

电流互感器手册

目录

电流互感器的用途和基本结构.....	(2)
一、 电流互感器的用途.....	(2)
二、 电流互感器的容量.....	(6)
三、 电流互感器的基本结构.....	(8)
电流互感器的误差和计算.....	(10)
一、 没有误差时的电流互感器.....	(10)
二、 电流互感器的误差和准确级.....	(13)
三、 电流互感器的等值电路和相量图.....	(16)
四、 影响电流互感器误差的各种因素.....	(19)
五、 电流互感器误差计算举例.....	(22)
电流互感器误差的补偿.....	(24)
一、 匝数补偿.....	(24)
二、 半匝或分数匝补偿.....	(26)
三、 双铁心反励磁补偿.....	(28)
四、 磁分路补偿.....	(29)
五、 短路匝补偿.....	(32)
六、 磁分路短路匝补偿.....	(33)
七、 圆环磁分路电势补偿.....	(34)
八、 电容补偿.....	(35)
九、 圆环磁分路补偿电流互感器的计算举例.....	(38)
十、 分数匝电容补偿电流互感器的计算举例.....	(40)
电流互感器的误差试验.....	(43)
一、 极性检查.....	(43)
二、 退磁.....	(44)
三、 误差试验.....	(46)
四、 复合误差试验.....	(49)
五、 二次负荷测定.....	(51)
六、 升流器的选用.....	(53)

电流互感器的用途和基本结构

一、电流互感器的用途

电流互感器和变压器很相象，变压器在线路上，主要用来改变线路的电压，而电流互感器接在线路上，主要用来改变线路的电流，所以电流互感器从前也叫做变流器。后来，一般把直流电变成交流电的仪器设备，叫做变流器，把改变线路上电流的大小的电器，根据它通过互感器的工作原理，叫做电流互感器。

线路上为什么需要变电流呢？这是因为根据发电和用电的不同情况，线路上的电流大小不一，而且相差悬殊，有的只有几安，有的却大至几万安。要直接测量这些大大小小的电流，就需要根据线路电流的大小，制作相应为几安直到几万安不同的许多电流表和其他电气仪表。这样就会给仪表制造带来极大的困难。此外，有的线路是高压的，例如 22 万伏或 1 万伏等高压输电供电线路，要直接用电气仪表测量高压线路上的电流，那是极其危险的，也是绝对不允许的。

如果在线路上接入电流互感器变电流，那么就可以把线路上大大小小的电流，按不同的比例，统一变成大小相近的电流。只要用一种电流规格的电气仪表，例如通用的电流为 5A 的电气仪表，就可以通过电流互感器，测量线路上小至几安和大至几万安的电流。同时电流互感器的基本结构和变压器很相象，它也有两个绕组，一个叫原边绕组或一次绕组；一个叫副边绕组或二次绕组。两个绕组之间有绝缘，使两个绕组之间有电的隔离。电流互感器在运行时一次绕组 W_1 接在线路上二次绕组 W_2 接电气仪表，因此在测量高压线路上的电流时，尽管原边电压很高，但是副边电压却很低，操作人员和仪表都很安全。

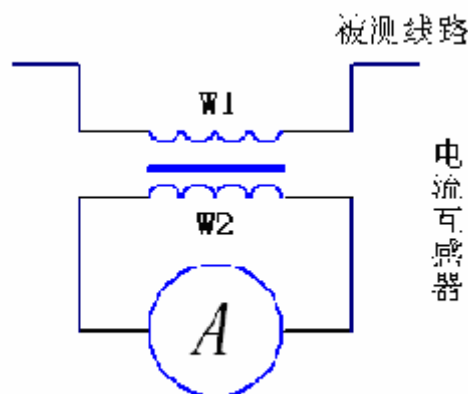


图1 电流互感器原理线路

由此可见，电流互感器除了可以将线路上大小不一的电流变成一定大小的电流，以便于测量之外，还可以起到与线路绝缘的作用，以保证操作人员和仪表的安全。

电流互感器既然用来变电流，那么它最主要的参数就是电流比。一次电流 I_1 与二次电流 I_2 之比，叫做实际电流比，一般用 K 表示，即：

$$K=I_1/I_2$$

为了生产和使用的方便，电流互感器的一次电流和二次电流都是规定有标准，叫做额定一次电流和额定二次电流。额定电流的意思就是说，在这个电流下，绕组可以长期通电而不被烧坏。当绕组的电流超过额定电流时，叫做过负荷。长期过负荷运行，会把绕组烧坏或降低互感器的寿命。

这样，额定一次电流 I_{1n} 与额定二次电流 I_{2n} 之比，就叫做额定电流比，用

K_n 表示，简称为电流比。因此，一般所谓电流互感器的电流比，都是指它的额定电流比，即

$$K_n = I_{1n} / I_{2n}$$

电流互感器有电力系统用和仪用两大类。电力系统用电流互感器是发电厂、变电所等输出、供电系统中不可缺少的一种电器，长期接在线路上运行，一般只有一个电流比，又可分为测量用和保护用电流互感器。测量用电流互感器主要与测量仪表配合，在线路正常工作状态下，用来测量线路上的电流、功率和电能等；而保护用电流互感器则与继电装置配合，当线路发生短路、过电流等故障时，向继电装置供电切断故障线路，以保护线路中的贵重设备，如发电机和变压器等。

仪用电流互感器是在实验室内使用的一种电工仪器，也叫做精密电流互感器，一般都有多个电流比，主要用来扩大电流仪表的量限，所以又叫做扩大量限装置。它还可以作为标准电流互感器，与标准电流表、标准功率表或标准电度表等配合，来检定相位低准确度的电表，功率表或电度表，或者以它为标准，来检定低准确度的电流互感器。

电力系统用电流互感器的额定一次电流标准值列于表 1。表中电流的单位为 (A)。

表中括号内值仅限于老产品或与老产品配套的产品；第 5 行 25000A 以上的电流值了取第 4 行电流值的 10 倍数。

表 1 额定一次电流标准值 (单位 A)

1	—	—	—	—	—	—	5	—	—
10	—	15	20	—	30	40	50	60	75
100	—	160 (150)	200	—	315 (300)	400	500	630(600)	800 (750)
1000	125 (1200)	1600 (1500)	2000	2500	3150 (3000)	4000	5000	6300 (6000)	8000 (7500)
10000	12500 (12000)	16000 (15000)	20000	25000					

额定二次电流标准值为 1A 和 5A。

仪用电流互感器额定一次电流标准值[2]除了表 1 所列数之外，还有：0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.5、0.75、1.5、2、2.5、3、4、7.5、8、25、80、120、250。额定二次电流标准值除 1A 和 5A 外，还有 0.5A。

此外，还有生产额定一次电流小于 0.1A 的，如 0.01、0.015、0.02、0.025、0.03、0.04、0.05、0.075A 和微机用额定二次电流为 0.1A 和 0.05A 的仪用电流互感器。据此，式 (2) 就可以写出：

$$K_n = I_{1n} / I_{2n} = 5/5 \text{ 或 } 10/5 \text{ 或 } \dots 0.1/5 \text{ 或 } 5/1 \text{ 或 } 5/0.05 \quad (3)$$

当略去电流互感器误差不计时，实际电流比就等于额定电流比，即

$$K = K_n = I_1 / I_2 \quad (4)$$

由此可见，如果电流互感器的铭牌上标明电流比为 100/5，那么不仅说明互感器二次电流乘上 20 倍就等于一次电流，而且还说明互感器一次绕组允许长期通过的电流为 5A。所以电流比 100/5 不能写成 20/1，这是因为 20/1 说明互感器的额定一次电流为 20A，额定二次电流为 1A，与 100/5 比值虽同而实际意义不同。

当我们利用互感器进行测量时，就按图 1 的原理接线，一次绕组串联接在被

测量的线路中，二次绕组则和 5A 的电流表串联。

这样，我们实际上测量到的是电流互感器二次绕组的电流，然后再根据铭牌上所标明的电流比，折算出一次绕组（即被测线路上）的实际电流。在电力系统中，为了测量方便起见，电流表都预先经过折算，直接按一次绕组的电流来刻度，同时在电流表上注明要用相应电流比的电流互感器。例如我们要测量线路上最大达到 200A 的电流，就可以选用 200/5 的电流互感器。这样，可以由电流表的指示，直接读出一一次绕组电流值。这时电流表的刻度虽然标的是 200A，但实际上通过电流表的电流，也就是二次绕组的电流只有 5A。因此，我们也可以用普通 5A 的电流表来测量，只要把测得的电流表读数，按电流比折算到原边，同样可以得到一次电流的值。

[例 1] 设线路上的电流约为 900A，应该怎样测量？

电流互感器额定一次电流大于 900A 的为 1000A，因此可选用 1000/5 的电流互感器和 1000 的电流表，这个电流表上标有应用 1000/5 的电流互感器，按图 1 接线就可由电流表的指示直接读出线路上的电流。

[例 2] 在例 1 中，如线路电流为 900A，问实际通过电流表的电流有多大？通过线路的电流为 I_1 通过电流表的电流为 I_2 ，因此由式（3）可以得到：

$$I_2 = I_1 / K_n = 900 / (1000 / 5) = 4.5A$$

实际通过电流表的电流是 4.5A。

[例 3] 在例 1 中，如改用普通 5A 电流表进行测量，当电流表读数为 4.8A 时，线路上的电流有多大？

由公式（3）可以得到：

$$I_1 = K_n I_2 = 1000 / 5 * 4.8 = 960A$$

[例 4] 在 10KV 高压线路上通过约 3A 的电流，应如何测量？

线路上的电流大约只有 3A，可以采用普通的 5A 电流表进行测量，但是在高压线路上，不能直接用 5A 电流表进行测量，必须通过高压电流互感器，因此选用 10KV 5/5 高压电流互感器和 5A 电流表，按图 1 进行测量。因为互感器的电流比为 5/5，即一次电流等于二次电流，所以与直接测量时一样，电流表可以直接读出线路上的电流数值，这时电流互感器实际上是用来是绝缘隔离的作用。

由此可见，凡是不需要改变电流的大小，而需要二次和一次有绝缘隔离的，可以采用 5/5 的电流互感器。

1、测量用电流互感器

测量用电流互感器的用途，如上所述，主要有下列两方面：

- (1) 用来测量高压线路上的电流和功率，起绝缘隔离的作用，以保证操作人员和仪表的安全。
- (2) 用来测量高压或低压线路上的大电流和大功率，使用统一的 5A 的二次线路和测量仪表。

因此，对于测量用电流互感器主要有三个要求：

第一，绝缘必须可靠，以保证安全；

第二，必须有一定的测量准确度；

第三，仪表保安系数 F_s 较小。

电流互感器在测量时，实测的二次电流都是按额定电流比折算为一次电流。这样的折算实际上是有误差的。也就是说，电流互感器实际电流比并不等于额定电流比，二者之间具有一定的误差。因此，测量用电流互感器根据变电流时所产生的误差，规定电流互感器的准确级。国产电流互感器的准确级有：0.01 级、0.02

级、0.05级、0.1级、0.2级、0.5级、1级、3级和5级等。各级电流互感器的允许误差都有详细的规定，这将在下一节介绍。但是在额定电流附近，各级电流互感器的误差，也可以大致简单的认为，相应于0.01级……5级，其允许误差为0.01%……5%。

仪用电流互感器的准确级一般都高于0.5级，电力系统用的电流互感器：用于测量电能的，应不低于0.5级，电能很大的，要求0.2级或0.1级；测量电流和功率的，一般用1级；3级和5级只用来监视电流，即大致观察电流大小。5级（老产品还有10级）只用于高压断路器套管上，也就是以下所说的装入式电流互感器或套管电流互感器。

测量用电流互感器在额定二次负荷下，其复合误差（见下节）不大于10%时的最小一次电流值叫做额定仪表保安电流。额定仪表保安电流与额定一次电流的比值就是仪表保安系数。

2、保护用电流互感器

在电力系统中，为了保证正常供电以及保护贵重设备的安全，都有一套由各种继电器控制设备组成的继电保护线路。当电力系统中发生故障时，这些保护装置就会动作，切断故障的线路，如果是偶然的故障，还能够自动合闸，保证正常供电。

保护用电流互感器，就是将线路上的电流变为一定大小的电流。给继电器等保护装置供电。当线路上发生短路或其它故障，使线路上电流剧增时，通过电流互感器供给继电器等保护装置的电流也剧增，使继电保护装置动作，切断故障线路。

保护用电流互感器的准确级用5P和10P表示，也相当于其允许误差为5%和10%。

由此可见，保护用电流互感器的工作条件与测量用电流互感器完全不同。测量用电流互感器是在线路正常供电时，用来测量线路上的电流和功率，而保护用电流互感器只是在线路发生故障时，比正常供电电流大几倍甚至几十倍的电流下，才开始有效的工作。因此，对于保护用的电流互感器，主要有三个要求：

- (1) 绝缘必须可靠，以保证安全；
- (2) 必须有足够大的准确限值系数；
- (3) 必须有足够的热稳定性和动稳定性。

电流互感器在正常运行时，一次电流和二次电流基本上都是按式(1)的比例关系上升或下降的。但是当发生故障，一次电流剧增时，由于铁心饱和了，二次电流随着一次电流增大至一定程度时，就不再按一定比例增大，甚至不再增大了。准确限值系数就是用来说明电流互感器的这种性能的。

保护用电流互感器在额定负载下能够满足准确级5P或10P要求的最大一次额定准确限值一次电流。所谓准确限值系数就是额定准确限值一次电流与额定一次电流的比值。

准确限值系数的标准值为5、10、15、20、30。

由此可见，所谓准确限值系数是说明电流剧增至多少倍额定电流后，互感器误差已经达到5%或10%，再增加一次电流，误差更大，二次电流就不再按比例增大，甚至不再增大了。

因此，对于保护用电流互感器，必须要求有足够大的准确限值系数，使线路发生故障一次电流剧增时，能够由二次电流反映给继电保护装置，保证继电保护及时可靠的动作，切断故障线路。在额定一次电流和额定二次电流负荷下保护用

电流互感器的比值差不超过±1%或±3%。

保护用电流互感器是在线路发生过负荷或短路故障时起作用的，这时线路上瞬时通过电流互感器的电流往往比额定电流大很多倍，这样大的电流一方面产生热量，一方面产生电动力，因此电流互感器必须能承受这样的热量和电动力，而不被它们所破坏。

在二次绕组短路情况下，电流互感器在一秒钟内所能承受而无损伤的一次电流有效值叫做额定短时热电流。

在二次绕组短路情况下，电流互感器能承受其电磁力的作用而无电的或机械的损伤的一次电流峰值，叫做额定动稳定电流。

保护用电流互感器最常用的有下列三种：

- (1) 过负荷保护电流互感器，用来保护线路的过负荷。
- (2) 差动保护电流互感器，一般用来保护变压器内部故障。这种电流互感器过去称为D级。
- (3) 接地保护电流互感器，一般用来保护单相或两相接地。这种电流互感器过去称为J级，也叫做零序电流互感器。

二、电流互感器的容量

在电流互感器的铭牌上，除了标明电流比以外，还标有额定容量或额定负荷和额定电压。

电流互感器的负荷，就是指电流互感器二次所接电气仪表和联结导线的总阻抗，它包括这些仪表或继电器的阻抗，以及联结导线的电阻和联结点的接触电阻等所有二次外接负载的全部阻抗。

电流互感器的负荷与电流互感器所接的线路上的负荷没有任何直接的关系。只要电流互感器的二次接线不变，不管线路上的负荷如何变化，电流互感器的负荷都不变。

由于电流互感器二次的接线是随着线路的要求而改变的，所以每个电流互感器的实际负荷都不同。为了制造和使用的方便，对于各种电流互感器，也都规定有标准的负荷，叫做额定负荷。

至于电流互感器的额定容量，是指电流互感器在额定电流和额定负载下运行时二次所输出的容量，容量的单位为伏安（VA）。所以额定容量 S_n 和额定负荷 Z_n 之间的关系，可以用下面的公式来表示：

$$S_n = I_{2n}^2 * Z_n \quad (5)$$

前已说过，对于一般电力系统用的电流互感器，额定二次电流 $I_{2n}=5A$ ，因此：

$$S_n = 5^2 * Z_n = 25Z_n \text{ (VA)} \quad (6)$$

这就是说，额定容量和额定负载之间只差一个系数（例如上式中的系数25），额定容量和额定负载一样，都是说明电流互感器二次允许连接的各种电气仪表（包括连接导线和接触电阻）的全部阻抗。因此额定负荷也可以用额定容量的伏安数表示。

