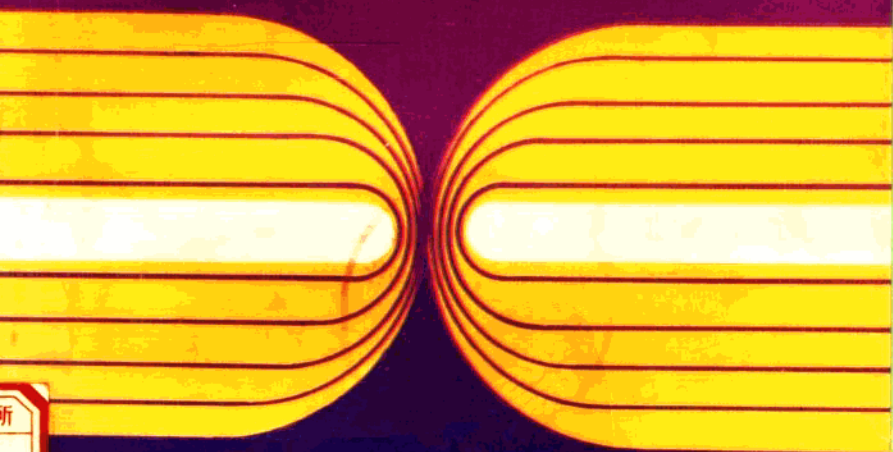


高压互感器 的绝缘试验

张古银 郭守贤 编著



上海科学技术文献出版社

前 言

随着电网电压等级的不断提高，电力系统中高压互感器绝缘事故也越发多起来了。这类事故往往造成爆炸、火灾和大面积停电，损失十分严重。因此，如何通过绝缘试验有效地发现高压电流互感器和高压电压互感器的绝缘缺陷，预防发生高压互感器的绝缘事故，无疑是绝缘监测工作的重要任务。

近年来，我们根据在现场进行的大量试验和研究所积累的资料，编写了一本关于高压互感器绝缘试验方法的小册子（内部发行）。这本小册子很快就受到了从事绝缘试验的技术人员和工人的普遍欢迎。本书就是在这本小册子的基础上，经过修改、充实、提高，并参阅国内外有关资料编写的。

本书第一、二章由张古银执笔，第三至五章由郭守贤执笔；全书由郭守贤统稿。

囿于我们的专业水平，加上时间仓促，书中谬误不当之处在所难免，热忱希望读者给予批评指正。

作 者

目 录

第一章 高压互感器简介.....	1
第一节 电流互感器.....	2
第二节 电压互感器	11
第二章 绝缘电阻和介质损耗因数的测量	22
第一节 绝缘电阻的测量	22
第二节 介质损耗因数 ($\tan\delta$) 的测量.....	23
第三章 局部放电的测量.....	113
第一节 局部放电的概念.....	113
第二节 测量局部放电的基本方法.....	122
第三节 互感器的现场局部放电测量.....	134
第四节 互感器局部放电图谱和测量结果的判断.....	146
第四章 交流耐压试验.....	157
第一节 交流耐压试验的基本线路.....	157
第二节 电流互感器的交流耐压试验.....	165
第三节 电压互感器的交流耐压试验.....	168
第五章 冲击电压试验.....	179
第一节 概述.....	179
第二节 冲击电压发生器.....	184
第三节 互感器的冲击试验方法.....	225
附录1 互感器局部放电测量 (GB 5583—85)	227
附录2 不同球径球隙距离与放电电压的关系	233

第一章 高压互感器简介

为了测量高压电路中的电压和电流，通常采用电压互感器和电流互感器，其原理接线如图 1.1 所示。

电压互感器是一种特殊的变压器，它的一次线圈（原线圈）与被测的一次电路并联，二次线圈（副线圈）与测量仪表和继电器的电压线圈并联。二次线圈的额定电压为 100 伏或 $100/\sqrt{3}$ 伏（国外也有 200 伏的）。电压互感器有电磁式和电容式两种。电磁式广泛用于交流 35~220 千伏系统，电容式多用于 110~500 千伏系统。

