

城镇(农村) 工矿企业电工培训教材

(高级工)

电机检修

山西省电力工业局 编

中国电力出版社

城镇（农村）工矿企业电工 培训教材编审委员会

名誉主任：卞学海 李振生
主任：刘润来
常务副主任：郭连邦
副主任：程忠智 宗健 徐奇
贺至刚 张克让 王靖中
杨定鑫 程纪奎 顾希衍
王文杰 郑承平 刘玉柱
委员：周新 郭林虎 李禄
阎刘生 乔文普 李波
吴秀初 杨忠 卫克俭
苑连池 杨德水
办公室主任：杨定鑫（兼）
办公室副主任：乔文普 陈涛 姜丽敏
郭林虎
办公室工作人员：曹璘 王荣辉 罗琳

《电机检修》(高级工)编写人员

主 编：张志毅

参 编：王国仁 薛建东 郑惠萍 罗韬

前 言

根据原电力部教育工作会议的精神和中电联教培部《关于电力工业培训教材建设工作的意见》，在部领导的关怀下，山西省电力工业局和中国电力出版社经协商研究后，决定编写出版这套《城镇（农村）工矿企业电工培训教材》。

我国工矿企业和农村，目前约有 300 万电工在从事电力设施的安装、检修、运行维护和试验工作，他们是建设和发展供用电事业，维护供用电设施安全的一支重要生力军。随着我国电力事业的不断发展和电力科学技术的进步，对这支生力军的整体素质也相应地提出了更高的要求。为此，编写一套适用于城镇（农村）工矿企业电工培训学习的教材，是当务之急，也是我们电力管理和电力出版部门义不容辞的责任。

本套丛书的内容覆盖了变配电设备运行、检修、安装，供电线路施工、运行、检修，电机检修，电气试验，电气仪表及内线工程施工和检修等 8 个工种对初、中、高级工的技术要求，每个工种分初、中、高级工 3 个分册出版，共 24 个分册。

在编写本套丛书的过程中，着重根据工人技术等级标准中对每一工种的定义、工作内容、技术等级、适用范围等的规定，紧扣标准提出的知识要求和技能要求，从生产实际需要出发拟出初步的编写提纲；经数月重点调查研究、广泛征求意见、认真修订后形成正式的编写提纲；之后，又历时半

年余，始成初稿。初稿形成后，在局系统内进行了专家审稿和主编者的修改、统稿工作。因此，定稿后的培训教材，深信是紧扣工人技术等级标准的实用性教材。

城镇（农村）工矿企业电工培训教材，体现了工人技术培训的特点以及理论联系实际的原则，尽量反映了新技术、新设备、新工艺、新材料、新经验和新方法，其内容涉及电压等级从高压 110kV 到 3kV，低压 500V 及以下电工所需的技术基础知识和技能知识。与每一工种对应的初、中、高级工 3 个分册，自成一个小的系列，呈阶梯式递进，内容上互不重复。每一分册的具体内容又分为核心内容和复习题两大部分。核心内容主要讲解必备知识以及与技能要求对应的一些专业知识。复习题的形式多种多样，解答习题的目的在于巩固和深化所学知识。

本分册是《电机检修》高级工培训教材，全部内容共七章。全书由张志毅主编，俞少明、王晋生主审，参编为王国仁、薛建东、郑惠萍、罗韬。

在编写这套丛书的过程中，得到了原电力工业部领导的关怀以及中电联教培部和各有关司局的关心、支持，同时也取得了全国电力系统各有关单位和人员的关注、支持和帮助，他们为本书提供了咨询、技术资料以及许多宝贵的建议，在此一并表示衷心感谢。