按照标准规定，电流互感器的额定二次负荷标准值应为：5、10、15、20、30、40、50、60、80或100VA。对于额定二次电流为5A的电流互感器，额定负荷的阻抗为：0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.6、2.0、2.4、3.2或4.0Ω。

对于额定电流不足5A的，额定二次负荷还有0.25、0.5、1、2、2.5VA。相应于额定二次电流为1A时，其额定二次负荷阻抗为0.25、0.5、1、2、2.5Ω；相

应于 0.5A 时，为 1、2、4、8、10Ω。对于额定二次电流为 0.1 和 0.05A 的，其额定二次负荷一般为 50 或 100Ω。

电流互感器的额定电压，是指一次绕组所接线路上的线电压。电流互感器一次绕组是串联接在线路上的，所以电流互感器额定电压并不是电流互感器一次绕组两端的电压，而是电流互感器一次绕组对二次绕组和地的绝缘电压，因而电流互感器的额定电压只是说明电流互感器的绝缘强度，而和电流互感器的容量没有任何直接的关系。

由上面计算公式也可以看出，电流互感器的额定容量只与额定负荷有关，而与电流互感器的额定电压没有关系。如果按照变压器容量的概念来理解电流互感器的容量，认为额定容量为额定电压与额定电流的乘积，那显然是错误的，这是因为变压器的额定电压就是变压器一次或二次绕组的额定电压，而电流互感器的额定电压，即不是它一次绕组的电压，也不是它二次绕组的电压。

电流互感器二次绕组电压（指二次绕组两端的电压），等于二次电流和二次负荷的乘积。在线路上改变电流互感器的二次负荷时，二次电流基本不变，二次绕组的电压就随着二次负荷成正比的变化。电流互感器一次绕组的电压（指一次绕组两端的电压），也相应的随着二次绕组电压而增大或减小。但是，由于电流互感器运行在短路状态，绕组内阻抗压降很大，以致一次绕组电压与二次绕组电压的比例关系也不完全是固定不变的。因为电流互感器一次绕组和二次绕组电压是随着二次负荷的改变而改变，所以在所有电流互感器中都不标明一次绕组和二次绕组的电压。在电力系统中所用电流互感器，电流比都大于 1，一次绕组电压一般都小于二次绕组电压。

电流互感器的额定容量，即在额定电流和额定负荷时二次输出的容量，也等于二次额定电流和这时二次绕组电压的乘积，也就等于二次额定电流的平方和额定负荷的乘积，这就是上面所列的公式（5）。

电流互感器的额定电压，也按照线路上的额定电压规定为：0.5、10、15、20、35、60、110、220、330KV 等几种电压等级。

国产各种电压等级电流互感器的电流规格如表 2 所示。

表 2 各种电压等级电流互感器的电流规格

额定电压 (KV)	0.5	10	15~20	35
额定一次电流 (A)	5~25000	5~6000	800~15000	15~1500
额定电压 (KV)	60	110	220	330
额定一次电流 (A)	20~600	75~2000	300~1200	300~1200

电流互感器的额定电压一般都以 KV 为单位，标在电流互感器的型号后面，例如 LA-10 即为 10KV 电流互感器。

[例 5] LMZJ-0.5 型电流互感器的额定容量为 10VA，问它的额定负荷多大？

由式（6）可以求得额定负荷

$$Z_n = S_n / 25 = 10 / 25 = 0.4\Omega$$

[例 6] 例 5 LMZJ-0.5 型电流互感器的额定电压多高？

型号上所标的 0.5，说明其额定电压为 0.5 KV，即为 500V 低压电流互感器。

[例 7] 额定负荷为 0.2 的电流互感器，其额定容量多大？

由式（6）可以求得额定容量

$$S_n = 25Z_n = 25 \times 0.2 = 5\text{VA}$$

[例 8] 额定容量为 5VA 的电流互感器，如果其额定二次电流为 1A，求它的额定负荷。

由式 (5) 可以求得额定负荷

$$Z_n = S_n / I_n^2 = 5 / 1^2 = 5\Omega$$

[例 9] 额定容量为 5VA 的 100/5 电流互感器，在 20%额定电流时的容量多大？

由例 7 计算结果知道 5VA 互感器的额定负荷是 0.2 欧，所以在 20% I_n 时的容量为：

$$S = I^2 * Z_n = (20\% * 5)^2 * 0.2 = 0.2\text{VA}$$

由此可见，电流互感器的额定容量或者简称电流互感器的容量，都是指在额定电流和额定负荷时的容量。当电流不是额定值时，例如 10% I_n 时互感器的容量只有额定容量的 1%。

100/5、5VA 电流互感器，在 20% I_n 即二次电流比为 1A 时，由以上计算可知其容量只有 0.2VA。而 20/1、5VA 电流互感器，在二次电流为 1A 时，其容量即为 5VA。

由例 7 和例 8 计算结果可见，额定容量为 5VA 的电流互感器，如额定二次电流为 5A 时，其额定负荷为 0.2 Ω ，如额定二次电流为 1A 时，其额定负荷则为 5 Ω 。

从以上几个例子更可以清楚地看出，100/5 和 20/1 电流互感器，不仅两者的一次和二次额定电流不同，而且在相同的电流下，两者的容量相差 25 倍，在相同的容量时，两者所带的二次负荷阻抗值，也相差 25 倍，所以 100/5 与 20/1 互感器除了比例数字相同外，实际上是很不同的。在一般情况下，100/5 互感器都不能作为 20/1 互感器使用。

[例 10] 5/0.05 电流互感器的额定二次负荷为 100 Ω ，其额定容量是多少？

由式 (5) 可以求得额定容量

$$S_n = (I_n)^2 * Z_n = 0.05^2 * 100 = 0.25\text{VA}$$

[例 11] 例 10 这台电流互感器当二次电流为额定值时，二次输出电压有多大？

二次输出电压为二次电流和二次负荷阻抗的乘积，因此当 $I_n = 0.05\text{A}$ ， $Z_n = 100$ 欧时，二次输出电压 U_n 为

$$U_n = I_n Z_n = 0.05 * 100 = 5\text{V}$$

[例 12] 额定容量为 5VA 的电流互感器，其额定二次电流为 5A，求额定二次输出电压。

$$U_{2n} = I_n * Z_n = S_n / I_n = 5 / 5 = 1\text{V}$$

由例 11 和 12 可见，额定二次电流小的互感器（例如 $I_n = 0.05\text{A}$ ），尽管其额定容量小（例如 0.25VA），但其额定二次输出电压却比较高（例如 5V）。

微机一般要求输入电压为 5V，因此给微机供电用的电流互感器应选用额定二次电流为 0.1 或 0.05A 的，这样，只要较小的容量就可以得到较大的输出电压。

三、电流互感器的基本结构

电流互感器的基本结构主要由一次绕组、二次绕组和铁心构成，一次、二次和铁心之间都有绝缘。最简单的电流互感器，有一个一次绕组一个二次绕组和一个铁心。这样的电流互感器也只有一个电流比。

为了提高电流互感器的准确度，一般都对电流互感器的误差进行补偿。这样除了上述一次、二次绕组和铁心之外，有的还另外绕制辅助线圈或加入辅助铁心。

10KV 以上高压电流互感器，为了使用上的方便，经常把几个独立的互感器铁心绕组，通过公用的一次绕组，绝缘和外壳，装在一个互感器上，制成多次电流互感器。这样，一台电流互感器就相当于两台或三台互感器，两个或三个次级可以分别用于测量或保护线路。

0.2 级以上精密电流互感器，一般都是做成多电流比的，即一台互感器有许多电流比，供使用时选择，多电流比互感器的一次绕组或二次绕组都做成中间抽头式的，如果一次（或二次）绕组不变，相应于二次（或一次）的每一个抽头绕组，就得到一种电流比。这样一次和二次绕组组合，就有许多电流比。

电流互感器的铁心有方形、圆环形两种形式：

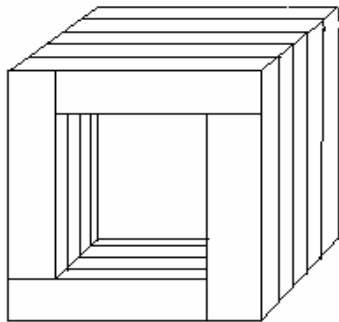


图2 方形叠片铁心

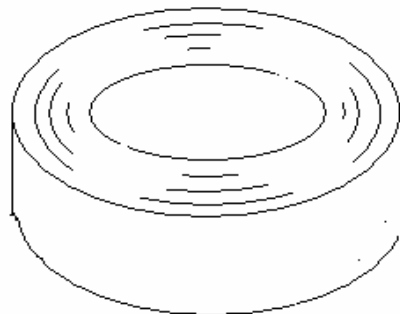


图3 圆环形铁心

方形，也就是叠片式，如图 2 所示。用一片一片的硅钢片叠成方形铁心。这种铁心的优点是线圈绕制方便，绕组可以预先在机器上绕制好后，再套在硅钢片铁心上成为绕组；缺点是铁心之间有气隙，磁性能低，绕组漏磁大，且叠片和安装都比较麻烦。

圆环形，如图 3 所示，圆环形铁心开头都采用硅钢片冲成圆环片一片一片的叠起来，现在绝大部分都改为用硅钢片带直接卷制铁心。这种铁心的优点是没有气隙，磁性能高，卷制也很方便。如绕组均匀绕线，则漏磁很小。因此，0.2 级以上精密电流互感器都采用这种带绕铁心。它的缺点是绕制绕组特别是绕粗导线绕组比较困难，不易实现机械化绕线。

电流互感器的一次绕组结构有单匝式、多匝式两种形式：

单匝式：一次绕组只有一匝，结构比较简单。一次电流在 300 至 600A 以上的多采用。它又分杆式、母线型两种。

杆式：一次绕组就是一根铜杆、铜管或铜排，从铁心内孔中穿过，如现在生产的 LA-10 型电流互感器，原边电流从 300 至 1000A。

母线型：在电流互感器上没有一次绕组，制作最方便。安装时，母线从互感器铁心窗口中间穿过，主要用于 600A 以上大电流的电流互感器。现在生产的 LMZJ-0.5 型电流互感器就是采用母线型的，其一次电流最小达到 100A（1 匝穿心时）而且在安装时，母线还可以在电流互感器铁心窗口上绕 2、3、或 4……等匝，而得到较小电流比的互感器。

多匝式：一次绕组多于一匝，因而结构比单匝式复杂。一般用于一次电流在 300 至 600A 以下的电流互感器，它分绕组式、回链式、8 字型三种。

绕组式：一次绕组由普通绕组构成，绕组绕制好后，再套在铁心上，如现在生产的 LQG-0.5 型电流互感器。

回链型：一次绕组从两个绝缘套管的孔中穿过，绕成回链型，结构最复杂，绕制也最困难。现在只有 LFC-10 型一种电流互感器上采用，而且正在被绕组式所代替。

8 字型：一次绕组从圆环形铁心内孔穿过，并在一次绕组上包扎主绝缘。这样，一次绕组和铁心构成一个 8 字型。主要用在 35KV 以上高压户外式电力互感器。如现在生产的 LCW-35、110 或 220 型等电流互感器。

此外，根据电力互感器安装的不同，又可分为户内式、户外式、装入式三种。

户内式：10KV 以下的电流互感器和仪用电流互感器大多是户内式的，采用干式绝缘。

户外式：35KV 以上的电流互感器都是户外式的，利用瓷瓶和变压器油绝缘。

装入式：这种电路互感器只有铁心和二次绕组，装在油断路器或变压器的套管上，也叫套管互感器。油断路器或变压器的导电杆，就是互感器的一次绕组（1 匝），有断路器的套管绝缘，也就是互感器一次和二次之间的主绝缘。所以这种互感器的结构最简单，实际上相当于油断路器或变压器的一个附件。

电流互感器的误差和计算

一、没有误差时的电流互感器

如果电流互感器的铁心不消耗能量，那么根据能量不灭定律，这时原边的能量就会全部传到副边，即：

$$E_1 I_1 = E_2 I_2 \quad (7)$$

式中 E_1 和 E_2 分别表示一次和二次绕组的感应电势。

由电磁感应原理知道，绕组的感应电势和匝数成正比，即：

$$E_1 / E_2 = W_1 / W_2 \quad (8)$$

式中 W_1 和 W_2 分别表示一次和二次绕组匝数。

将式 (8) 代入式 (7)，就可以求得没有误差时电流比和匝数的关系：

$$K = I_1 / I_2 = W_2 / W_1 \quad (9)$$

即电流互感器一次、二次电流大小与一次二次绕组匝数成反比。这是电流互感器计算的最基本公式。因为电流互感器误差比较小，所以在粗略计算时，可以略去互感器的误差不计，由式 (9) 即可求出电流比，或者算出一次或二次绕组的匝数。

由式 (9) 还可以得到：

$$I_1 W_1 = I_2 W_2 \quad (10)$$

电流与匝数的乘积，单位为安匝 (A)，所以也叫做安匝数。由式 (10) 可见，一台电流互感器的一次安匝数等于二次安匝数。采用一次和二次安匝数相等，来计算一次或二次绕组匝数，有时是很方便的。

[例 13] 一台额定二次电流为 5A 的电流互感器，一次绕组 25 匝，二次绕组 150 匝，求它的电流比。

由式 (9) 即可求得电流比

$$K = I_1 / I_2 = W_2 / W_1 = 150 / 25 = 30 / 5$$

其电流比为 30/5。

[例 14] 上述这台电流互感器，要改为 50/5，它的一次绕组要改成多少匝？

这台互感器的安匝数为：

$$I_1 W_1 = I_2 W_2 = 5 * 150 = 750A$$

$$W_1 = 750 / I_1 = 750 / 50 = 15 \text{ 匝}$$

改为 50/5 时，一次绕组匝数应改为 15 匝。

[例 15] 一台 600/5 母线型电流互感器，二次绕组有多少匝？

母线型电流互感器一次绕组就是母线通过，也就是 1 匝，那么由式 (9) 即可求得二次绕组匝数：

$$W_2 = I_1 / I_2 * W_1 = 600 / 5 * 1 = 120 \text{ 匝}$$

二次绕组为 120 匝。

[例 16] 上述这台 600/5 母线型互感器，如果要当 150/5 用，一次绕组要穿多少匝？

由例 14 计算结果，知道这台互感器的安匝数为：

$$I_1 W_1 = 600 * 1 = 600A$$

根据安匝数相等，很容易求得，当一次电流为 150A 时的匝数 W_1 ，即：

$$W_1 = 600 / 150 = 4 \text{ 匝}$$

同样原理，还可以列出这台互感器在不同一次绕组穿心匝数下的电流比，如表 3 所示。

表 3 穿心匝数与电流比

穿心匝数	1	2	3	4	6	8	12
电 流 比	600/5	300/5	200/5	150/5	100/5	75/5	50/5

由表 3 中可以看出，电流互感器的电流大小与绕组匝数成反比。穿心式电流互感器由于一次绕组穿心匝数的不同，就可以得到不同的电流比，例如现在生产的 LMZ-0.5 型电流互感器就是最简单的多变化低能流互感器。

0.2 级以上精密电流互感器，一般都是多变化的电流互感器，如果二次绕组匝数不变时，也就是只有一个安匝数时，那么在不同电流比时，一次绕组的匝数就是按例 16 这样计算的。有的多变化电流互感器二次绕组有两种以上安匝数，例如 HL37 型 0.2 级电流互感器，有 750 安匝和 1000 安匝两种安匝数，这时一次绕组一种匝数，就有两种电流比。可以按上述同样方法分别算出。

例如 HL37 型电流互感器，当一次绕组为 10 匝时，对于 750 安匝，其电流比为 75/5，而对于 1000 安匝，其电流比为 100/5。同时可以列出不同一次绕组匝数时的电流比，如表 4 所示。