电流互感器又称变流器，它的一次线圈串联于被测的一次电路，二次线圈与测量仪表或继电器的电流线圈串联，二次侧的额定电流一般为 5 安或 1 安。

此外，还有组合式互感器，能同时测量电压和电流。

高压互感器在电路中有如下作用：

(1) 使测量仪表、继电器等二次设备与高电压隔离，以保证人身和设备的安全；

(2) 使测量仪表和继电器标准化和小型化，并可采用小截面的控制电缆或导线进行连接，使仪表盘和保护盘布线简单、安装方便；

(3) 当电路上发生短路时，保护测量仪表的电流线圈，使其不因系统流过太电流而损坏。

为了保证工作人员在接触测量仪表和继电器时的安全，互感器二次线圈接地必须可靠。这样，万一互感器一、二次线圈间的绝缘损坏，可防止高电压加到测量仪表和继电器上，危及

工作人员的安全。

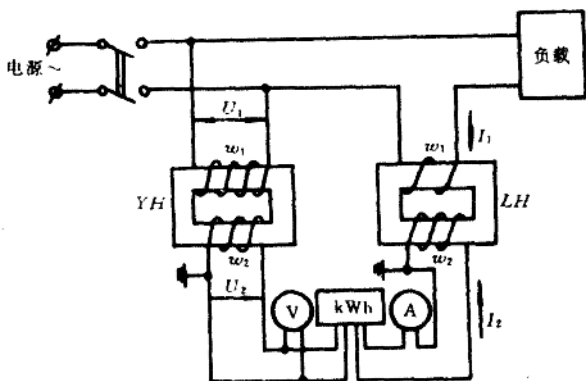


图 1.1 电流和电压互感器的原理接线

U_1 、一次电压； U_2 、二次电压； I_1 、一次电流； I_2 、二次电流；
 w_1 、一次线圈； w_2 、二次线圈；A、电流表；V、电压表；
kWh、电度表；YH、电压互感器；LH、电流互感器

第一节 电流互感器

一、电磁式电流互感器

电流互感器是在高压输配电装置中用来测量电流的。它和变压器一样，由铁芯、初级绕组及次级绕组所组成。高压回路中的电流全部通过它的初级绕组，其额定电流 I_1 常有几百到几千安，这样初级绕组往往有一匝或几匝就够了；而次级绕组的额定电流 I_2 常规定为 5 安或 1 安，因而其匝数较多。电流互感器常常有几个独立的次级绕组，它们分别与仪表和继电保护装置等相连接。为了满足不同的测量要求，有的互感器具有多个铁芯。

电流互感器的初级绕组与被测电流的高压导线相串联，处

于高电位，而次级绕组则与测量仪表等相连接，处于低电位，所以在初、次级绕组之间有很高的电位差。为了测量的安全，次级绕组的一端常是接地的。与变电站里其他设备一样，互感器的绝缘有时也受到各种操作过电压及大气过电压的作用。

额定电压不太高（如 10~20 千伏）的电流互感器常用环氧树脂浇注绝缘。35 千伏以上的电流互感器大多采用绝缘性能良好的油纸绝缘。35~110 千伏级电流互感器常采用“8”字形（链形）结构，次级绕组在环形铁芯上，而初级绕组构成另外一个环形，这两个环像“8”字形（链形）那样彼此串起来，在每个环上都以电缆纸带包绕很多层，然后一起浸在充满变压器油的瓷套里。

“8”字形结构的绝缘层中的电场很不均匀，再加上包纸带时，由于环内、环外的半径不同，不可能包得很匀称，因而击穿电压较低、分散性大，其工频击穿电压 U_1 （取最低值）与绝缘厚度 d 的关系如图 1.2 所示。国产“8”字形结构的电流互感器的绝缘厚度及其裕度可参看表 1.1。

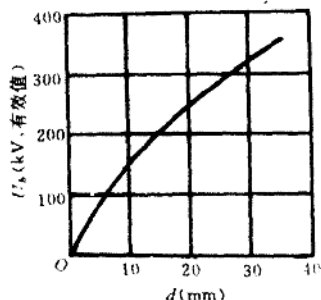


图 1.2 “8”字形结构电流互感器绝缘的工频击穿电压与绝缘厚度的关系

表 1.1 电流互感器的绝缘厚度及裕度

额定电压(kV)	35	60	110
工频试验电压 U_1 (kV)	95	155	250
初级绕组绝缘厚度(mm)	6	8	10
次级绕组绝缘厚度(mm)	6	10	20
绝缘总厚度(mm)	12	18	30
和图 1.2 的 U_1 与 d 的关系曲线相比的裕度 $\frac{U_1}{U_2}$	1.8	1.4	1.3