各单位和广大读者在使用本套教材过程中，如发现有不妥之处或有需要修改的意见，敬请随时函告，以便再版时修改。

山西省电力工业局 中国电力出版社

1998 年 4 月

目 录

前 言

第一章 变压器的一般设计原则与

制造工艺 1

第一节 变压器的一般设计原则 1

第二节 变压器的制造工艺 18

复习题 23

第二章 变压器的运行分析和保护的

基本原理 25

第一节 系统异常运行对变压器的影响 25

第二节 变压器的过热和噪声 33

第三节 变压器的过电压 36

第四节 变压器保护的基本原理 46

复习题 63

第三章 变压器绕组的更换 67

第一节 更换绕组的原因 67

第二节 更换绕组前的准备工作 68

第三节 更换绕组的工艺程序 73

复习题 80

第四章 电机一般设计原则和制造工艺 82

第一节 电机的一般设计原则 82

第二节 异步电机制造工艺 92

复习题 103

第五章 电动机的运行分析和电动机保护	
的基本原理	106
第一节 系统异常运行对电动机的影响	106
第二节 电动机的过热、振动和杂声	114
第三节 电动机保护的基本原理	126
复习题	137
第六章 交直流换流器谐波源及其谐波	
限制措施	141
第一节 交直流换流器谐波源	141
第二节 谐波对电力系统及用户负载的危害	149
第三节 谐波的限制措施	155
复习题	165
第七章 检修质量管理与监督验收	167
第一节 设备检修组织管理	167
第二节 设备检修的质量管理	169
第三节 设备检修监督检查与验收	173
复习题	176
参考文献	177

变压器的一般设计 原则与制造工艺

第一节 变压器的一般设计原则

一、概述

变压器的设计工作应根据国家经济、技术政策和资源情况以及运行和制造方面的要求，合理地制定变压器的性能数据和相应的结构。

变压器的设计计算包括电磁计算和结构设计。电磁计算的任务在于确定变压器的重量和外形尺寸；结构设计任务在于选定结构型式，绘制全部零件部件图。结构设计应特别注意保证绕组的绝缘强度，动、热稳定，保证铁芯、油箱等部件的机械强度，使变压器安全运行。同时应使整体结构及零部件的制造符合节省材料和工时，便于运输、安装和维护等要求。结构与电磁计算是交错进行的。本节只介绍与检修有关部分的一般设计原则，供了解变压器结构用。

二、铁芯设计

1. 铁芯柱直径和磁通密度的选择

铁芯柱直径是影响变压器性能和成本的主要尺寸之一。铁芯柱直径选得大，铁芯硅钢片的重量增大，而绕组导线重量、空载损耗和空载电流将相应减小。为满足一定的损耗和

阻抗电压的要求，通常可按下式计算

$$D_z = K_D \sqrt[4]{S_z} \quad (1-1)$$

式中 S_z ——变压器每柱容量，kVA；

K_D ——经验系数；

D_z ——铁芯柱直径，mm。

不同类型变压器的 S_z 与额定容量 S_N 的关系以及相应的 K_D 如表 1-1 所示。

表 1-1 变压器每柱容量与经验系数

变压器类别	每柱容量 S_z (kVA)	K_D	
		冷轧片	热轧片
三相双绕组	$\frac{1}{3}S_N$	铝绕组 50~56 铜绕组 54~60	铝绕组 54~60 铜绕组 58~64
三相三绕组	$\frac{1}{2}S_N$		
单相双绕组*	$\frac{1}{2}S_N$		
单相三绕组	$\frac{3}{4}S_N$		
三相自耦* ($K_{xy}=0.5$)	$\frac{1}{4}S_N$	铜绕组 54~60	铜绕组 58~64
单相自耦* ($K_{xy}=0.5$)	$\frac{3}{8}S_N$		

注 * 表示铁芯为单相双柱式结构。

K_{xy} 表示有第三绕组时，每柱容量与自耦变压器额定容量的比值。

铁芯磁通密度的选择关系到硅钢片的充分利用和变压器的性能。由于硅钢片具有磁饱和特性，磁通密度选的过高，将导致空载损耗和空载电流的增大。因此，铁芯磁通密度 B_z 一般采用下列数值：

冷轧硅钢片 $B_z \leq 1.7T$

热轧硅钢片 $B_z \leq 1.45T$

2. 铁芯柱和铁轭截面的设计

铁芯柱截面的设计要求从节约材料和简化工艺两方面考虑。为了充分利用绕组内圆空间，芯式铁芯的铁芯柱截面常采用多级梯形，如图 1-1 所示。

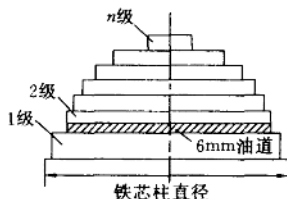


图 1-1 多级梯形铁芯柱截面

铁芯柱截面的合理级数可参照表 1-2 选取。

表 1-2 铁芯柱截面级数的选择

铁芯柱直径 (mm)	级 数	铁芯柱直径 (mm)	级 数
80~195	5~7	400~740	12~14
200~265	8~10	760 以上	>15
270~390	11		