表 4 双安匝数的匝数与电流比

一次绕组匝数								
电 流 比	10	25	50	100	250	500	1000	1500
安匝数								
750 安匝	75/5	30/5	15/5	7.5/5	3/5	1.5/5	0.75/5	0.5/5
1000 安匝	100/5	40/5	20/5	10/5	4/5	2/5	1/5	——

表中当一次绕组为 1500 匝时，对于 1000 安匝，其电流比为 0.666/5，一次电流不是额定电流，故不用。由表中可见，当两种安匝数的比例为 3: 4 (即 750:

1000) 时, 对应于每一种一次绕组匝数, 都有两种额定电流比, 所以这种结构的电流互感器, 出线头少, 电流比多; 制作和使用都比较方便。

[例 17] 山西省互感器研究所研制的 HL46-11 型 5~5000/5 电流互感器, 其电流比铭牌如表 5 所示。求各绕组的匝数。

由表 5 可以画出 HL46-11 型电流互感器一次和二次绕组的线路原理图如图 4 所示。

表 5 HL46-11 型电流比

一次电流 (A)	一次接线	二次接线	一次电流 (A)	一次接线	二次接线	
5000	LaLb=1	K ₁ K ₁₁	250	L ₁ L ₂	K ₁ K ₄	
4000		K ₁ K ₁₀	200		K ₁ K ₂	
3000		K ₁ K ₈	150		L ₁ L ₃	K ₁ K ₈
2500		K ₁ K ₇	100			K ₁ K ₆
2000		K ₁ K ₆	75			K ₁ K ₅
1500		K ₁ K ₅	60	K ₁ K ₃		
1250		K ₁ K ₄	50	K ₁ K ₂		
1200		L ₁ L ₂	K ₁ K ₃	40	L ₁ L ₄	K ₁ K ₁₀
1000			K ₁ K ₂	30		K ₁ K ₈
800			K ₁ K ₁₀	25		K ₁ K ₇
750	K ₁ K ₉		20	K ₁ K ₆		
600	K ₁ K ₈		15	K ₁ K ₅		
500	K ₁ K ₇		10	K ₁ K ₂		
400	L ₁ L ₅		K ₁ K ₆	7.5	K ₁ K ₄	
300			K ₁ K ₅	5	K ₁ K ₂	

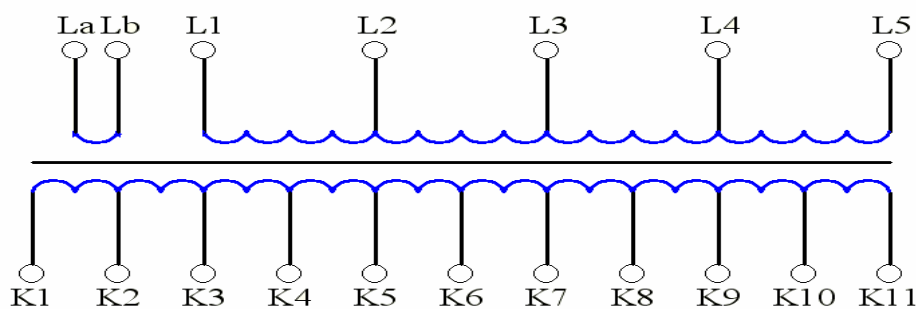


图 4 HL46-11 型绕组原理线路图

一般多电流比的电流互感器都是采用一次和二次绕组抽头式的, 一次绕组标志为 L₁、L₂、……, 二次绕组标志为 K₁、K₂、……。这样, 每一个一次绕组 L₁L_x 或 L_yL_x 与每一个二次绕组 K₁K_x 或 K_yK_x 都可以组成一个电流比, 如表 5 所示, 就是由 L₁L_x 和 K₁K_x 组成的各电流比。

因为 LaLb=1 即穿心 1 匝, 所以根据 1 匝的一次绕组就可求出相应的二次绕组匝数:

K₁K₂ 为 1000 安匝, 故其匝数 $W_{12}=1000/5=200$ 匝

K₁K₃ 为 1200 安匝, 故其匝数 $W_{13}=1200/5=240$ 匝

K_1K_4 为 1250 安匝，故其匝数 $W_{14}=1250/5=250$ 匝
 K_1K_5 为 1500 安匝，故其匝数 $W_{15}=1500/5=300$ 匝
 K_1K_6 为 2000 安匝，故其匝数 $W_{16}=2000/5=400$ 匝
 K_1K_7 为 2500 安匝，故其匝数 $W_{17}=2500/5=500$ 匝
 K_1K_8 为 3000 安匝，故其匝数 $W_{18}=3000/5=600$ 匝
 K_1K_{10} 为 4000 安匝，故其匝数 $W_{110}=4000/5=800$ 匝
 K_1K_{11} 为 5000 安匝，故其匝数 $W_{111}=5000/5=1000$ 匝

再求一次绕组匝数：

$L_1L_2 / K_1K_{10}=800/5$ ，故 L_1L_2 绕组 $W_{21}=4000/800=5$ 匝
 $L_1L_3 / K_1K_8=150/5$ ，故 L_1L_3 绕组 $W_{31}=3000/150=20$ 匝
 $L_1L_4 / K_1K_{10}=40/5$ ，故 L_1L_4 绕组 $W_{41}=4000/40=100$ 匝
 $L_1L_5 / K_1K_2=5/5$ ，故 L_1L_5 绕组 $W_{51}=1000/5=200$ 匝

最后求出 K_1K_9 二次绕组匝数：

$L_1L_2 / K_1K_9=750/5$ ，故 $W_{19}=(750*5)/5=750$ 匝

二、电流互感器的误差和准确级

任何能量在传递过程中，都要有损耗，电流互感器也不例外。当一次电流通过互感器的一次绕组时，必须消耗一小部分电流来励磁，励磁就是使铁心有磁性，这样二次绕组才能产生感应电势，也才能有二次电流。用来励磁的电流，就叫做励磁电流，一般用 I_0 表示。励磁电流与一次绕组匝数的乘积 $I_0 W_1$ ，叫做励磁安匝，也叫做励磁磁动势。

如果电流互感器没有误差，一次安匝就等于二次安匝。但是实际上由于互感器铁心要消耗励磁安匝，这个励磁安匝由一次安匝中提供，这就是说，在一次安匝中要扣去励磁安匝后，才传递成为二次安匝。因此，这时二次安匝就不等于一次安匝，电流互感器也就有了误差。很明显，电流互感器的误差就是由铁心所消耗的励磁安匝引起的。

在交流电中，电流除了大小以外，还有方向，就象钟表中的时针和分针一样。如果我们将一次电流 I_1 和经过折算后的二次电流 KnI_2 当做时针和分针，也放在钟表盘中，那么当电流互感器没有误差时， KnI_2 这支针和 I_1 这支针的长短应该相同，而且这两支针应该成一直线，这也就是说，如果将 KnI_2 这支针转 180° 即转半圈后， KnI_2 同 I_1 这两支针完全重合，即长短和位置都完全一致，则电流互感器就没有误差。

如果 KnI_2 转 180° 后，与 I_1 不完全重合，即电流互感器有误差。 KnI_2 与 I_1 的长短之差，就叫做电流误差，一般简称比值差，并用百分数表示。 KnI_2 与 I_1 的位置之差，也就是 KnI_2 与 I_1 之间所夹的角度，就叫做相位误差，一般简称相位差。因此，电流互感器的误差分比值差和相位差两部分。

比值差就是二次电流按额定电流比折算到一次值后，与实际一次电流大小之差，并用后者的百分数表示。故根据定义，比值差 f 为：

$$f = (KnI_2 - I_1) / I_1 * 100\% \quad (11)$$

由式中可见，如果折算后的二次电流大于一次电流，即 $KnI_2 > I_1$ ，则比值差为正值；反之，如果 $KnI_2 < I_1$ ，则比值差为负值。

相位差就是二次电流反转 180° 后，与一次电流相角之差，并以分（'）为单位。根据定义，当二次电流逆时针方向反转 180° 后，超前于一次电流时，相位差为正值，反之滞后于一次电流时，相位差为负值。超前或滞后，也可以从钟表

来看, 钟表中 1 超前于 2、2 超前于 3、……, 而 12 滞后于 11、11 滞后于 10、……。

根据测量时电流互感器误差的大小, 电流互感器的准确级分为 0.01 级、0.02 级、0.05 级、0.1 级、0.2 级、0.5 级、1 级、3 级和 5 级。根据电流互感器国家标准[1]和测量用电流互感器检定规程[2]的规定, 各级电流互感器允许的比值差和相位差如表 6 所示。

表 6 测量用电流互感器误差限值

准确级	额定电流百分数 (%)	允许误差	
		比值差 (%)	相位差 (′)
0.01	5	±0.02	±0.6
	10~120	±0.01	±0.3
0.02	5	±0.04	±1.2
	10~120	±0.02	±0.6
0.05	5	±0.10	±4
	10~120	±0.05	±2
0.1	5	±0.4	±15
	10	±0.25	±10
	20	±0.2	±8
	100~120	±0.1	±5
0.2	5	±0.75	±30
	10	±0.5	±20
	20	±0.35	±15
	100~120	±0.2	±10
0.5	5	±1.5	±90
	10	±1.0	±60
	20	±0.75	±45
	100~120	±0.5	±30
1	5	±3	±180
	10	±2	±120
	20	±1.5	±90
	100~120	±1	±60
3	50~120	±3	不规定
5	50~120	±5	不规定

由表 6 中可见, 电流互感器的运行范围为 5%~120%额定电流, 这时各级电流互感器的误差, 不得超过表 6 中所规定的允许值各点连成的折线。所有各级电流互感器, 都允许短期过载 20%, 同时互感器的误差也不超出允许值。各级电流互感器在额定电流附近运行时, 误差最小。表中 0.1 级以下电流互感器的允许误差, 就是根据这种性能规定的; 在 5%额定电流时, 互感器的误差最大, 允许误差也相应规定大一些。当互感器运行在小于 5%额定电流时, 其误差显著增大, 按照规定, 这时互感器的准确度没有保证, 误差可能超出表 6 所列的允许值。因此, 在选用电流互感器的电流比时, 应该使被测电流等于或略小于电流互感器的额定一次电流, 使互感器在额定电流附近运行, 这样测量更准确。

对于满足特殊使用要求 (着重用于与特殊电度表相连接, 这些电度表在 0.05~6A 之间, 即额定电流 5A 的 1%~120%之间的某一电流下能做正确测量) 的

0.2S 级和 0.5S 级（S 表示特殊使用）电流互感器的允许误差，列于表 7。

表 7 的准确级主要用于额定一次电流为 25、50 和 100A 以及其 10 的倍数、额定二次电流为 5A 的电流互感器。

保护用电流互感器的准确级有：5P 和 10P（P 表示保护），其误差限值列于表 8。

表 7 特殊使用要求的电流互感器的误差限值

准确级	额定电流百分数 (%)	允许误差	
		比值差 (%)	相位差 (′)
0.2S	1	±0.75	±30
	5	±0.35	±15
	20~100	±0.2	±10
0.5S	1	±1.5	±90
	5	±0.75	±45
	20~100	±0.5	±30

表 8 保护用电流互感器的误差限值

准确级	在额定一次电流时		在额定准确限值一次电流时
	比值差 (%)	相位差 (′)	复合误差 (%)
5P	±1	±60	5
10P	±3	不规定	10

一般电流互感器误差都是在额定频率（例如 50 赫兹）下基波所产生的误差，保护用电流互感器由于铁心饱和，除了基波外还有很大的谐波分量。所谓复合误差就是包括基波和谐波在内的励磁电流安匝（有效值）与额定准确限值一次电流安匝（有效值）的比值，并以百分数表示。即

$$\epsilon_c = \Delta I_1 N_1 * 100 / I_{1c} N = \Delta I_1 * 100 / I_{1c} (\%) \quad (12)$$

式中 ϵ_c ——复合误差；

$\Delta I_1 N_1$ ——励磁电流安匝；

I_{1c} ——额定准确限值一次电流。

电流互感器的误差，除了与运行时电流的大小有关外，还与互感器副边所接的二次负荷有关。

根据标准规定，电流互感器的二次负荷必须在额定负荷和下限负荷的范围内，各级电流互感器的误差才不超出表 6 或表 7 所列的允许值。对于 0.01 级至 1 级电流互感器，下限负荷一般规定为 25% 额定负荷。对于 3 级和 5 级电流互感器，下限负荷一般规定为 50% 额定负荷。但是当额定负荷等于或小于 10VA 时，各级电流互感器的下限负荷对于额定二次电流为 5A 的，为 2.5 或 3.75VA；对于额定二次电流为 1A 的，均为 2.5VA。所以额定二次电流为 5A 的电流互感器，其下限负荷最小为 0.1 或 0.15Ω，额定二次电流为 1A 的电流互感器，其下限负荷最小为 2.5Ω。对于保护用电流互感器 5P 和 10P 级，只考虑额定二次负荷，因为这种互感器负荷越小，误差越小。

如果电流互感器实际所接的二次负荷大于额定负荷或小于下限负荷，其准确度同样没有保证，误差也可能超出表 6 至表 8 所列的允许值。当电流互感器实际

负荷比额定负荷大好几倍时，互感器的二次电流可能不随着一次电流的增大而成比例的增大，实际数值要比按额定电流比折算的数值小很多，这样的电流互感器就不能使用。因此，额定二次负荷是用来确定互感器是否符合规定的准确级要求所依据的负荷值。在产品铭牌上标明的额定二次符合与准确级是相对应的。在选用电流互感器时，除了选择合适的电流比外，还要选用合适的额定负荷；是电流互感器的实际负荷在额定负荷和下限负荷范围之内，才能保证测量的准确度。

电流互感器的误差还和二次负荷的功率因数或者叫做力率有关，功率因数就是二次负荷阻抗角度 Φ 的余弦，常用 $\cos\Phi$ 表示。一般电力系统用的电流互感器的二次负荷功率因数应是 0.8（滞后），即二次负荷为感性。负荷小于 5VA 时，允许功率因数为 1。精密电流互感器的功率因数为 0.8（滞后）或 1，或 0.8~1。0.05 级及以上高准确度电流互感器的功率因数一般均为 1。保护用电流互感器的功率因数为 0.8（滞后）至 1 之间，由制造厂自定。

[例 18] 额定容量为 20VA 二次电流为 5A 的电流互感器，求其额定负荷和下限负荷。

$$\text{额定负荷 } Z_n = S_n / 25 = 20 / 25 = 0.8\Omega$$

$$\text{下限负荷 } Z_x = 25\% * Z_n = 25\% * 0.8 = 0.2\Omega$$

额定负荷为 0.8Ω，下限负荷为 0.2Ω。

[例 19] 额定容量为 10VA 二次电流为 5A 的电流互感器，求其额定负荷和下限负荷。

$$\text{额定负荷 } Z_n = S_n / 25 = 10 / 25 = 0.4\Omega$$

$$\text{下限负荷 } Z_x = 25\% * Z_n = 25\% * 0.4 = 0.1\Omega < 0.15\Omega$$

按照规定最小负荷为 0.15Ω，故额定负荷为 0.4Ω，下限负荷为 0.15Ω。

三、电流互感器的等值电路和相量图

电流互感器是通过电磁感应，将一次绕组中的电流，感应传到二次绕组，所以互感器的一次回路和二次回路是相互隔离的。为了便于分析和讨论，经常采用等值电路，将一次和二次直接通过电路联系起来，而电路中所有参数都与实际参数等值，因此叫做等值电路。

电流互感器和变压器的等值电路相同，等值电路先假定一次和二次绕组匝数相等，如果实际不等，可通过电流比 K_n 折算成相等，折算后的参数一律在右上角加一撇表示。对于电势（电压）、电流和阻抗，一次折算至二次的计算公式分别为：

$$E_1' = K_n * E_1 \quad (13)$$

$$I_1' = I_1 / K_n \quad (14)$$

$$Z_1' = K_n^2 Z_1 \quad (15)$$

式中 E_1 、 I_1 、 Z_1 分别表示一次回路的感应电势、电流、阻抗。 E_1 、 I_1 字母表示相量，也叫做矢量。E、I 字母表示相应相量的大小，也叫做模数，有时也用 $|E_1|$ 、 $|I_1|$ 表示。Z 表示阻抗，为复数，其角度 Φ 叫做阻抗角，它的余数 $\cos\Phi$ 就是阻抗的功率因数。