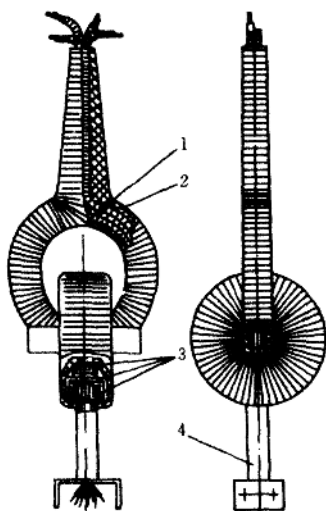


图 1.3 “8”字形绝缘结构

1. 一次线圈; 2. 一次线圈绝缘;
3. 二次线圈及铁芯; 4. 支架

“8”字形结构(图 1.3)主要用于 35~110 千伏的产品,一次线圈套在绕有二次线圈的环形铁芯上,一次线圈和铁芯都包有很厚的电缆纸。通常两者绝缘厚度相等。为了提高外绝缘强度和内绝缘的击穿电压,可使一次线圈绝缘比铁芯绝缘厚些,绝缘试验的电场强度按 8~10 千伏/毫米选取。这种结构绝缘中电场强度不均匀,材料得不到充分利用,一次线圈出线部分绝缘包扎不连续,形成绝缘的薄弱环节,而且绝缘包扎不便于机械化生产,所以不适用于用在更高的电压等级。

图 1.4 所示为电压 110 千伏及以上的串级式电流互感器的原理图、外形图和原理接线图。串级式电流互感器实际上由几个电流互感器相互串联而成。图 1.4(a) 所示为两级串级式电流互感器的原理图,图中(I)级和(II)级相当于两个电流互感器。这种电流互感器的缺点是,由于经过数次变流,而每经过一次变流都要产生一定的误差,因此,总的误差增大。故串级式电流互感器的级数一般以不超过两级为宜。国产 L-110 型串级式电流互感器的外形和原理接线如图 1.4(b) 和图 1.4(c) 所示。它由两个结构上独立的变换单元组成,(I)级副边电流为 20 安,

(Ⅱ)级为20/5安,(Ⅰ)级的副线圈与(Ⅱ)级的原线圈相连接。
 (Ⅰ)级采用叠片式矩形铁芯,装在充油瓷套中,原线圈在上柱,副线圈在下柱。为了减少漏磁,在上、下柱上绕有匝数相等的两个互相串联的平衡线圈,并与铁芯有电气连接。(Ⅱ)级属于低压部分,装在底座内。三组副线圈分别绕在三个环形铁芯上,原线圈穿入三个环形铁芯。