铁芯柱多级梯形截面的有效面积（不包括油道）乘以叠片系数，即为铁芯柱的有效面积。0.35mm 硅钢片，无漆膜绝缘时，叠片系数可取 0.94~0.95；有漆膜时则可取 0.93~0.94。0.35mm 热轧硅钢片，有漆膜绝缘时取 0.91~0.92。

为了改善铁芯内部的散热条件，铁芯柱直径为 380mm 及以上时，须设置冷却油道。油道数可按表 1-3 选取，油道的位置应使其分割的各部分铁芯柱截面积近似相等。

表 1-3

冷却油道数的选择

铁芯柱直径 (mm)	6mm 油道个数		铁芯柱直径 (mm)	6mm 油道个数	
	冷轧片 $p_{15/50}=1.1$	热轧片 $p_{10/50}=1.05$		冷轧片 $p_{15/50}=1.1$	热轧片 $p_{10/50}=1.05$
380~410	0	1	640~680	2	3
420~500	1	2	700~840	3	—
520~620	2	2			

3. 铁芯叠积图

用冷轧硅钢片制造的铁芯，铁轭截面与铁芯柱截面形状相同。磁通在铁轭中的分布较均匀。用热轧硅钢片制造的铁芯，为了使夹件、绝缘零件等结构简化，铁轭截面一般多采用矩形或 T 形。为了降低空载电流和空载损耗，往往使铁轭截面比铁芯柱截面放大 5%~10%。

由于硅钢片的导磁性能具有方向性，即顺着材料辗压方向的导磁性能最好，垂直材料辗压方向的导磁性能就明显变差。冷轧硅钢片的方向性比热轧硅钢片的更为明显。为了避免磁通转向时垂直于辗压方向，冷轧硅钢片铁芯接缝宜采取 45° 的斜接缝。热轧硅钢片可采取直接缝。但由于斜接缝叠片的剪切工艺装备比较复杂，有些也采用半直半斜接缝，如图 1-2 所示。

图 1-2 所示为一层叠片的接缝位置，相邻层叠片的接缝位置应使此图上下倒置，即可使叠装后相邻两层叠片的接缝相互错开。

4. 空载性能计算

空载性能包括空载损耗和空载电流，两者与铁芯结构型式、所用硅钢片质量、磁通密度和铁芯重量有关。空载损耗为

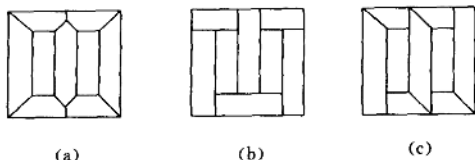


图 1-2 三相铁芯叠积图

(a) 斜接缝; (b) 直接缝; (c) 半直半斜

$$P_0 = K_{fz}(P_z G_z + P_E G_E) \quad (1-2)$$

式中 K_{fz} ——附加损耗系数, 一般可在 1.2~2 范围内选取;

P_z 、 P_E ——对应于铁芯柱、铁轭磁通密度 B_z 、 B_E 的单位损耗, W/kg;

G_z 、 G_E ——铁芯柱、铁轭的重量, kg;

P_0 ——铁芯空载损耗, W。

空载电流为

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \%$$

$$I_{0a} = \frac{P_0}{10S_N} \%$$

$$I_{0r} = \frac{K_1}{10S_N} (q_z G_E + q_E G_E + n_z q_{zE} A_z + n_E q_{zE} A_E) \% \quad (1-3)$$

式中 K_1 ——校正系数, 根据所用材料和工艺确定;

q_z 、 q_E ——对应于 B_z 、 B_E 的单位励磁容量, VA/kg;

q_{zE} 、 q_{zE} ——对应于 B_z 、 B_E 的接缝处单位面积激磁容量, VA/cm²;

A_z 、 A_E ——铁芯柱、铁轭的有效截面, cm²;

n_z 、 n_E ——铁芯柱、铁轭的接缝数;