经过折算后，一次和二次的感应电势相等，即：

$$E_1' = E_2 \quad (16)$$

相量相等就是二者不仅大小相等，而且方向相同，也就是相位相同，这时两个相量完全重合。

既然一次和二次感应电势相等，那么通过感应电势就可以把一次和二次的其

它参数联系起来，画出等值电路如图 5 所示。

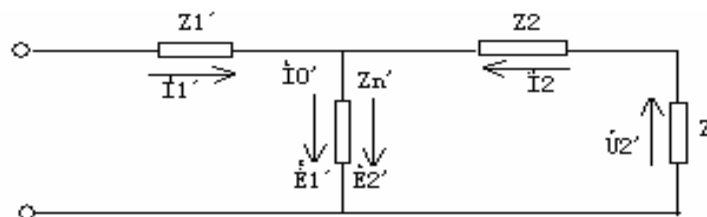


图5 电流互感器等值电路图

二次电流 I_2 通过外接负荷阻抗 Z ，产生二次电压降 U_2 ：

$$U_2 = I_2 * Z \quad (17)$$

式中 U_2 单位为 V， I_2 单位为 A，单位为 Ω 。

I_2 还通过绕组内阻抗 Z_2 ，产生电压降 $I_2 Z_2$ ；二次回路的总阻抗为：

$$Z_{02} = Z + Z_2 \quad (18)$$

其压降全部由二次绕组感应电势 E_2 提供，即：

$$E_2 = U_2 + I_2 Z_2 = I_2 (U_2 + Z_2) = I_2 Z_{02} \quad (19)$$

要产生感应电势 E_2 ，铁心就必须励磁，励磁电流 I_0 为：

$$I_0 = -E_1 / Z_m \quad I_0' = -E_2 / Z_m' \quad (20)$$

式中， Z_m 为铁心等值阻抗，也叫做励磁阻抗。

折算后的一次和二次电流的相量和就是励磁电流。

$$I_0' = I_1' + I_2 \quad (21)$$

一次电流 I_1 通过一次绕组内阻抗 Z_1 ，产生压降 $I_1 Z_1$ ，因此一次电压 U_1 为：

$$U_1 = I_1 Z_1 - E_1 \quad (22)$$

为了直接看出各相量之间的关系，经常将有关的相量画在一起，这就是相量图，也叫矢量图。电流互感器的相量图如图 6 所示。

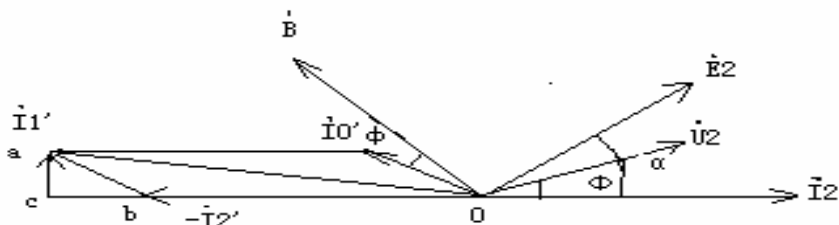


图6 电流互感器相量图

先在水平轴上从左到右画相量 I_2 ，箭头所指就是 I_2 的方向，长短就表示它的大小。根据式 (17) 画出 U_2 ，其大小为 I_2 和 Z 的乘积，用相量的长度表示，其相位超前于 I_2 一个角度 Φ ，用箭头表示， Φ 就是 Z 的阻抗角。根据式 (19) 画出 E_2 ，其大小为 I_2 和 Z_{02} 的乘积，其相位超前于 I_2 一个角度 α ， α 就是 Z_{02} 的阻抗角。

要产生感应电势，铁心就必须有磁通。单位截面铁心的磁通叫做磁通密度，简称磁密，也叫做磁感应强度。由电磁感应定律可以求得在工频(即频率为 50Hz)时磁密和感应电势的关系：

$$B = (E_2 * 10^2 * 10^2) / (222 W_2 S k) = 45 E_2 / (W_2 S k) \quad (T) \quad (23)$$

式中， B 为磁密，单位特斯拉 (T)， $1T=10000Gs$ (高斯)； S 为铁心截面，单位 cm^2 ； k 为铁心叠片系数，对于热轧硅钢片 $k=0.8\sim 0.9$ ，对于冷轧硅钢片 $k=0.9\sim 0.95$ 。

B 的大小可由式 (23) 求得，其相位超前于 E_2 90° 。

要使铁心有磁密 B ，铁心必须有磁场强度 H ， H 的单位为 A/cm 。磁密和磁场强度的比值就是铁心的磁导率，一般用 μ 表示。

$$\mu=B/H \quad H=B/\mu \quad (24)$$

在交流电中，磁密 B 一般用峰值，磁场强度一般用有效值，有效值乘以 $\sqrt{2}$ 就等于峰值，因此

$$\mu=B/(1.414*H) \quad (25)$$

式中 B 单位 T 或 Gs ， H 单位 A/cm ， μ 单位 $T/A/cm$ 或 $Gs/A/cm$ 。但一般 μ 的单位用特/奥 (T/Oe) 或高斯/奥 (Gs/Oe)， $1A/cm=0.4\pi Oe$ 。这样：

$$\mu=B/1.414*0.4\pi H \approx 5.627B/H \quad (26)$$

式中 μ 单位 T/Oe 或 Gs/Oe ， H 单位 A/cm

H 的相位超前于 B 一个角度 ψ ， ψ 就是铁心的损耗角。 H 的大小和损耗角 ψ 一般都从相应铁心磁化曲线中查得。

因为铁心磁导率 μ 和损耗角 ψ 都不是常数，他们都随着磁密度或磁场强度的变化而变化。所以 H 相对于 B ，即 H/B 的大小和相位也是变化的。在电流互感器正常运行的范围内，铁心的磁密度越高，导磁率和损耗角越大， H/B 越小，且相位越超前。要使铁心有磁场强度，首先必须对铁心进行励磁，也就是需要励磁磁动势。

$$I_0W_1=Hl$$

式中 I_0W_1 为励磁磁动势，单位安匝 (A)，所以也叫励磁安匝， l 是铁心的平均磁路长度，单位 cm 。 I_0 和 H 是同相的。相量图上有的标 H ，也有的标 I_0 或 I_0W_1 或 I_0W_1/I_1W_1 。因为这些相量都是同相的，即位置相同，其大小不同，单位也不同，只要改变相应的比例尺，就可以画成一样长短，所以根据需要标上任一相量都是合适的。

根据式 (21)，可以画出相量 I_1'

$$I_1' = -I_2 + I_0' \quad (27)$$

两个相量相加，就是画出由这两个相量组成的平行四边形，其对角线就是两相量之和，这里就是相量 I_1' 。实际上两相量相加，也就是两相量首尾相加。

根据式 (22) 还可以画出 U_1 的相量。在一般情况下， U_1 与电流互感器的性能无关，所以相量图上常略去不画。

由相量图可以很清楚看出， $I_1' \neq -I_2$ ，就是因为有 I_0' ； I_1' 与 $-I_2$ 长短之差与 I_1' 的比值，就是比值差 f ， I_1' 与 $-I_2$ 两相量的夹角 δ 就是相位差。

由 I_1' 的矢端即 a 点做直线垂直于 $-I_2$ (其矢端为 b)，并与 ob 的延长线相交于 c ； $\triangle abc$ 为直角三角形， $\angle cab = \psi + \alpha$ ；由此可以算出电流互感器的比值差 f 和相位差 δ ：

$$f = (I_2 - I_1') / I_1' \approx (-cb) / I_1' = -(I_0/I_1) \sin(\psi + \alpha) * 100\% \quad (29)$$

$$\delta \approx \sin \delta = ca / I_1' = (I_0/I_1) \cos(\psi + \alpha) * 3438' \quad (30)$$

式中由于相位差 δ 很小，一般 $\delta < 2^\circ$ ，因此 $\delta \approx \sin \delta$ ， $I_2 - I_1' \approx -cb = -I_0' \sin(\psi + \alpha)$ ， $ca = I_0' \cos(\psi + \alpha)$ 。 $\sin \delta = ca / I_1'$ ，单位弧度(rad)， $1rad \approx 3438'$ ，相位差的单位为 ($'$)，所以公式 (30) 中乘以 3438，把弧度化成份， $I_0' / I_1' = I_0/I_1$ ，有时也用安匝数表示，即：

$$I_0/I_1 = I_0W_1/I_1W_1 \approx I_0W_1/I_2W_2$$

如果将相量图画在直角坐标上， I_2 画在正 x 轴上，并把 I_0' 相量标为 I_0/I_1 ，那么 I_0/I_1 的矢端坐标 (x, y)，根据直角坐标：

$$X = (I_0/I_1) \cos(90^\circ + \psi + \alpha) = -(I_0/I_1) \sin(\psi + \alpha) \quad (31)$$

$$Y = (I_0 / I_1) \sin(90^\circ + \psi + \alpha) = -(I_0 / I_1) \cos(\psi + \alpha) \quad (32)$$

式 (29)、(30) 与式 (31)、(32) 比较, 可见:

$$f = x * 100\% \quad (33)$$

$$\delta = y * 3438' \quad (34)$$

即相量 I_0 / I_1 的矢端坐标(x, y)分别表示互感器的比值和相位差。这样, 我们只要画出相量图就可以看出互感器的比值差和相位差。因此, 用相量矢端的直角坐标表示互感器误差, 对于分析和研究互感器的误差是很方便的。电流互感器的复数误差由比值和相位差组成, 即

$$\sim \varepsilon = f + j\delta = x + jy \quad (35)$$

式中 $\sim \varepsilon$ 是以复数表示的误差, 与阻抗 Z 相类似, Z 也是复数, $Z = R + jX$, 由电阻 R 和电抗 X 组成。

电流互感器的复数误差, 是反转 180° 的二次电流相量按额定电流比折算至一次后, 与实际一次电流相量之差, 对实际一次电流相量的比值, 并用百分数表示, 即

$$\sim \varepsilon = [(-K_n I_2 - I_1) / I_1] * 100\% = -(I_0 N_1 / I_1 N_1) = -(I_0 / I_1) * 100\% \quad (36)$$

可见复数误差为励磁安匝与一次安匝相量之比的负值。由图 5 等值电路和式 (19) 可见:

$$E_2 = -I_0' Z_m = I_2 Z_{O2}$$

$$\text{所以} \quad -I_0' / I_2 = Z_{O2} / Z_m' \quad (37)$$

$$\text{由于} \quad I_1' \approx I_2 \quad (38)$$

将式 (37) 和 (38) 代入式 (36) 可以得到:

$$\sim \varepsilon = -I_0' / I_1 * 100\% = -(Z_{O2} / Z_m') * 100\% \quad (39)$$

复数误差为二次负荷总阻抗与二次励磁阻抗之比的负值。

ε 是 $\sim \varepsilon$ 的模数:

$$\varepsilon = I_0 / I_1 = Z_{O2} / Z_m' \quad (40)$$

$\sim \varepsilon$ 的角度 $\angle \sim \varepsilon$, 根据复数角度的运算方法应为 Z_{O2} 的角度 α 减去 Z_m' 的角度 $90^\circ - \psi$, 负号为 $\pm 180^\circ$, 因此

$$\angle \sim \varepsilon = \alpha - (90^\circ - \psi) + 180^\circ = 90^\circ + \alpha + \psi \quad (41)$$

这就是图 6 相量图中 I_0 的角度。

四、影响电流互感器误差的各种因素

将式 (19)、(23)、(26) 和 (40) 合在一起, 就可以得到电流互感器误差的计算公式:

$$\varepsilon = I_0 W_1 / I_1 W_1 = 0.5627 * 45 Z_{O2} l / W_2 \mu S k I_1 W_1 \quad (42)$$

再将 $I_1 W_1 \approx I_2 W_2$ 代入得到:

$$\varepsilon = 25.3 Z_{O2} l / W_2^2 \mu S k \quad (43)$$

式中 l 单位 cm^2 , Z_{O2} 单位 Ω , μ 单位 T/Oe。

从电流互感器误差计算公式 (43)、(29)、(30) 可以看出各参数对互感器误差的影响。

1、电流对误差的影响

从式 (43) 中看不出电流对误差的影响, 好像电流互感器的误差与电流的大小无关。实际上当电流增大时, 铁心的磁密也随着按比例增大。如上所述, 这时磁导率 μ 和损耗角 ψ 也随着增大。

铁心磁导率增大, 由式 (43) 可见, 分母增大, 互感器的误差就随着减小;

损耗角增大，由式（29）和（30）可见， $\sin(\psi+\alpha)$ 增大， $\cos(\psi+\alpha)$ 减小。因此，当电流增大时，电流互感器的误差随着减小，比值差减得少，相位差减得多。

2、绕组匝数对误差的影响

绕组匝数对误差的影响特别大，这从式（43）中就可以看出，误差与二次绕组匝数的平方成反比。因此在一般的情况下，增加二次绕组的匝数，能够减小电流互感器的误差。但是随着二次绕组匝数的增加，二次绕组内阻抗也逐渐增大，在一定程度上，限制了误差的下降。同时随着二次绕组的增加，一次绕组也要按比例增加，这就不仅大大的增加了绕组的用铜量，而且还使绕组的绕制工艺复杂。因此从节约使用铜线的观点出发，绕组的匝数应该越少越好，最好能够采用一匝的绕组，这就是单匝式或母线型电流互感器。在这种电流互感器中，一次绕组只有一匝，或者甚至没有一次绕组，而在运行时，让母线从铁心窗口中通过，来当作一匝的一次绕组。

单匝式或母线型电流互感器结构最简单，最省材料。但是当一次电流较小时，误差迅速增大，无法满足准确级的要求。所以单匝式或母线型电流互感器，一般都用在一次电流大于 300~600A；一次电流在 300A 以下的，就做成多匝式的电流互感器。多匝式电流互感器最常用的安匝数为 600、800 或 900 安匝，二次绕组相应为 120、160 或 180 匝。

3、平均磁路长度对误差的影响

公式（43）表明，误差与平均磁路长度成正比。铁心的磁路长度，主要决定于铁心窗口的面积，而铁心窗口的大小，必须保证能装下一次和二次绕组以及它们之间的绝缘。在满足这个要求以后，应该尽可能的缩小铁心窗口面积，缩短铁心的磁路长度。

铁心的磁路长度越小，越省铁心材料，这时很明显的。同时，铁心的磁路长度越小，误差也越小，又反过来可以缩小铁心尺寸，节省材料。当互感器的安匝数很小，也就是铁心窗口面积本来就比较小时，铁心窗口的选择对平均磁路长度，也就是对互感器的误差影响更大。

4、铁心截面对误差的影响

从公式（43）看到：误差与铁心的截面成反比。一般说来，增加铁心截面可以减小误差。但是，实际上伴随着铁心截面的增大，铁心的磁导率下降，铁心的平均磁路长度增长，二次绕组的内阻抗增大。所有这些都大大限制了误差的减小，甚至在某些情况下，铁心截面的增大，不仅会使误差减小，而且反而使误差增大，这就白白的浪费了材料。

铁心截面的形状也影响互感器的误差，这是因为在相同的铁心截面下，铁心越高，平均磁路长度越短；铁心截面高度与宽度相同时，每匝绕组所用的铜线最短，内阻也最小。因此在设计时必须正确选择高度 h 和宽度 b 的比例关系。对于叠片铁心，一般选择高度 h 稍大于宽度 b 即可。对于环状铁心，因为铁心的内径比外径小，绕制绕组时铁心的宽度比高度增长快，所以一般选择 $1.5b \leq h \leq 2b$ 比较合适，这样既保证每匝绕组所用的铜线少，内阻小，而且铁心平均磁路长度又不至太长。

5、铁心材料对误差的影响

从公式（43）中可见，误差与铁心的磁导率成反比。实际上对于同样准确级的电流互感器，如果铁心材料的磁导率增大，就可以缩小铁心的尺寸，而铁心尺寸的缩小，又会提高铁心中的磁密，提高铁心的磁导率，再反过来缩小铁心的尺寸。一般来说，铁心的材料越好，铁心的尺寸就越小，电流互感器就越便宜。因

