋式线圈，即沿着线圈的轴向，将油道与纸圈间隔地放置。螺旋式低压线圈可用于数十万千伏安容量的变压器中。

选择线圈结构时，还必须注意到线圈在各种过电压作用下，以及线圈遭受突发短路电流作用时，应具有必要的绝缘强度和足够的机械稳定性。

§ 1—6 油箱及散热器结构的主要型式

根据油箱的制造工艺，一般有两种主要结构型式：长方形油箱和椭圆形油箱。

椭圆形油箱有两种基本型式：平顶式（图 1—15）和拱顶式（图 1—16）。前者箱沿设在顶部，箱盖是平的，多用于6300千伏安及以下的变压器中；后者箱沿设在下部，上节箱身做成钟罩形，又称为钟罩式油箱，多用于8000千伏安及以上的变压器中。拱顶油箱的机械强度好，大型变压器的拱顶油箱可用6~10毫米的钢板制造，这样油箱重量可以减轻；而平顶油箱箱盖则须用20~30毫米的钢板制造。检查器身时，拱顶油箱只须吊起上节箱身，不象平顶油箱那样要吊起器身，因而所用起吊设备较简单。

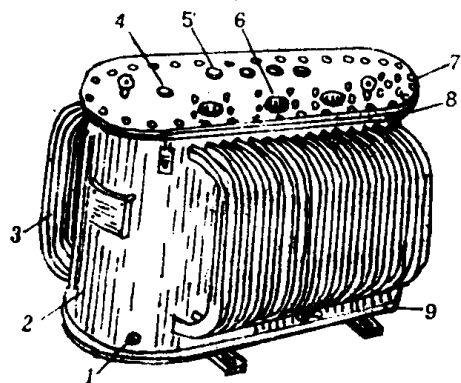


图 1—15 平顶油箱

1—放油塞座；2—箱壁；3—扁管；4—分接开关孔；5—低压套管孔；6—高压套管孔；7—箱盖；8—箱沿；9—箱底

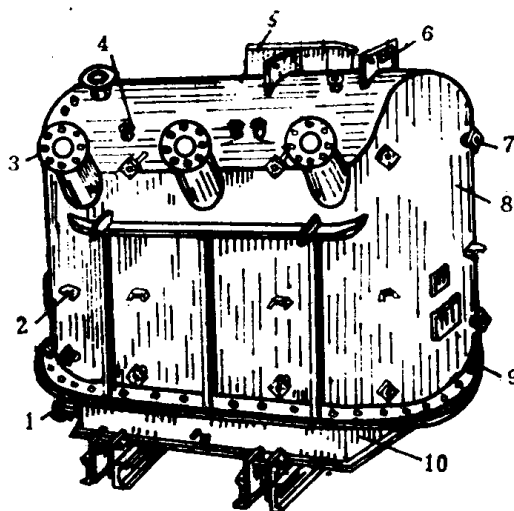


图 1—16 拱顶油箱

1—放油阀门座；2—风扇装置支架；3—高压套管升高座；4—分接开关座；5—低压套管升高座；6—储油柜支板；7—散热器联管头；8—上节箱身；9—箱沿；10—下节箱底

油箱不仅是变压器的容器，还是散热装置的一个组成部分，同时又可利用油箱作器身处理装置。因此，油箱应具备足够的机械强度。椭圆形油箱的机械强度比长方形油箱高。当箱体机械强度不够时，应在箱壁上焊以加强铁来提高。

油箱结构随容量增大而有所改变，电磁损耗的增加与容量的 $3/4$ 次方成正比，而冷却表面的增加与容量的 $1/2$ 次方成正比，即损耗的增加超过了冷却表面的自然增加。因此，为了使大容量变压器和小容量变压器具有同一水平的油温升和线圈温升，必须加强大容量变压器油的冷却，即必须加装散热装置。

中小型变压器采用油浸自冷式，容量为50千伏安左右的配电变压器一般采用平滑油箱，即光靠油箱散热就能满足要求。容量再大一些的配电变压器均采用管式油箱或在油箱上加装片式散热器，靠油管或片式散热器的冷却面来满足要求。国外也有采用波纹油箱结构的。波纹油箱借助于波纹箱壁来增加冷却表面，波纹散热片一般可膨胀。这样，变压器就可制成不需要储油柜的全密封式结构。在管式油箱中，当焊有数排油管时，各层油管的散热效果是不同的，外排油管的散热效率要比里面各排油管高，为了充分发挥冷却效能，管式油箱最多焊有三排油管。当需要更多的冷却表面时就要采用散热器（图1—3中的9）。为了减少用油量，现在都采用扁管散热器或片式散热器。

为了便于运输，散热器被制造成拆卸式的，它通过上下两个联管头与油箱相联接。

当容量在8000千伏安左右时，一般都要采用油浸风冷式的冷却结构，这是因为光靠散热器也不能把油温降到规定值。此时，靠吹风来进一步散热。吹风散热器可比自冷散热器少装一些，但是需要附加电源供风扇用。当容量达到50000千伏安左右时，即便采用吹风式散热器也不能满足所需的散热面的要求时，就需要采用与油箱分开的，安装在其近旁的冷却器，包括风冷却器与水冷却器。油循环是靠潜油泵来实现的，泵将热油从油箱内抽出送入冷却器，经冷却后又回入油箱。

风冷式散热器在吹风停止时，或风冷、水冷的强迫油循环停止时就不能按额定容量运行，这主要是冷却效果降低所致。

当采用强迫油循环水冷时，应注意不能使水漏入油中。在采用这种冷却结构时，油压常大于水压。另外，当变压器退出运行时，应在退出运行后先切除水源，再停止潜油泵的运行。在变压器投入运行时，应先投水源，再投入潜油泵，并使冷却器运行后再投入负载。为了避免水冻结，水冷却器一般应装在零度以上的室内。

§ 1—7 变压器计算的一般程序

电力变压器电磁计算的任务在于确定变压器的电、磁负载和主要几何尺寸，计算性能数据和各部分的温升以及计算变压器的重量、外型尺寸和比较合理的经济效果。计算结果必须满足国家标准及有关技术标准的规定和使用部门的要求。

变压器计算应根据产品设计技术任务书中给定的数据进行。

计算的一般程序如下：

1. 确定硅钢片品种、牌号及铁芯结构型式，计算铁芯柱直径，选定标准直径，得出铁芯柱和铁轭截面积（见第三章）；
2. 根据硅钢片牌号，初选铁芯柱中的磁通密度，计算每匝电势（见第四章）；