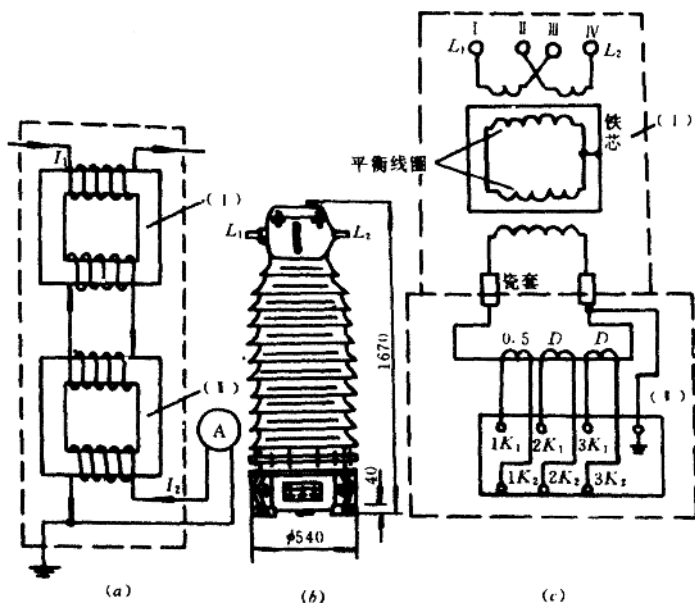


图 1.4 L—110 型串级式电流互感器

(a) 原理图; (b) 外形图; (c) 原理接线图

(Ⅰ)级和(Ⅱ)级的连接,通过瓷箱底部的两个套管实现。

副线圈引出线接线端子上标有接地符号的端子,用以将(I)级的副线圈接地。(I)级原线圈分两组,用以获得两种不同的额定一次电流。原线圈的 L_1 引出端子用小瓷套管与铸铁帽绝缘。 L_2 端子与铁帽有电气连接,因此,铁帽是带电的。铁帽上有油位指示器,用以监视油位。箱底有放油孔。

二、电容型电流互感器

220千伏及以上的电流互感器采用电容型初级绕组并做成“U”字形,主绝缘全部包在初级绕组上,这样纸带容易包得匀称,而且便于实现机械化生产。为进一步改善其电场分布,如同电容式套管那样,在绝缘中布置一定数量的均压极板——电容屏(最外层的屏接地)。在接地电容屏的外面,两侧各套1~2个带有次级绕组的铁芯,如图1.5所示。

电力系统广泛使用的220千伏瓷箱式“U”字型线圈电流互感器如图1.6所示。

如把图1.5中这一系列“U”形电容屏全拉成直线来分析,则在初级绕组的导线与接地电容屏间的电场分布情况和电容式套管完全一致。

为了提高主绝缘的强度,在绝缘中放置一定数量的同心圆形电容屏(最外层电容屏接地),各电容屏间形成一个个串联的电容器,如图1.5,这叫做电缆电容型绝缘。如各相邻电容屏间的电容相等,则其电压分布近于均匀。相邻电容屏间绝缘厚度越小,则绝缘的利用就越好。电容屏数越多,则绝缘中电场强度的分布就越均匀。实际上,电容屏数不能太多,只能做到使电场强度分布得近似均匀。由于电容屏端部的电场不均匀,在高电压作用下,端部会发生局部放电。为了改善端部电场分布情况,可在两层电容屏间增放一些端电屏(短屏),或者放置均压环。

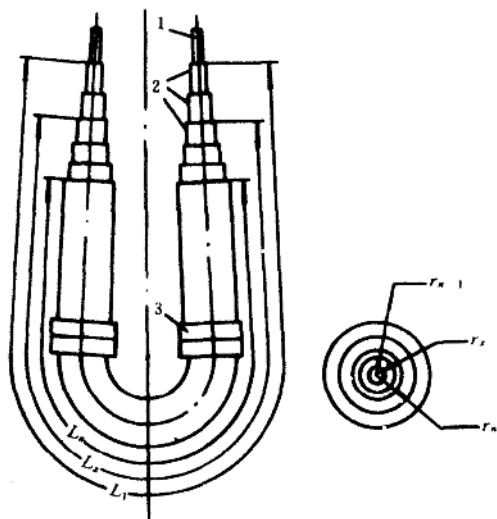


图 1.5 电容型电流互感器结构原理图

1. 初级绕组; 2. 电容屏; 3. 次级绕组及铁芯

电容屏的作用是为了改善轴向及径向电场分布情况,使电场分布较为均匀。电容型电流互感器由于轴向尺寸足够大,因而通常按等厚度原则设计,即取各相邻电容屏间绝缘层的厚度彼此相等,而台阶 λ 长度有些不等,这时各层间的轴向场强将有些不同。