此，提高铁心材料的磁性能，是缩小测量用电流互感器尺寸的主要途径，特别是对于准确级越高的电流互感器，越显得重要。

在现有的磁性材料中，坡莫合金的磁性能最好，由于它的价格高一般只用来制造 0.2 级以上精密电流互感器。近半个世纪以来，冷轧硅钢片开始大量生产，它的磁导率为热轧硅钢片的 2~4 倍。世界各国都首先用它来取代原电流互感器中的热轧硅钢片，平均可使测量用电流互感器的铁心缩小 1/2 至 1/3。我国统一设计的 LMZ-0.5 和 LA-10 等新型电流互感器，都采用了冷轧硅钢片铁心，使互感器的铁心显著减小。

6、二次负荷对误差的影响

由公式 (43) 可以看到：互感器的误差与二次负荷的大小成正比。实际上当二次负荷增大时，铁心的磁密增大，铁心的磁导率也略有增大。所以互感器的误差随着二次负荷的增大而增大，但小于成正比的增大。

二次负荷的功率因数，也就是二次负荷 Z 的功率因数角 Φ 的余弦。 Φ 角是二次总阻抗角 α 的主要组成部分，对互感器的误差大小虽然没有影响，但由式 (29) 和 (30) 可见，二次负荷功率因数角 Φ 越大， α 越大，则 $\sin(\Phi+\alpha)$ 数值越大，比值绝对值越大； $\cos(\Phi+\alpha)$ 数值越小，相位差越小。因此，随着二次负荷功率因数角 Φ 的增大，互感器的比值差增大，相位差减小。

如果用线段的长度来表示阻抗 Z、电阻 R 和电抗 X，那么 Z、R、X 可以组成一个三角形，叫做阻抗三角形，见图 7。Z 和 R 线段的夹角就是 Φ 角。

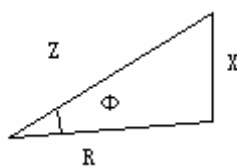


图 7 阻抗三角形

由阻抗三角形可见：

$$\cos\Phi=R/Z \quad (44)$$

$$\sin\Phi=X/Z \quad (45)$$

$$Z=R/\cos\Phi=X/\sin\Phi=\sqrt{(R^2+X^2)} \quad (46)$$

因此， $\cos\Phi=1$ ，即 $R=Z$ ， $X=0$ ； $\cos\Phi=0.8$ ，即 $R=0.8Z$ ， $X=0.6Z$ 。

[例 20] 已知互感器二次绕组内阻 $R_2=0.1\Omega$ ，内感抗 $X_2\approx 0$ ，外接负荷 $Z=0.4\Omega$ ， $\cos\Phi=0.8$ ，求二次总负荷 Z_{02} 的大小及其阻抗角 α 。

当两个阻抗相加时，先按式 (44) 和 (45) 将两阻抗的电阻和电抗算出来，并分别求出电阻和电抗之和，然后再按式 (46) 和 (44) 或 (45) 算出相加后的总阻抗的大小和角度。

根据上述计算方法和步骤，由式 (44) 和 (45) 算出外接负荷 Z 的电阻和电抗。

$$R=Z \cos\Phi=0.4*0.8=0.32\Omega$$

$$X=Z \sin\Phi=0.4*0.6=0.24\Omega$$

分别求出电阻和电抗之和：

$$R_{02}=R_2+R=0.1+0.32=0.42\Omega$$

$$X_{02}=X_2+X=0+0.24=0.24\Omega$$

再按式 (46) 和 (45) 算出总阻抗的大小和角度：

$$Z_{02}=\sqrt{(R_{02}^2+X_{02}^2)}=\sqrt{(0.42^2+0.24^2)}=0.483\Omega$$

$$\sin\alpha = X_{02}/Z_{02} = 0.24/0.483 = 0.496$$

由三角函数表查得或由计算器求得，当 $\sin\alpha = 0.496$ 时， $\alpha = 29.7^\circ$

[例 21] 当例 20 的互感器运行在 10% 额定电流时，需要二次绕组产生多大的感应电势 E_2 ？

$$I_2 = 10\%I_{2n} = 10\% \times 5 = 0.5A$$

由式 (19) 可以求得：

$$E_2 = I_2 Z_{02} + 0.5 \times 0.483 = 0.242V$$

[例 22] 如这个互感器是母线型的，其电流比为 400/5，铁心为 D340 冷轧硅钢片，截面 $S = 2.5 \times 1cm^2$ ，求上述 10% I_n 时的磁密 B 、磁场强度 H 和损耗角 ψ 。

母线型互感器即为一匝穿心，故这个互感器的安匝数就是 1*400 安匝，可以求得二次绕组匝数：

$$W_2 = 400/5 = 80$$

由式 (23) 即可求得铁心的磁密

$$B = 45E_2/W_2Sk = (45 \times 0.242)/(80 \times 2.5 \times 0.9) = 0.0605T = 605Gs$$

式中冷轧硅钢片 k 取 0.9。由附录 D340 铁心 $B-H$ 和 $\psi-H$ 曲线可以查得：当 $B = 605Gs$ ， $H = 0.024A/cm$ ， $\psi = 32^\circ$

[例 23] 设上述互感器的铁心尺寸为 $\Phi 65/\Phi 85 \times 25$ （即内径 $D_1 = 65$ ，外径 $D_2 = 85$ ，高度 $h = 25mm$ ），求互感器在 10% I_0 时的比值差和相位差。由铁心尺寸可知铁心平均磁路长度 l 为：

$$L = \pi D_p = \pi (D_1 + D_2) / 2 = 7.5\pi = 23.5cm$$

式中 D_p 为铁心的平均直径。再由式 (27) 求出在 10% I_n 时铁心所需的励磁磁动势：

$$I_0 W_1 = Hl + 0.024 \times 23.5 = 0.564A$$

这时一次安匝为 10% $I_n W_1 + 10\% \times 400 \times 1 = 40$ 安匝，因此励磁安匝占一次安匝的百分数为：

$$\epsilon = I_0 W_1 / I_1 W_1 = 0.564/40 = 0.0141 = 1.41\%$$

再按式 (29) 和 (30) 求得互感器的比值差和相位差：

$$\begin{aligned} f &= -\epsilon \sin(\psi + \alpha) \times 100 \\ &= -0.0141 \sin(32^\circ + 29.7^\circ) \times 100 \\ &= -0.0141 \sin 61.7^\circ \times 100 \\ &= -0.0141 \times 0.88 \times 100 = -1.24 (\%) \\ \delta &= \epsilon \cos(\psi + \alpha) \times 3438 \\ &= -0.0141 \cos 61.7^\circ \times 3438 \\ &= 0.0141 \times 0.47 \times 3438 = 22.8 (') \end{aligned}$$

根据计算结果可见，这台互感器在 10% I_n 时，比值差为 -1.24%，相位差 +22.8 分。

五、电流互感器误差计算举例

设母线型 400/5 电流互感器的铁心尺寸为 $\Phi 65/\Phi 85 \times 25$ ，铁心材料为 D340，二次绕组用两根 $\Phi 1.04$ 铜导线并联绕制，互感器的额定容量为 10VA， $\cos\Phi = 0.8$ ，试计算这台互感器的误差，并判断它的准确级。

电流互感器的比值差都是负值，相位差都是正值，且二次负荷越小，误差越小。由此可见，如果在额定负荷下互感器的误差不超出允许值，那么在下限负荷下互感器的误差更小，肯定不会超出允许值，因此，在计算电流互感器误差时，

下限负荷的误差可以不必计算，只要计算额定负荷下最小电流和最大电流即 5%（新标准）或 10%（旧标准）和 120%额定电流这两点的误差。先计算二次绕组内阻抗。二次绕组均匀绕制，内感抗可以略去不计，即 $X_2 \approx 0.400/5$ 母线型互感器的二次绕组匝数：

$$W_2 = 400 * 1/5 = 80$$

铁心截面为 $25 * 10 \text{mm}^2$ 加上绝缘后，铁心截面的周长约为 $2 * [(25+3) + (10+3)] = 82 \text{mm}$ ，二次绕组绕一层，还要加上绕组本身的线径，所以每匝绕组的长度约为 86mm，铜导线 50°C 时电阻系数 $\rho \approx 0.02 \rho \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ 。据此可算出互感器二次绕组内阻：

$$R_2 = \rho L/A = 0.02 * 6.9/1.7 = 0.08 \Omega$$

其中 L_{wei} 二次绕组总长度，单位 m，A 为导线截面，单位 mm^2 。

$$L = 80 * 86 = 6900 \text{mm} = 6.9 \text{m}$$

$$A = 2 * (\pi/4) * 1.04^2 = 1.7 \text{mm}^2$$

二次绕组内阻约为 0.1Ω 。

按例 18 至例 21 同样顺序，分别算出额定负荷下 5%、10%和 120% I_n 时互感器的比值差和相位差，计算结果列于表 9。

表 9 额定负荷下误差计算结果

I_n (%)	E_2 (V)	B (Gs)	H (A/cm)	ψ ($^\circ$)	$I_0 W_1$ (A)	ε (%)	$\varphi + \alpha$ ($^\circ$)	F (%)	δ ($'$)
5	0.121	303	0.016	27	0.376	1.88	56.7	-1.57	+35.5
10	0.242	605	0.024	32	0.584	1.41	61.7	-1.24	+22.8
120	2.90	7300	0.14	59	3.3	0.69	88.7	-0.69	0

表中 10% I_n 时的计算过程见例 20 至例 23。120% I_n 时计算过程如下：

$$E_2 = I_2 Z_{02} = 120\% I_n Z_{02} = 6 * 0.483 = 2.90 \text{V}$$

$$B = 45 E_2 / (W_2 S_k) = 45 * 2.9 / (80 * 2.5 * 0.9) = 0.73 \text{T} = 7300 \text{Gs}$$

由 B340B-H 和 ψ -H 曲线查得：当 $B = 7300 \text{Gs}$ 时， $H = 0.14 \text{A/cm}$ ， $\psi = 59^\circ$ 。

$$I_0 W_1 = H l = 0.14 * 23.5 = 3.3 \text{A}$$

$$\varepsilon = I_0 W_1 / I_1 W_1 = 3.3 / (120\% * 400) = 3.3/480 = 0.0069 = 0.69\%$$

$$\psi + \alpha = 59^\circ + 29.7^\circ = 88.7^\circ$$

$$f = -\varepsilon * \sin(\psi + \alpha) * 100 = -0.0069 * \sin 88.7^\circ * 100 \approx -0.69\%$$

$$\delta = \varepsilon * \cos(\psi + \alpha) * 3438 = 0.0069 * \cos 88.7^\circ * 3438 \approx 0(')$$

由表 9 计算结果可见，这台互感器满足 1 级。

[例 24] 算出上述这台互感器在下限负荷 $0.15 \Omega \cos \Phi = 0.8$ 时的误差。

$$R = Z \cos \Phi = 0.15 * 0.8 = 0.12 \Omega$$

$$X = Z \sin \Phi = 0.15 * 0.6 = 0.09 \Omega$$

$$R_{02} = R_2 + R = 0.1 + 0.12 = 0.22 \Omega$$

$$X_{02} = X_2 + X = 0 + 0.09 = 0.09 \Omega$$

$$Z_{02} = \sqrt{(R_{02}^2 + X_{02}^2)} = \sqrt{(0.22^2 + 0.09^2)} = 0.238 \Omega$$

$$\sin \alpha = X_{02} / Z_{02} = 0.09 / 0.238 = 0.378$$

$$\alpha = 22.2^\circ$$

再按上述同样的计算步骤，算出下限负荷下 5%、10%和 120% I_n 时的比值差和相位差，列于表 10。

表 10 下限负荷下误差计算结果

In (%)	E ₂ (V)	B (Gs)	H (A/cm)	ψ (°)	I ₀ W ₁ (A)	ε (%)	ψ+α (°)	F (%)	Δ (′)
5	0.06	145	0.009	22	0.212	1.06	44.2	-0.74	+26.2
10	0.119	290	0.016	28	0.376	0.94	50.2	-0.72	+20.4
120	1.43	3500	0.09	51	2.12	0.44	73.2	-0.42	+4.4

电流互感器误差的补偿

由表 9 和表 10 电流互感器误差计算结果可知，电流互感器的比值差都是负值，相位差都是正值。而在表 6 和表 7 中所列的各级电流互感器的误差，既可以为正值，又可以为负值。这就是说，电流互感器可能比值差偏负不合格，相位差偏正不合格，但却没有利用允许的正比值差和负值相位差。因此，按表 9 计算结果设计的电流互感器，其准确度是比较低的。这样的设计浪费了不少铁心和铜线，使互感器的体积增大。

为了提高互感器的准确度，一般都采用各种补偿方法，来补偿电流互感器的误差。但是有一种看法认为，采用补偿的电流互感器的性能不好。我们认为，这种看法是不全面的。采用好的补偿方法，可以使互感器的误差减小，也能使互感器的性能提高。实际上国内外正式生产的各种测量用电流互感器，都没有不采用补偿的。

因为在一般情况下，对电流互感器误差补偿的数值都比较小，所以不论哪种补偿方法，一般可以近似认为在补偿前后互感器整个铁心的磁密和磁场强度都不变，也就是原来互感器的比值差 f 和相位差 δ 都基本不变。这样，就可以利用叠加原理，求得经过补偿后互感器比值差 f' 和 δ' 的数值：

$$f' = f + \Delta f (\%) \quad (47)$$

$$\delta' = \delta + \Delta \delta (') \quad (48)$$

式中 Δf 和 $\Delta \delta$ 分别表示对比值差和相位差的补偿数值。

现将国产电流互感器常用的几种补偿方法，简单介绍于下：

一、匝数补偿

由式 (9) 和 (10) 可见，电流互感器的电流与匝数成反比。如果二次绕组比原来额定匝数 W_2 少绕 W_x 匝，即二次绕组实绕 $W_2 - W_x$ 匝， W_x 叫补偿匝数，那么二次电流就会成反比的增大，由原来的 I_2 增大为 I_2' ，即二次绕组电流增大了 $I_2' - I_2$ 。

如上所述，由于互感器铁心需要消耗励磁电流，所以通过二次绕组的电流小了，造成了互感器的误差。现在又由于二次绕组少绕了 W_x 匝，使二次电流增大了 $I_2' - I_2$ ，补偿了原来所减小的一部分电流，因而也就相当于对互感器的误差起了补偿作用。

由式 (9) 和 (10) 既可求得匝数补偿后的二次电流 I_2' ：

$$I_2 W_2 = I_2' (W_2 - W_x) \quad (49)$$

$$I_2' = I_2 W_2 / (W_2 - W_x) \quad (50)$$

设以 ΔI 表示经过补偿后二次电流的增量,则由式(50)得到:

$$\Delta I_2 = I_2' - I_2 = I_2 [W_2 / (W_2 - W_X) - 1] = I_2 W_X / (W_2 - W_X) \quad (51)$$

若用百分数表示,即可求得匝数补偿对比值差的补偿数值 Δf :

$$\Delta f = \Delta I_2 / I_2 * 100 = W_X / (W_2 - W_X) * 100 \approx W_X / W_2 * 100 (\%) \quad (52)$$

式中因为补偿匝数很少,在大多数情况下,

$$W_X = 1 \text{ 匝}, \text{ 即 } W_X \ll W_2, \text{ 故 } W_X / (W_2 - W_X) \approx W_X / W_2$$

由式(52)可见,匝数补偿对比值差的补偿数值与补偿匝数 W_X 成正比,与二次绕组匝数 W_2 成反比,且与二次负荷和电流大小均无关。

根据式(47)和(48)就可以求得经过匝数补偿后互感器的比值差和相位差:

$$f' = f + \Delta f = f + (W_X / W_2) * 100\% \quad (53)$$

$$\delta' = \delta + \Delta \delta = \delta (\prime) \quad (54)$$

因为匝数补偿只对比值差起补偿作用,对相位差基本不起补偿作用,即 $\Delta \delta \approx 0$,所以经过匝数补偿后互感器的相位差基本不变。

[例 25] 一台单匝式 1000/5 电流互感器,二次绕组少绕一匝,对比值差补偿多少?