S_N ——变压器的额定容量, kVA。

5. 夹紧装置和铁芯接地

夹紧装置的设计应考虑下列内容：叠片的夹紧要均匀，避免叠片边沿和接缝处翘起，防止铁芯激磁时，产生不正常的声音；夹件应能承受夹紧铁轭时的夹紧力、吊起整个器身时的重力，以及变压器发生短路时的电磁力。夹件与铁轭之间用绝缘件隔开以降低结构损耗，大中型变压器夹件和铁轭之间须设置油道，以改善散热。铁芯柱须用环氧玻璃粘带绑扎，然后加热固化。

为了防止因静电感应作用在铁芯或其他金属结构件上产生悬浮电位，造成对地放电，铁芯和所有金属结构件（除穿心螺杆外）都必须可靠地接地。铁芯只允许有一点接地，若两点或多点接地，会产生环流，造成局部过热事故。

三、绕组设计

绕组是变压器的最关键的部件，它应具有足够的绝缘强度、机械强度、耐热能力及良好的散热条件。

变压器绕组的型式多种多样。可根据变压器的容量和绕组的电压等级来选择不同的结构形式。一般情况下，三相容量为 630kVA 及以下，电压为 35kV 以下时，多采用圆筒式绕组；三相容量为 630kVA 以上，电压为 35kV 时，多采用连续式绕组；三相容量为 6300kVA 及以上，电压为 110~330kV 时，多采用纠结式绕组。

1. 导线和电流密度的选择

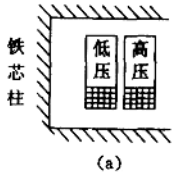
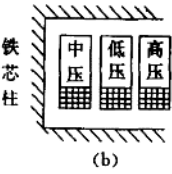
目前，变压器广泛采用铜导线。导线分为漆包圆导线、纸包圆导线和纸包扁导线 3 种。从制造工艺考虑，圆线优于扁线，但圆线空间利用率较差。选用扁导线时应注意导线截面的宽厚比。通常，扁导线的宽度小于或等于 16mm，厚度小于或等于 5.6mm，其宽厚之比一般为：圆筒式 1.5~3，连续纠结式 2.5~5。

绕组电流密度与短路损耗、温升以及变压器二次侧突发短路时的动、热稳定有关，其极限值根据动、热稳定的要求确定。通常铝导线的电流密度取 $1.6 \sim 2.1 \text{ A/mm}^2$ ，铜导线则取 $3.0 \sim 4.0 \text{ A/mm}^2$ 。

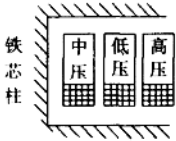
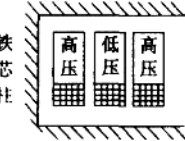
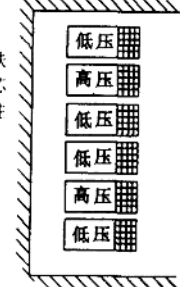
2. 绕组的排列

绕组的排列方式主要考虑电抗电压、出线方便、绝缘结构合理等因素，特大型变压器的绕组排列还关系到变压器的高度和质量等问题。绕组的排列方式有同心式和交叠式两种。同心式排列的双绕组变压器，一般低压绕组放在里面，因它与铁芯所需的绝缘距离比较小，有利于缩小绕组尺寸。高压绕组套在外面，因分接头一般设置在高压绕组上，这样出线方便。交叠式排列的高低电压绕组是沿高度方向互相交叠放置的。其优点是机械强度好，出线的布置和焊接较方便。交叠式常用于电炉变压器。常用的绕组排列方式见表 1-4。

表 1-4 常用的绕组排列方式

绕组排列方式	示意图	适用范围
同心式	 (a)	用于双绕组变压器、特种变压器。当低压绕组电流较大时，为了便于出线，也可将低压绕组放在外面
	 (b)	用于三绕组升压、变压器或电力自耦变压器。当从低压向高压和中压侧送电时，阻抗电压较小