(一) 电容屏的数目及尺寸的选择

选择电容屏时主要应考虑:①在长期工作电压下,绝缘中不发生任何破坏性损伤;②在工频及冲击试验电压下,绝缘中不发生贯穿性击穿或滑闪。

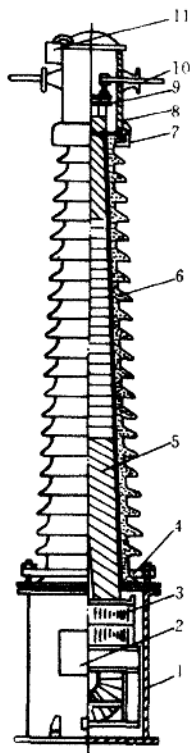


图 1.6 220 千伏瓷箱式
U 字型线圈电流互感器
1. 油箱; 2. 二次接线盒;
3. 环形铁芯及二次线圈;
4. 压圈式卡接装置;
5. “U”字型一次线圈;
6. 瓷套; 7. 均压护罩;
8. 贮油柜; 9. 一次线圈
切换装置; 10. 一次出线
端子; 11. 呼吸器

对有尖锐边缘的电容屏, 在工频一分
钟试验电压(有效值)下的许用场强

$$E \leq 12d^{-0.58} \text{ kV/mm} \quad (1.1)$$

式中 d ——相邻两电容屏间的油纸绝缘
厚度(mm)。

可见极板间绝缘层越薄, 许用场强可
以提高。由于电场的不均匀主要是在电容
屏的边缘处, 所以在电流互感器里, 常在相
邻主电屏间分别插入几个端电屏, 如图
1.7 所示。这样, 主电屏数目可大大减少,
而主电屏边缘处的电场集中现象可被端电
屏所改善。端电屏的长度一般取 200 毫米
左右。

在按式(1.1)估算许用场强时, d 就可
以取包括端电屏在内的各电屏间的绝缘厚
度。 d 一般不小于 0.75 或 1 毫米。



图 1.7 改善电容屏边缘处
电场的一种措施

1. 主电屏; 2. 端电屏

在开始选择电容屏(包括主、端电屏)
数目 n 时, 若近似地从各电屏间的电压相

等来考虑,则

$$n \geq \frac{U_t}{Ed} \quad (1.2)$$

(二) 计算实例

例 1.1 计算 220 千伏油浸纸电容式电流互感器的绝缘结构。设电流比 $4 \times 300/5$ 安,按标准其一分钟工频试验电压为 470 千伏、外绝缘干试验电压为 520 千伏(均为有效值)。试确定电容屏数目和各电容屏的半径及长度。

解 (1) 电容屏数目的确定。此电容型结构按各层最大场强相等、绝缘厚度相等来设计。根据经验,电容屏(包括端电屏在内)间绝缘厚度取 0.8 毫米,由式(1.1),工频一分钟试验电压(有效值)下的许用场强

$$E = 12d^{-0.58} = 12 \times 0.8^{-0.58} = 13.7 \text{ kV/mm}$$

绝缘层数按式(1.2)为

$$n = \frac{U_t}{Ed} = \frac{470}{13.7 \times 0.8} = 42.9 \text{ 层}$$

取 $n = 45$,如以每 5 个屏为一组(1 个主电屏和 4 个端电屏),即共 9 个主电屏,72 个端电屏(两端都有)。

相邻两个主电屏间的绝缘厚度

$$d = 5 \times 0.8 = 4 \text{ mm}$$

主绝缘的总厚度

$$r_s - r_0 = 4 \times 9 = 36 \text{ mm}$$

(2) 各电容屏的半径及长度的确定。导电芯由四组导线组成,外包绝缘筒,从结构图得最里面的电容屏的半径 $r_0 = 3.45$ 厘米,绝缘总厚度为 3.6 厘米,故接地电容屏的半径 $r_s = 3.45 + 3.6 = 7.05$ 厘米。其他各电容屏(主电屏)半径的计算结果并经过调整(台阶须取整数)后的主电屏尺寸如表 1.2 所示。

表 1.2 调整后的主电屏尺寸

屏号 x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
半径 r_x (mm)	3.45	3.85	4.25	4.65	5.05	5.45	5.85	6.25	6.65	7.05
长度 l_x (mm)	469	431	393	361	333	309	285	265	245	225
台阶 λ_x (mm)	—	19	19	16	14	12	12	10	10	10
$r_{x-1}l_x$	—	1487	1513	1534	1548	1560	1553	1550	1531	1496