先求出二次绕组匝数:

$$W_2 = 1000 * 1 / 5 = 200$$

由式(52)可求得对比值差的补偿数值:

$$\Delta f = (W_X / W_2) * 100 = 1 / 200 * 100 = 0.5\%$$

对比值差补偿的数值为+0.5%。

[例 26] 一台 400 安匝的电流互感器,二次绕组少绕一匝,对比值差补偿多少?

$$W_2 = 400 / 5 = 80$$

$$\Delta f = (W_X / W_2) * 100 = 1 / 80 * 100 = 1.25\%$$

400 安匝互感器二次绕组少绕一匝,对比值差补偿为+1.25%。

[例 27] 表 9 和表 10 所属 400/5 电流互感器是否可以采用一匝补偿?

由例 26 求得 400/5 互感器二次绕组少绕一匝对比值差补偿的数值为+1.25%,根据表 9 和表 10 所列的比值差,再按式(53)可以算出经过匝数补偿后互感器的比值差,计算结果列于表 11。

表 11 中以额定负荷 10% I_n 时为例,其计算过程如下:

$$f' = f + \Delta f = -1.24 + 1.25 = 0.01\%$$

表 11 一匝补偿后的比值差

二次负荷	% I_n	F(%)	$\Delta f(\%)$	$f'(\%)$
0.4 Ω	5	-1.57	+1.25	-0.32
	10	-1.24		+0.01
	120	-0.69		+0.26
0.15 Ω	5	-0.74	+1.25	+0.51
	10	-0.72		+0.53
	120	-0.42		+0.83

由表 11 计算结果可见,采用一匝补偿的数值太大了,使比值差全部偏正,特别是在下限负荷 120% I_n 时偏正最严重。经过一匝补偿后互感器仍然只能满足 1 级。

二、半匝或分数匝补偿

无论是变压器还是互感器，在正常运行时，其一次绕组和二次绕组都是通过所接的线路形成封闭回路，所以绕组匝数的计算方法，都是以通过铁心窗口为准，有几匝通过铁心窗口就算几匝。例如图 8 中的 A 通过铁心窗口有两次，就是两匝；而 B 绕组虽然在铁心窗口外绕了一圈，但它通过铁心窗口只有一次，故只有一匝。



图 8 绕组匝数的算法

由此可见，绕组必须一匝一匝的绕制，不能绕半匝或三分之一匝。在匝数补偿中，一般只能补偿一匝、二匝或三匝。但是如果一匝补偿的数值太大，使经过补偿后比值差太偏正了，如例题 27，可以采用半匝或分数匝补偿。

半匝或分数匝补偿有两种结构。

1、双铁心或铁心穿孔分数匝补偿

如果把互感器的铁心分成大小完全相同的两个铁心，并且在绕制二次绕组中，有一匝只绕在一个铁心上，见图 9。那么只绕在一个铁心上的这一匝，对整个铁心（即双铁心）来说，就相当于只绕了半匝，这就得到了半匝补偿。少绕绕组那部分铁心就叫做辅助铁心。

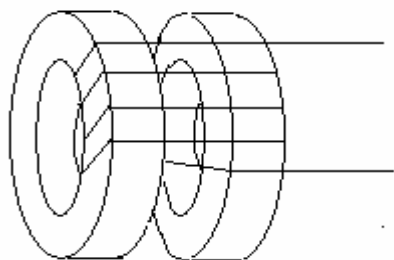


图 9 双铁心分数匝补偿

如果所分成的两个铁心不是完全相同，辅助铁心的截面为整个铁心截面的三分之一，那么二次绕组就相当于少绕了三分之一匝，而得到三分之一匝的补偿，据此可以列出分数匝补偿的计算公式：

$$\Delta f = (1/W_2) * (S_b/S) * 100\% \quad (55)$$

式中 S_b 为辅助铁心的截面； S 为整个铁心截面。

由式 (55) 可见，双铁心分数匝补偿对比值差补偿的数值与辅助铁心的截面成正比，而与二次绕组匝数和整个铁心的截面成反比。

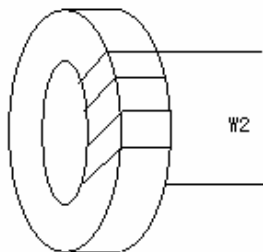


图10 铁心穿孔

把互感器的一个铁分成两个铁心来制作，有时是不方便的，也可以采用在铁心上穿孔的办法，来得到半匝或分数匝补偿，如图 10 所示。同样的，这时少绕组那部分铁心（仍叫辅助铁心）截面为整个铁心截面的 $1/n$ ，就是 $1/n$ 匝补偿。但是这时两铁心的平均磁路长度不同，所以在铁心穿孔分数匝补偿计算公式中，还应加上整个铁心与辅助铁心的平均磁路长度之比，即：

$$\Delta f = (1/W_2) * (S_b/S) * l/l_b * 100\% \quad (56)$$

式中 l 和 l_b 分别为整个铁心和辅助铁心的平均磁路长度。

由式 (56) 可见，铁心穿孔分数匝补偿对比值差的数值与辅助铁心截面积和整个铁心的平均磁路长度成正比，而与二次绕组匝数、整个铁心截面和辅助铁心

平均磁路长度成反比。

实际上在双铁心分数匝补偿中，如果双铁心的平均磁路长度不同，也要按式（56）进行计算。在铁心穿孔分数匝补偿中，如铁心窗口很大，辅助铁心与整个铁心的平均磁路长度相差不多，那么也可以近似按式（55）进行计算。

2、两根导线并绕的分数匝补偿

如果二次绕组采用两根完全相同的导线并联绕制，且有一根导线少绕了一匝，这就相当于整个二次绕组少绕了半匝，而得到了半匝补偿。

如果所使用两根并绕的导线的线径或材料不同，即两根导线的内阻不同，且少绕一匝的那根导线内阻为 R_b ，另一根导线的内阻为 R_u ，那么就得到了 $R_u / (R_b + R_u)$ 匝补偿。这时对比值差补偿的匝数为：

$$\Delta f = (1 / W_2) * R_u / (R_b + R_u) * 100\% \quad (57)$$

导线电阻与截面成反比，与直径的平方成正比，因此式（57）也可以用导线截面 A_u 和 A_b 或导线直径 D_u 和 D_b 表示：

$$\Delta f = (1 / W_2) * A_b / (A_b + A_u) * 100 = (1 / W_2) * D_b^2 / (D_b^2 + D_u^2) * 100\% \quad (58)$$

式中 A_b 、 D_b ——少绕一匝那根导线的截面和直径。

由式（57）和（58）可见，两根导线并绕的分数匝补偿对比值差补偿的数值与绕 W_2 匝那根导线的内阻或少绕一匝那根导线的截面成正比；而与二次绕组匝数以及两根导线内阻或截面之和成反比。

实际上还可以在少绕一匝那根导线上串联一根电阻丝，来改变分数匝补偿，如图 11 所示。设电阻丝的电阻为 r ，则这时对比值差补偿数值为：

$$\Delta f = (1 / W_2) * R_u / (R_b + R_u + r) * 100\% \quad (59)$$

因为电阻丝可以在互感器绕制好后进行试验时接入并且可以随意调节电阻丝的阻值，所以这样就能很方便的得到所需要的分数匝补偿。这种补偿方法主要用于小于三分之一匝补偿的精密电流互感器中。

无论哪一种分数匝补偿，都是匝数补偿的一部分，所以分数匝的补偿也与匝数补偿一样：对相位差基本上都不起补偿作用，对比值差的补偿作用均与二次负荷和电流大小无关。

[例 28] 一台 10/5、600 安匝电流互感器，如果采用半匝补偿，对比值差补偿多少？

$$W_2 = 600 / I_2 = 600 / 5 = 120$$

$$\Delta f = 1/2 * (1 / W_2) * 100 = 1/2 * 1 / 120 * 100 = 0.416\%$$

对比值差补偿为 +0.416%

[例 29] 一台 500 安匝双铁心电流互感器，两个铁心的材料和尺寸完全相同，且二次绕组最后一匝只绕在一个铁心上，求对比值差的补偿数值。

$$W_2 = 500 / I_2 = 500 / 5 = 100$$

$$\Delta f = 1/2 * (1 / W_2) * 100 = 1/2 * 1 / 100 * 100 = 0.5\%$$

对比值差补偿为 +0.5%

[例 30] 一台 400 安匝电流互感器，二次绕组用三根 $\Phi 1.04$ 导线并联绕制，其中有一根少绕一匝，问对比值差补偿多少？

$$W_2 = 400 / I_2 = 400 / 5 = 80$$

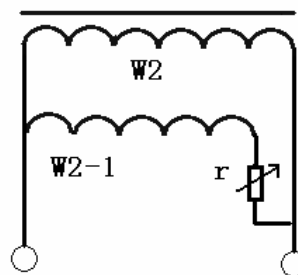


图 11 可调的分数匝补偿

$$\Delta f = 1/3 * (1/W_2) * 100 = 1/3 * 1/80 * 100 = 0.416\%$$

三根并绕一根少绕一匝即为三分之一匝补偿，对比值差补偿为+0.416%

[例 31] 在例 27 中，如有两根导线少绕一匝，对比值差补偿多少？

$$\Delta f = 2/3 * (1/W_2) * 100 = 2/3 * 1/80 * 100 = 0.832\%$$

三根并绕两根少绕一匝即为三分之二匝补偿，对比值差补偿为 0.832%

[例 32] 表 9 和表 10 所属 400/5 电流互感器是否可以采用半匝补偿？经过半匝补偿后互感器的准确级有否提高？

表 9 和表 10 所属 400/5 电流互感器，二次绕组是采用两根 $\Phi 1.04$ 铜导线绕制，可以采用半匝补偿，即将其中的一根导线少绕一匝。

半匝补偿对比值差补偿的匝数为：

$$\Delta f = 1/2 * (1/W_2) * 100 = 1/2 * 1/80 * 100 = 0.625\%$$

根据表 9 和表 10 所列的比值差数值，再按式 (47) 求得经过半匝补偿后互感器的比值差，计算结果列于表 12 中。

表 12 半匝补偿后的比值差

二次负荷	%In	f (%)	Δf (%)	f' (%)
0.4 Ω	5	-1.57	+0.625	-0.945
	10	-1.24		-0.615
	120	-0.69		-0.065
0.15 Ω	5	-0.74	+0.625	-0.115
	10	-0.72		-0.095
	120	-0.42		+0.205

由表 12 计算结果可见，该互感器经过半匝补偿后满足 0.5 级。

由此可见，原来只能满足 1 级的电流互感器，经过采用匝数或分数匝补偿，就可能提高到 0.5 级。这种匝数或分数匝补偿的结构是十分简单的。因此，测量用电流互感器绝大多数都采用了这种匝数或分数匝补偿，来提高互感器的准确度或缩小互感器的尺寸。

由表 12 计算结果还可以看出，在采用匝数或分数匝补偿的电流互感器中，误差最大的是额定负荷 5%或 10%In 和下限负荷 120%In 这两点，所以在匝数或分数匝补偿的电流互感器中，只要计算额定负荷 5%或 10%In 和下限负荷 120%In 这两点的误差，其他各点例如额定负荷 120%I 和下限负荷 5%或 10%In 都可以不必计算。

三、双铁心反励磁补偿

在上述双铁心半匝补偿中，如果在一个铁心上少绕的二次绕组匝数（也叫补偿匝数）不是 1 匝，而是 5~10 匝，那么这时对互感器误差的补偿匝数是否就相当于 5~10 个半匝补偿，即 2.5~5 匝补偿呢？

回答是否定的。这是因为补偿匝数增加后，辅助铁心的磁密增大，磁导率和损耗角一般也增大，所以对比值差的补偿增大，对相位差也起到了补偿作用。这就是说，双铁心 5~10 个半匝补偿能够补偿相位差，且对比值差补偿的数值大于 2.5~5 匝补偿。

双铁心 5~10 个半匝补偿对比值差补偿太多，还得加上增匝补偿，即与上述匝数补偿（减匝补偿）相反，将二次绕组匝数增加了 2~4 匝。于是两个铁心绕的二次绕组匝数，一个少于 W_2 ，为 $W_2 - (3\sim 6)$ 匝；另一个多于 W_2 ，为 $W_2 + (2\sim 4)$

匝。这样，两个铁心上的一次安匝和二次安匝都不平衡，就产生方向相反的附加励磁磁动势，分别加在两个铁心上，使两个铁心的磁密方向接近相反，数值普遍增大，这种补偿方法一般叫做双铁心反励磁补偿，或者简称为反励磁补偿。

关于反励磁补偿的原理，一般都认为这是因为两个铁心的磁密都增大了，铁心的磁导率增大了，所以互感器的误差也就减小了。这种看法对不对呢？

从能量损耗来看，两个铁心的磁密都增大了，尽管两铁心磁密的方向相反，铁心的励磁损耗只能增大不能减小，那么得到的结论只能是：铁心磁密增大，励磁损耗增大，励磁安匝增大，互感器误差增大。由此可见上述磁导率增大的理论是错误的。

反励磁补偿之所以对互感器误差起补偿作用，根本原因不在于铁心磁密的大小，而在于分数匝补偿。在反励磁补偿中，尽管铁心的励磁损耗增大，互感器的误差本来略有增大，但是反励磁补偿又是一种特殊的分数匝补偿，如上所述，它好像是 5~10 个半匝补偿减去 2~4 匝补偿，而实际上它对比值差的补偿大于 2.5~5 匝减去 2~4 匝，同时还对相位差起补偿作用。

由以上分析可见，这种又减匝（分数匝）又增匝补偿的反励磁补偿方法是很不合理的。既然 5~10 个半匝补偿太多，就完全可以改为 5~10 个五分之一匝或者更小一些分数匝补偿，根本用不着增匝补偿。只要 5~10 匝补偿匝数不变，辅助铁心的磁密和损耗角也基本不变，也就能达到基本相同的对比值差和相位差的补偿效果。这种双铁心或者铁心穿孔 5~10 个分数匝补偿，就简称为双铁心或铁心穿孔补偿。

如上所述，反励磁补偿和双铁心补偿对比值差和相位差的补偿效果基本相同，补偿数值都与辅助铁心的磁密有关：辅助铁心的磁导率 μ_b 越大，对误差补偿的数值越大；辅助铁心的损耗角 ψ_b 越大，对相位差补偿的数值也越大。因此，这种补偿方法与分数匝补偿不同；当二次电流改变时， μ_b 和 ψ_b 都随着电流改变，对比值差和相位差补偿的数值也随着改变；当 μ_b 和 ψ_b 最大时，对比值差和相位差补偿最多。

在没有补偿的电流互感器中，随着电流增大，比值差和相位差都减小。而反励磁和双铁心补偿，一般在 50% I_n 时， μ_b 和 ψ_b 最大，对比值差和相位差的补偿最多。因此，采用这种补偿，对 10% I_n 补偿太少，对 50% I_n 却补偿过多，互感器的性能并不好。反励磁补偿过去用在 LDC-10 型和 LFC-10 型电流互感器中，后来逐步为性能更好的磁分路补偿所代替。

四、磁分路补偿

在双铁心补偿中，如果增加补偿匝数 W_b ，就可以使 7%~10% I_n 时辅助铁心的磁导率 μ_b 和损耗角 ψ_b 都达到或接近最大值。这样在 5%~10% I_n ，即原来互感器的误差最大时，对互感器的比值差和相位差补偿也最多，而当电流逐步增大至 120% I_n ，即原来互感器的误差随电流增大而相应减小时，对互感器的比值差和相位差补偿也随着减小。但是，在 W_b 增加后，为了使对互感器误差补偿的数值不随着增大，就必须相应地减小辅助铁心截面，直到只有 1~3 片硅钢片。这时辅助铁心相当于一个磁分路，所以这种补偿方法就叫做磁分路补偿或者叫做小铁心补偿。由此可见，磁分路补偿的最大特点是：7%~10%额定电流时磁分路的磁导率 μ_b 和损耗角 ψ_b 都最大。这可以通过增减 W_b 的匝数来达到。而磁分路补偿数值的大小，则由增减磁分路截面来调节。这样，只要选择合适的补偿匝数和磁分路截面，就可以使经过磁分路补偿后互感器的误差显著减小，互感器的性能