续表

绕组排列方式	示意图	适用范围
同心式	 (c)	用于三绕组降压变压器或电力自耦变压器。当电能主要是从高压送向中压时阻抗电压较小
双同心式	 (d)	用于特大型双绕组变压器。可以减轻重量，降低高度，便于运输，但此时短路损耗和空载损耗的比值将增大，硅钢片与导线的重量比将减小
多同心式	 (e)	
交叠式	 (f)	用于电炉变压器 左图仅表示交叠式排列的一例，其磁动势平衡组数等于4

3. 绕组的漏磁和换位

绕组漏磁的大小与绕组排列方式关系密切。如绕组为双同心式排列式，漏磁比一般同心式排列要小，多同心式排列则更小，漏磁增加会导致涡流损耗、结构损耗以及短路电磁力增加，使变压器阻抗电压增加。图 1-3 所示为绕组同心式排列且磁动势分布匀称时的漏磁分布和电磁力示意图。漏磁通

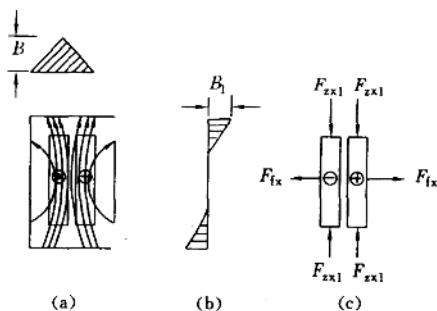


图 1-3 绕组同心式排列、磁动势分布
匀称时的漏磁和电磁力

(a) 漏磁场图形及纵向漏磁通密度 B ；(b) 绕组端部磁力
线弯曲引起的横向漏磁通 B_1 ；(c) 对于漏磁通密度

B 和 B_1 的轴向力 F_{xx} 及辐向力 F_{tx}

包括：磁通密度为 B 的纵向漏磁通和由绕组端部磁力线弯曲引起的磁通密度为 B_1 的横向漏磁通，电磁力 F_{xx} 和 F_{tx} 分别为对应于 B 和 B_1 的轴向力和辐向力。当磁动势分布不均匀时，还将产生磁通密度为 B_2 的横向漏磁通。纵向漏磁通与绕组的几何尺寸和绕组间主绝缘距离有关，它随着变压器容量的增大和电压的提高而增加；漏磁通为 B_1 的横向漏磁通随着绕组高度和两绕组漏磁场总宽度的比值而变化，比值增大，漏磁通减小。漏磁通为 B_2 的横向漏磁通，是由于变换高压绕组中

调压线段分接等原因，造成高低压绕组间磁动势不平衡而产生的。对于三相容量为 8000kVA 及以上连续式或纠结式高压绕组，如果有调压线段，或端部线段的匝数较少，或段间有放大油道时，可将低压绕组中对应于上述部位的段（匝）间油道放大，即可使该磁动势适当减少，从而使高、低压磁动势分布比较匀称。

变压器绕组的线匝经常采用数根导线并列组成，由于各根并联的导线在漏磁场中所处的位置不同，感应的电动势不相等，导线的长度往往也不同，因而电阻也不相等，两者都会使各根并联的导线间产生循环电流，从而导致损耗增加。为此，并联导线间必须进行换位或采用换位导线。圆筒式绕组通常在每层中部进行换位，连续式或纠结式通常在线段间进行换位。换位导线型号为 QQLBH，它是由多根（奇数）漆包扁线排成两列并联而成，两列间各根扁线按双螺旋式绕组的换位方法连续进行换位，其换位节距随导线的宽度大小而不同，一般取 75~200mm。两列扁线间通常衬有绝缘纸，整个换位导线外包绝缘。

四、绝缘结构

变压器的绝缘分为外绝缘和内绝缘两大类。外绝缘包括套管本身的外部绝缘和套管相间以及套管对地绝缘。内绝缘又分为主绝缘和纵绝缘。主绝缘是绕组（或引线）对地、对异相或同相其他绕组（或引线）之间的绝缘；纵绝缘则是同一线圈上各点之间或其相应引线之间的绝缘。

绝缘设计是根据国家标准规定的试验电压和冲击电压作用下绕组内电压的分布情况进行的。选取变压器绝缘结构和数据要有一定的裕度。图 1-4 所示为 110kV 变压器主绝缘结构。三相容量为 20000kVA 及以下时，采用端部出线结构。