由表 1.2 可看出, $r_{x-1}l_x$ 的最大值与最小值间的偏差小于 5%, 这对电压的均匀分布影响不大, 因而可以允许。

类似图 1.7 那样, 在每两层相邻主电屏间布置了 4 个端电屏, 其长度取 220 毫米。这些端电屏以彼此间相等的绝缘厚度 d (0.8 毫米) 及相等的台阶长度 $\lambda_x/5$ 而均匀分布于每对相邻的主电屏之间。

每相邻两层主电屏间电容量

$$C_x = \frac{1.94l_x}{\ln \frac{r_x}{r_{x-1}}} \text{ pF}$$

电流互感器的总电容量

$$C_0 = \frac{1}{\sum \frac{1}{C_x}}$$

第 x 层上分到的电压

$$U_x = \frac{C_0}{C_x} U$$

式中的 U 为外施电压。前已列出, 试验电压 (工频一分钟) 为 470 千伏 (有效值), 而最大工作相电压为 $1.15 \times 220/\sqrt{3} = 146$ 千伏 (有效值)。

第 x 层上的径向平均场强 $E_{r,av}$ 及轴向平均场强 $E_{z,av}$ 分别为

$$E_{r,av} = \frac{U_x}{d}, \quad E_{z,av} = \frac{U_x}{\lambda_x}$$

电流互感器的电容量

$$C_0 = \frac{1}{\sum \frac{1}{C_x}} = 858 \text{ pF}$$

从计算结果可以看到,这里各层绝缘的径向场强基本相同,最大值与最小值间的相差不大于5%;但轴向场强不均匀性很大,最大值与最小值之比达1.9,以致台阶总长度长得多,这对油纸电容型电流互感器的还是可以接受的。表1.3是以220千伏电流互感器为例计算的主电屏尺寸及场强分布。

第二节 电压互感器

一、电磁式电压互感器

电压互感器的工作原理、构造和连接方法与电力变压器相似。电磁式电压互感器的原理接线图可参见图1.1。

图1.8所示为油浸式单相电压互感器(JDJ-10)的外形结构。它的铁芯和线圈浸在充有变压器油的箱内,线圈通过固定在箱盖上的瓷套管引出;用于户内配电装置。

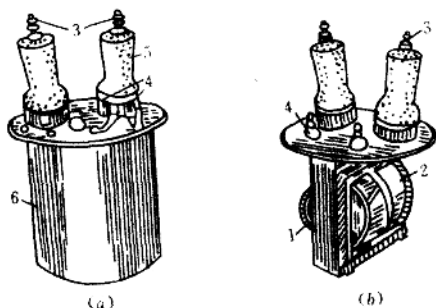


图 1.8 JDJ-10 型油浸自冷式单相电压互感器

1. 铁芯; 2. 原线圈; 3. 原线圈引出端; 4. 副线圈引出端; 5. 套管绝缘子; 6. 外壳

图 1.9 所示为油浸三相五柱式电压互感器(JSJW-10型)的外形结构。

表 1.3 220kV 电流互感器实例中主电屏尺寸及场强分布

主电屏 序号 z	主电屏 半径 r_z (cm)	主电屏 长度 l_z (cm)	台阶 长度 λ_z (cm)	$\ln r_z$	$\ln \frac{r_z}{r_{z-1}}$	相邻电屏 间电容 C_z (pF)	最大工作电压下				一分钟工频试验电压			
							相邻电屏 间电压 (kV)	场强 (kV/mm)	向平均 (kV/mm)	轴向平均 (kV/mm)	场强 (kV/mm)	轴向平均 (kV/mm)	场强 (kV/mm)	轴向平均 (kV/mm)
0	3.45	459	—	1.23837	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	3.85	431	19	1.34807	0.10970	7622	16.4	4.1	52.9	13.2	13.2	0.23	0.23	0.23
2	4.25	393	19	1.44692	0.09885	7713	16.2	4.1	52.3	13.1	13.1	0.28	0.28	0.28
3	4.55	361	16	1.53687	0.08995	7786	16.1	4.0	51.8	13.0	13.0	0.32	0.32	0.32
4	5.05	333	14	1.61939	0.08252	7829	16.0	4.0	51.3	12.8	12.8	0.37	0.37	0.37
5	5.45	309	12	1.69561	0.07622	7855	16.0	4.0	51.3	12.8	12.8	0.43	0.43	0.43
6	5.85	285	12	1.76644	0.07083	7806	16.1	4.0	51.9	13.0	13.0	0.43	0.43	0.43
7	6.25	265	10	1.83258	0.06614	7773	16.1	4.0	51.9	13.0	13.0	0.52	0.52	0.52
8	6.65	245	10	1.89462	0.06204	7661	16.4	4.1	52.6	13.2	13.2	0.53	0.53	0.53
9	7.05	225	10	1.95303	0.05841	7473	16.8	4.2	54.0	13.5	13.5	0.54	0.54	0.54