有较大的提高。

在环状铁心的互感器中，磁分路也是环状的，叫做圆环磁分路。从理论上说，这时磁分路可以加在铁心的外周或内周或两侧，都能得到同样的补偿效果。但从制作工艺上来看，把磁分路加在铁心外周是最方便的。铁心为带绕铁心，磁分路也可以带绕，根据补偿数值的大小绕1~3片硅钢片即可，其原理图如图12所示，图中A为示意图，B为原理线路；1为互感器铁心，叫做主铁心，2为磁分路。二次绕组W₂中，有W_b匝只绕在主铁心上（B中W_b只画在铁心1上），W_b就是补偿匝数。其余W₂和W₁绕组在两铁心上，即绕在两铁心上。

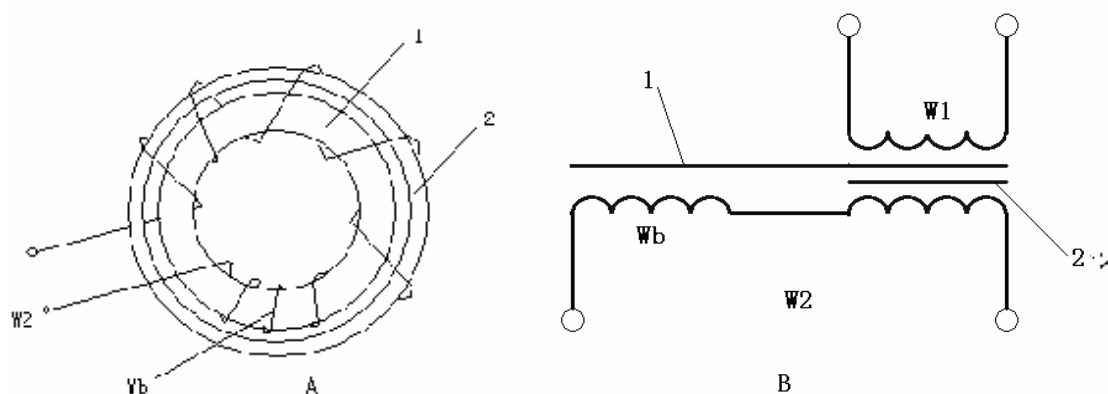


图12 两环磁分路补偿

在圆环磁分路中，磁分路的头尾必须搭接40~60mm，使磁分路为环状，这样搭接处的空气隙可以略去不计。所以圆环磁分路的磁场强度H_b，可以根据补偿匝数W_b算出。

$$H_b = I_2 W_b / L_b \quad (60)$$

式中L_b为磁分路的平均磁路长度。

根据W_b算出的H_b，即可由磁分路铁心的磁化曲线，查出相应于H_b时的磁密B_b和损耗角ψ_b，从而算出圆环磁分路对误差的补偿数值。

$$\Delta \varepsilon = [b (W_2 - W_b) / W_2^2] (B_b H S_b L / B H_b S L_b) \quad (61)$$

式中凡有注脚_b的，均匀磁分路相应参数；凡没有注脚的，就是主铁心相应参数（下同）。对比值差和相位差的补偿为：

$$\Delta f = k_f \Delta \varepsilon \cos(-\psi_b + \psi) * 100 (\%) \quad (62)$$

$$\Delta \delta = k_\delta \Delta \varepsilon \sin(-\psi_b + \psi) * 3438 (') \quad (63)$$

式中k_f和k_δ分别为比值差和相位差计算校正系数：

$$k_f = 0.6 \sim 0.8 \quad (64)$$

$$k_\delta = 0.4 \sim 0.6 \quad (65)$$

当磁分路补偿较强时，取小数；较弱时取大数。

在式(62)和(63)中，当电流小于50%I_n时，ψ_b > ψ，对比值差补偿为正值，对相位差补偿为负值。当电流为100%~120%I_n时，ψ_b < ψ，对比值差补偿为正值，对相位差补偿也为正值，即这时反而使相位差增大了。

由式(62)和(63)可见，为了增大对相位差的补偿，必须选用损耗角大的铁心做磁分路，例如用铁片或冷轧硅钢片做磁分路。

一般硅钢片铁心在最大磁导率μ_m时，其损耗角也近似等于最大损耗角ψ_m这时的磁场强度为H_m。对于冷轧硅钢片带绕铁心，H_m=0.23~0.3A/cm，ψ_m=55°~65°；对于热轧硅钢片带绕铁心，H_m=0.3~0.5A/cm，ψ_m=40°~50°。

在设计圆环磁分路补偿时，先根据磁分路铁心的材料，通过B-H曲线的原

点，做 B-H 曲线的切线；且切点就是最大磁导率 μ_m 点，由切点读出这时的磁场强度 H_m ，这时的二次电流为 7%~10% 额定电流，因此由式 (60) 可求出补偿匝数：

$$W_b = H_m L_b / (7\% \sim 10\%) I_2 n \quad (66)$$

根据计算结果选取 W_b 为整数匝。

补偿匝数 W_b 决定之后，在按式 (60) 至 (63) 的顺序算出圆环磁分路对比值差和相位差的补偿数值。补偿数值的大小，可通过改变磁分路的片数即截面来调节，也就是根据对比值差和相位差补偿的合适数值，来选择磁分路的片数。

圆环磁分路的片数必须为整数，即为一二片或三片，一般不要用分数片，如 1.5 片，2.3 片等。因为如果磁分路的片数不是整数的话，那么沿着磁分路铁心截面是变化的，磁分路上铁心的密度也就不相等，这样就不能满足磁分路要求的 7%~10% 额定电流时，铁心的磁导率和损耗角都最大。所以圆环磁分路头尾搭接处也不宜太长，否则磁分路的搭接处就成了分数片了。

全国统一设计的 LMZ-0.5 和 LA-10 等新型电流互感器，在小电流比时（一般在 400/5，即 400 安匝以下）都采用了上述圆环磁分路补偿。

此外，还有用在仿制产品 LQG-0.5 型和 LFC-10 型叠片铁心互感器上的方形磁分路。对于这种磁分路的补偿原理，过外有的书上也认为是铁心磁导率增大，励磁安匝减小了，因而对误差起补偿作用。同反励磁补偿磁导率增大的理论一样，这种磁分路补偿理论也是错误的。实际上方形磁分路和圆环磁分路的补偿原理是一样的，都是由于磁分路给二次绕组提供了部分感应电势，使主铁心提供的感应电势减少了，磁密降低了，因而互感器的误差减小了。

方形磁分路必须通过主铁心才能组成闭合磁路，如图 13 所示，磁分路 2 和主铁心 1 才能组成闭合回路，如图 13 所示，磁分路 2 和主铁心 1 之间靠机械联接，有气隙存在，需要消耗励磁安匝。所以这种磁分路磁导率很低。损耗角也很小，同时还不能使 10% I_n 时磁分路的磁导率和损耗角都达到最大值，以致对比值差的补偿数值不大，对相位差基本上不起补偿作用，其补偿效果不如圆环磁分路。

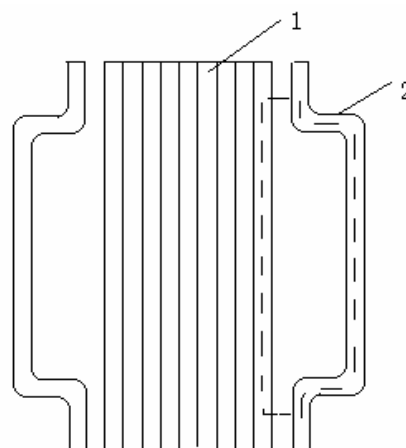


图13 方形磁分路示意图

[例 33] 由 D340 冷轧硅钢片卷成的圆环磁分路，其直径为 $\Phi 90$ ，求磁分路补偿匝数 W_b 。

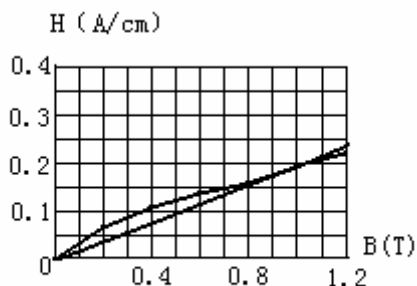


图 14 D340铁心B-H曲线

在带绕 D340 冷轧硅钢片铁心 B-H 曲线上通过原点作 B-H 曲线的切线，见图 14，读得切点的 $H_m = 0.2 \text{ A/cm}$ 。

根据式 (66) 可求得补偿匝数 $W_b = H_m L_b / 10\% I_2 n = 0.2 * 9\pi / 0.5 = 11.3$ 故可以选取补偿匝数 $W_b = 12$ 匝。

[例 34] 如上述磁分路改用 D42 热轧硅钢片材料, 则其补偿匝数应为多少?
同样, 在 D42 带绕铁心 B-H 曲线上, 通过原点作 B-H 曲线的切线, 见图 15, 读得切点的 $H_m=0.4A/cm$ 。

所以

$$W_b = H_m L_b / 10\% I_2 n = 0.4 * 9\pi / 0.5 = 22.6$$

应选取补偿匝数 $W_b=23$ 匝。

[例 35] 圆环磁分路的直径为 $\Phi 150$, 材料为 D340 冷轧硅钢片, 求磁分路补偿匝数。

由例 33 以求得 D340 磁分路的 $H_m=0.2A/cm$ 。

$$所以 W_b = H_m L_b / 10\% I_2 n = 0.2 * 15\pi / 0.5 = 18.8$$

可选磁分路补偿匝数 $W_b=19$ 匝。

由例 32 至 35 可见, 圆环磁分路补偿匝数 W_b 的选择, 只与磁分路的直径和材料有关, 而与磁分路本身的截面以及主铁心的材料, 互感器的安匝数等均无关。当圆环磁分路直径相同时, 磁分路的磁性能越好, 则补偿匝数 W_b 越少。

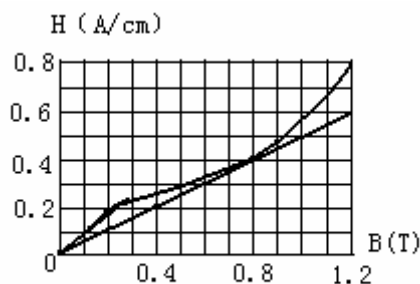


图 15 D42铁心B-H曲线

五、短路匝补偿

在互感器的铁心上, 用导线绕 1 匝或 2 匝绕组并短路焊牢如图 16 中的 W_k 就叫做短路匝。这样, 一次安匝中除原来消耗的铁心励磁安匝外, 还要消耗短路匝中短路电流安匝, 所以这时互感器的误差为励磁安匝和短路电流安匝之和。互感器误差中所增加的短路电流安匝部分, 也就相当于短路匝对误差所起的补偿作用, 这种补偿方法就叫做短路安匝补偿。它对误差补偿的数值就等于负的短路电流安匝与一次电流安匝之比。

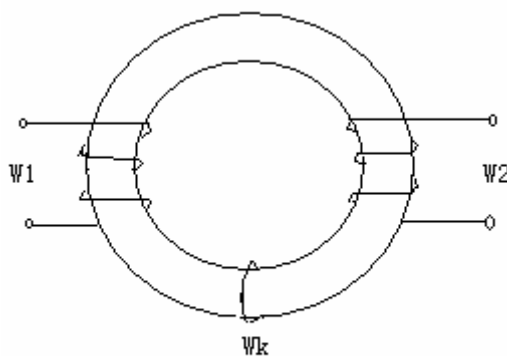


图 16 短路匝补偿

因为铁心的感应电势和绕组的匝数成正比。故根据短路匝的匝数 W_k , 即可求得短路匝的感应电势 E_k :

$$E_k = (W_k / W_2) E_2 \quad (67)$$

如果短路匝 W_k 的内阻为 R_k , 因匝数很少, 内电抗可略去不计, 即 $X_k \approx 0$, 由欧姆定律即可求得短路匝中的短路电流 I_k :

$$I_k = E_k / R_k = (W_k / W_2) * (E_2 / R_k) \quad (68)$$

短路电流乘以短路匝的匝数即为短路电流安匝:

$$I_k W_k = (W_k / W_2) * (E_2 / R_k) * W_k \quad (69)$$

短路匝对误差的补偿作用为:

$$\Delta \varepsilon = - (I_k W_k / I_1 W_1) \approx - (I_k W_k / I_2 W_2) = - (W_k^2 / W_2^2) * (E_2 / I_2 R_2) \quad (70)$$

将式 (69) 代入式 (70) 得到:

$$\Delta \varepsilon = - (W_k^2 / W_2^2) * (Z_{02} / R_k) \quad (71)$$

短路匝对比值差和相位差的补偿

$$\Delta f = \Delta \varepsilon \cos \alpha * 100 = - (W_k^2 / W_2^2) * (Z_{02} / R_k) \cos \alpha * 100 (\%) \quad (72)$$

$$\Delta \delta = \Delta \varepsilon \sin \alpha * 3438 = - (W_k^2 / W_2^2) * (Z_{02} / R_k) \sin \alpha * 3438 (') \quad (73)$$

由式 (72) 和 (73) 可见。短路匝补偿对比值差和相位差的补偿均为负值，且其补偿数值与短路匝的匝数平方和二次负荷总阻抗成正比，而与二次绕组的匝数平方以及短路匝的内阻成反比。

短路匝补偿现在生产上主要用来补偿当二次负荷功率因数为 0.8 时互感器的相位差。但是，当二次负荷功率因数为 1 时，原来互感器的相位差增大，而短路匝对相位差的补偿却减小，甚至不起补偿作用。而且短路匝补偿同时使互感器的比值差增大，特别是当二次负荷增大时，原来互感器的比值差就大，而短路匝补偿使互感器的比值差更增大。所以短路匝补偿有很大的副作用，补偿效果不好，应该尽量少用，最好不用。

六、磁分路短路匝补偿

电流互感器的相位差，容易在 5%~10%I_n 时超出允许范围，采用短路匝补偿又带来了副作用，使互感器的性能变坏。采用磁分路补偿，在对互感器的比值差进行补偿的同时，也对互感器的相位差起补偿作用，但是对相位差的补偿数值不大。如上所述，为了增大 5%~10%I_n 时对相位差的补偿，必须增大磁分路的损耗角 ψ_b ，例如采用损耗角大的冷轧硅钢片或铁片做磁分路。还可以采用人为的办法增大磁分路的损耗角，这只要在磁分路上绕制短路匝即可，如图 17 所示。这种补偿方法就叫做磁分路短路匝补偿。图中 A 为示意图，B 为原理线路图。

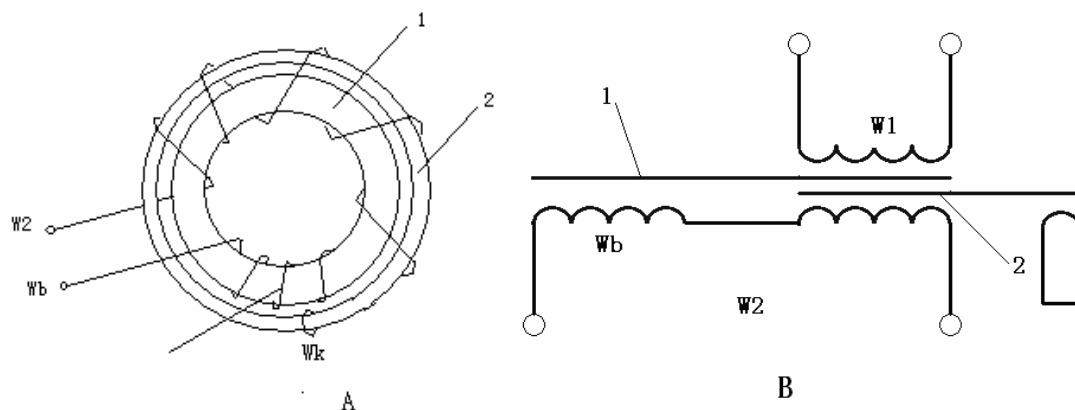


图 17 磁分路短路匝补偿

由此可见，磁分路短路匝补偿与磁分路补偿具有完全相同的特性，即同样要求在 7%~10%I_n 时，有短路匝的磁分路的磁导率 μ_{b2} 和损耗角 ψ_{b2} 最大，对比值差和相位角的补偿也最大。只是有短路匝的磁分路比一般磁分路有更大的损耗角，即 $\psi_{b2} > \psi_b$ ；更小的磁导率，即 $\mu_{b2} < \mu_b$ 。这是因为磁分路上加上短路匝后，除了使损耗角增大外，同时还使磁导率下降。为了使加短路匝后磁分路对比值差的补偿数值不变，就必须增大补偿匝数 W_b 和磁分路的截面 S_b ，这样，磁分路短