图 1.10 所示为 110 千伏单相串级式电压互感器。电压为 110 千伏及以上的电压互感器，普遍采用串级式结构。其结构特点是，线圈和铁芯采用分级绝缘，并将铁芯和线圈装在充油的瓷箱内，瓷箱既代替油箱又兼作高压瓷套管绝缘，因而可以大大节省材料，减少重量和体积。

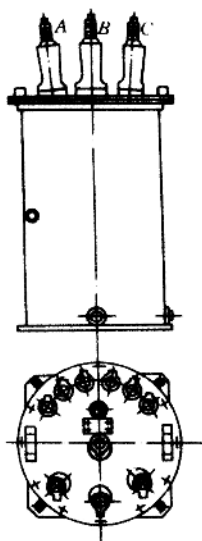


图 1.9 JSJW-10 型三相五柱式电压互感器

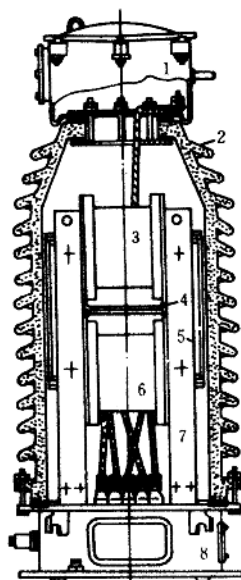


图 1.10 JCC₁-110 型串级式电压互感器

- 1. 贮油柜；2. 瓷箱；3. 上柱线圈；
- 4. 隔板；5. 铁芯；6. 下柱线圈；
- 7. 支撑绝缘板；8. 底座

110 千伏串级式电压互感器的原理图与内部接线如图 1.11

所示。

原线圈被分成匝数相等的两部分，绕成圆筒式套装在上、下铁芯柱上，并相互串联，其连接点与铁芯相连。正常运行时，每柱上的线圈对铁芯的最大电位差是 $U_*/2$ ，铁芯对地绝缘由绝缘支撑板来实现(U_* 为电压互感器额定运行相电压)。

两个副线圈，即基本副线圈 ax 和辅助副线圈 a_Dx_D (图中未画出) 套装在下铁芯柱的原线圈的外面。

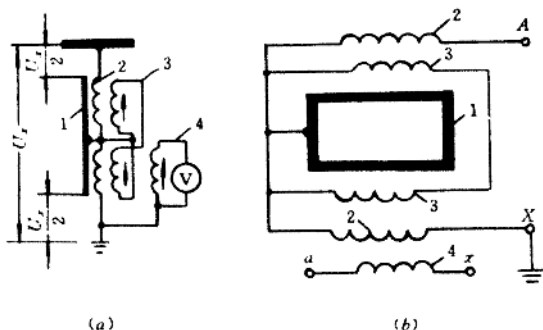


图 1.11 110 千伏串级式电压互感器的原理图

1. 铁芯; 2. 原线圈; 3. 平衡线圈; 4. 副线圈

平衡线圈由匝数相等的两部分构成，分别绕在上、下铁芯柱上，线圈绕向相同时，应作反向连接，其连接点与铁芯相连。平衡线圈紧靠铁芯柱，即在最里层。平衡线圈的作用是使上、下铁芯柱的安匝数分别平衡，从而达到减少漏磁(漏抗)的目的。其原理为：假如没有平衡线圈，当副线圈与测量仪表接通时，流过副线圈中的电流将产生去磁磁通，由于副线圈只是套装在下铁芯柱上，因而上、下铁芯柱内的总磁通不一样，从而上、下铁芯柱上的