路匝补偿数值就可以得到与磁分路补偿相同的对比值差补偿的数值，而磁分路短路匝补偿对相位差的补偿数值却比磁分路补偿大的多。

磁分路短路匝补偿的计算是很复杂的。如果采用试验的方法，预先测出加短路匝后磁分路铁心的磁化曲线，即 $B_{b2}-H_{b2}$ 和 $\psi_{b2}-H_{b2}$ 曲线，那么磁分路短路匝补偿的计算方法与磁分路补偿的计算公式（60）至（62）相同，只要将式中的 H_b 、 B_b 、 ψ_b ，相应用 H_{b2} 、 B_{b2} 、 ψ_{b2} 代替，并用上述试验得到的磁分路短路匝的磁化曲线 $B_{b2}-H_{b2}$ 和 $\psi_{b2}-H_{b2}$ 代替原磁分路铁心的磁化曲线即可。一般磁分路短路匝的补偿参数：补偿匝数 W_b 、磁分路截面 S_b 、短路匝的匝数 W_k 以及短路匝的内阻 R_k ，都是经过试验来选择的。

这种磁分路短路匝补偿已用在 LMZ-0.5 型 150/5 电流互感器上。主铁心材料为 Z11，尺寸 $\Phi 45/\Phi 68 \times 25$ 。二次绕组用两根 $\Phi 1.25$ 铝或 $\Phi 1.04$ 铜导线绕制，一根 30 匝，一根 29 匝，即半匝补偿。圆环磁分路材料与主铁心相同，其内径为 $\Phi 72$ ，厚度为 3 片，即磁分路截面 $S_b=3 \times 2.5 \times 0.035=0.264\text{cm}^2$ 。补偿匝数 $W_b=13$ 匝。短路匝用厚 0.5mm，宽 2.5mm，长 60mm 的铜片，绕磁分路一圈，用锡焊将头尾焊在一起，即相当于 1 匝短路匝。这样，由试验测得 150/5 互感器在补偿前后的比值差和相位差，如表 13 所示。

表 13 磁分路短路匝补偿电流互感器的误差

二次负荷		$Z_n=0.2\Omega$					$Z_x=0.15\Omega$				
%In		10	20	50	100	120	10	20	50	100	120
补偿前	比值差(%)	-3.4	-2.75	-2.2	-1.9	-1.8	-3.0	-2.5	-2.05	-1.6	-1.5
		+63	+32	+14.5	+6	+5	+65	+38	+21	+9	+6
补偿后	相位差(')	-0.22	-0.09	0	+0.07	+0.09	+0.36	+0.38	+0.36	+0.36	+0.36
		+16	+14	+11	+1.5	+1	+14	+13	+12	+6	+6

由表 13 可见，圆环磁分路短路匝补偿不仅对比值差起补偿作用，而且对相位差的补偿也很大。原来还不能满足 1 级的电流互感器，经过半匝补偿和圆环磁分路短路匝补偿后，达到了 0.5 级，补偿效果是很好的。

七、圆环磁分路电势补偿

在圆环磁分路补偿中，为了增大 $5\% \sim 10\%I_n$ 时对相位差的补偿，除了采用圆环磁分路短路匝补偿外，还可以采用圆环磁分路电势补偿。

所谓圆环磁分路电势补偿，就是在圆环磁分路的基础上，再加上电势补偿，

而电势取自圆环磁分路上的附加绕组 W_{b2} 的感应电势 E_{b2} ，且 W_{b2} 与绕在整个铁心的补偿绕组 $W_k=1$ 匝正接，原理线路如图 18 所示。图中“·”表示绕组的极性端或首端，两个绕组正接即首尾相接，相当于两绕组的匝数相加，反接即极性端和极性端

相接或两个尾端相接，相当于两绕组匝数相减。r 为电阻，调节 r 值可改变电势补偿的数值。

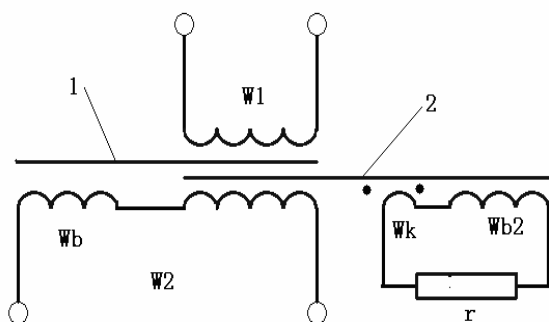


图18圆环磁分路电势补偿

电势补偿对误差的补偿值为

$$\Delta \varepsilon = W_k / W_2 * |E_k + E_{b2}| / [I_2 * (R_k + R_{b2} + r)] \approx 1 / W_2 * E_{b2} / [I_2 * (R_k + R_{b2} + r)] \quad (74)$$

式中 R_k 、 R_{b2} — W_k 和 W_{b2} 绕组的内阻。

$E_k \ll E_{b2}$ ，可略去不计。

$$\Delta f = -\Delta \varepsilon \sin \psi_b * 100\% \quad (75)$$

$$\Delta \delta = -\Delta \varepsilon \cos \psi_b * 3438 (') \quad (76)$$

式中 ψ_b —磁分路铁心损耗角。

磁分路电势补偿与短路匝电势（即短路匝）补偿不同之处在于，前者电势取自磁分路铁心绕组，后者电势取自主铁心绕组。因此磁分路电势补偿只与磁分路铁心有关而与主铁心无关，在 $7\% \sim 10\% I_n$ 下， E_{b2} / I_2 值最大，对相位差补偿值最大，随着电流增大， E_{b2} / I_2 值逐渐减小，对相位差补偿值也逐步减小。

磁分路补偿对比值差补偿为正值，电势补偿对比值差补偿为负值，为了抵消电势补偿对比值差的负值补偿，在磁分路电势补偿中，应加强磁分路补偿，为此可增加磁分路的片数，并适当增加补偿匝数 W_b 。

当圆环磁分路还加有分数匝补偿时，电势补偿也可以加在分数匝补偿中，原理线路如图 19 所示。

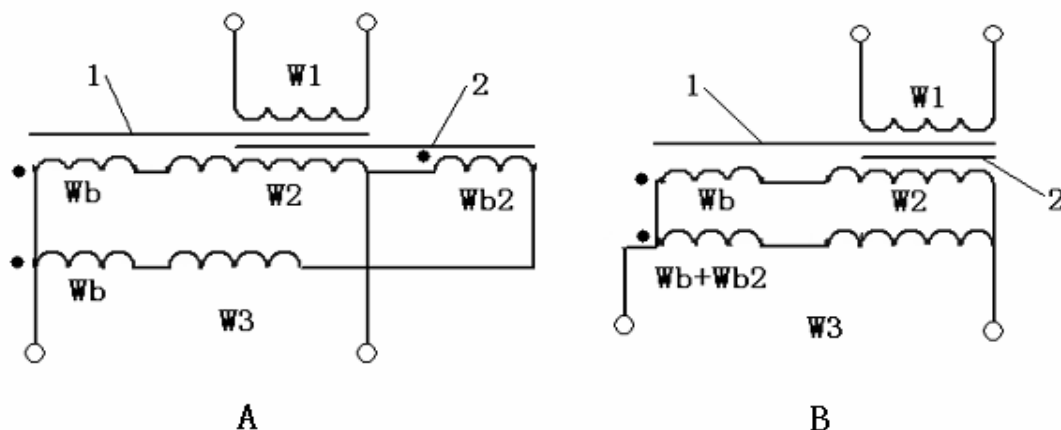


图 19 圆环磁分路分数匝电势补偿

图中 W_2 为二次绕组， $W_3 = W_2 - 1$ 为分数匝补偿绕组， W_3 与 W_2 反接， W_{b2} 与 W_3 反接即与 W_2 正接（图 19A），既然 W_{b2} 与 W_3 反接，就可以将 W_3 中原绕在整个铁心上 W_{b2} 匝改绕在主铁心上，也就相当于在磁分路上反绕了 W_{b2} 匝，于是图 19A 就可以按图 19B 绕制，即 W_2 中有 W_b 匝只绕在主铁心上，而 W_3 中有 $W_b + W_{b2}$ 匝只绕在主铁心上。

这时电势补偿的补偿值为：

$$\Delta \varepsilon = (1 / W_2) * [E_{b2} / I_2 (R_2 + R_3 + R_{b2})] \quad (77)$$

式中 E_{b2} 仍是 W_{b2} 在磁分路上的感应电势。

$$\Delta f = -\Delta \varepsilon \sin \psi_b * 100 (\%) \quad (78)$$

$$\Delta \delta = -\varepsilon \cos \psi_b * 3438 (') \quad (79)$$

实际上图 18 和 19 电势补偿是相同的，因为分数匝回路中电阻 R_3 较大，电势补偿就可以利用电阻 R_3 而不必另串电阻 r 。图 19 比图 18 结构紧凑，但图 18 调试比较方便。

八、电容补偿

一般电流互感器都是一个感抗元件，因此采用电容补偿，用容抗抵消感抗，

可以减小铁心励磁电流中的无功分量，从而取得良好的误差补偿效果。

1、并联电容补偿

在电流互感器的二次绕组并联电容元件 C，原理线路如图 20 所示。

补偿电流 ΔI 即通过电容器 C 的电流为：

$$\Delta I = \omega C U_2 = \omega C I_2 Z \quad (80)$$

式中 ω ——角频率， $\omega = 2\pi f = 100\pi$ （工频 $f = 50\text{Hz}$ ）；

Z——二次负荷阻抗。

并联电容对误差的补偿为

$$\Delta \varepsilon = \Delta I / I_2 = 100\pi C Z \quad (81)$$

$$\Delta f = \Delta \varepsilon \cos(90^\circ - \varphi) = \Delta \varepsilon \sin \varphi$$

$$= 100\pi C X * 100\% \quad (82)$$

$$\Delta \delta = -\Delta \varepsilon \sin(90^\circ - \varphi) * 3438 = -\Delta \varepsilon \cos \varphi * 3438$$

$$= -100\pi C R * 3438 (') \quad (83)$$

式中 $Z = R + jX$

并联电容对比值差的补偿为正值，对相位差的补偿为负值，且补偿数值与并联电容值和二次负荷阻抗值成正比。当二次负荷阻抗增大，电流互感器的比值差和相位差增大时，并联电容对比值差和相位差的补偿也随着增大，因此并联电容补偿可减弱二次负荷阻抗对电流互感器误差的影响，是效果良好的补偿方法，在精密电流互感器中普遍采用。

2、附加绕组并联电容补偿

在附加绕组 W_3 上并联电容，原理线路如图 21 所示。

$$\Delta I = \omega C E_3 = \omega C E_3 W_3 / W_2 = \omega C I_2 Z_{02} W_3 / W_2 \quad (84)$$

附加绕组并联电容对误差的补偿为

$$\Delta \varepsilon = \Delta I W_3 / I_2 W_2 = (W_3 / W_2)^2 * 100\pi C Z_{02} \quad (85)$$

$$\Delta f = \Delta \varepsilon \sin \alpha = (W_3 / W_2)^2 * 100\pi C X_{02} * 100\% \quad (86)$$

$$\Delta \delta = -\Delta \varepsilon \cos \alpha * 3438 = -(W_3 / W_2)^2 * 100\pi C R_{02} * 3438 (') \quad (87)$$

式中 α —— Z_{02} 的阻抗角； $Z_{02} = R_{02} + jX_{02}$

附加绕组并联电容补偿的补偿值除与并联电容量和二次负荷总阻抗值成正比外，还与附加绕组对二次绕组匝数之比的平方成正比。因此，增加附加绕组的匝数，可以增大附加绕组并联电容补偿的补偿值。

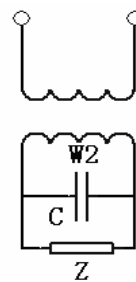


图20 并联电容补偿

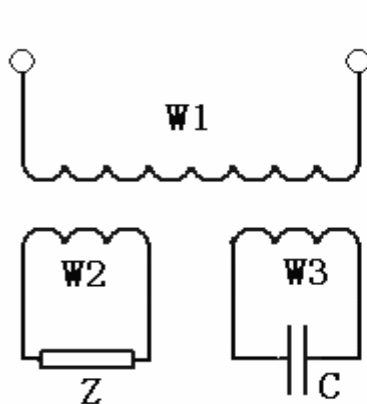


图 21 附加绕组并联电容补偿

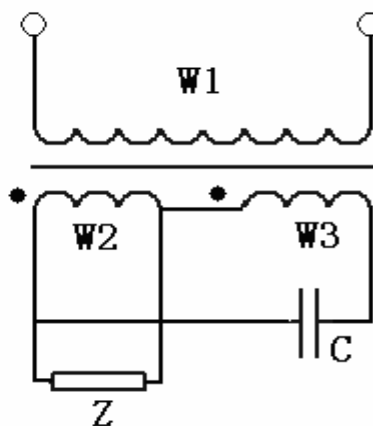


图 22 两绕组正接并联电容补偿

3、 二次绕组正接附加绕组并联电容补偿

为了增大电容补偿的补偿值，可将二次绕组正接附加绕组后再并联电容补偿，原理线路如图 22 所示。

$$\begin{aligned} \Delta I &= \omega C | U_2 + E_3 | = \omega C I_2 [Z + (W_3/W_2) * Z_{02}] \\ &= \omega C I_2 \{ [(W_2 + W_3) / W_2] * Z + (W_3 + W_2) / Z_2 \} \end{aligned} \quad (88)$$

对误差的补偿值为

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon &= \Delta I (W_2 + W_3) / I_2 W_2 \\ &= 100 \pi C \{ [(W_2 + W_3) / W_2]^2 Z + [W_3(W_2 + W_3) / W_2^2] Z_2 \} \end{aligned} \quad (89)$$

$$\Delta f = 100 \pi C \{ [(W_2 + W_3) / W_2]^2 X + [W_3(W_2 + W_3) / W_2^2] X_2 \} * 100\% \quad (90)$$

$$\Delta \delta = 100 \pi C \{ [(W_2 + W_3) / W_2]^2 R + [W_3(W_2 + W_3) / W_2^2] R_2 \} * 3438 (') 100\% \quad (91)$$

式中 $Z_2 = R_2 + jX_2$

二次绕组正接附加绕组并联电容补偿相当于二次绕组并联电容补偿和附加绕组并联电容补偿之和且乘以二次绕组和附加绕组匝数和与二次绕组匝数之比。因此，这种补偿方法可增大电容补偿的补偿值。

[例 36] 额定二次电流为 5A，额定负荷为 20VA，功率因数为 0.8 的电流互感器，采用并联电容补偿，当电容 $C = 1\mu\text{f}$ （微法），求在额定负荷和下限负荷下的电容补偿值。

额定负荷 $Z_n = S_n / I_n^2 = 20 / 5^2 = 0.8\Omega$

下限负荷 $Z_x = 25\% Z_n = 0.2\Omega$

由式（82）和（83）可求得：

额定负荷下补偿值

$$\begin{aligned} \Delta f_n &= 100 \pi C X_n = 100 \pi C Z_n \sin \varphi * 100\% \\ &= 100 \pi * 1 * 10^{-6} * 0.8 * 0.6 * 100\% \\ &= 0.015\% \\ \Delta \delta_n &= -100 \pi C R_n * 3438 = -100 \pi C Z_n \cos \varphi * 3438 \\ &= -100 \pi * 1 * 10^{-6} * 0.8 * 0.8 * 3438 \\ &= -0.69 (') \end{aligned}$$

式中 $C = 1\mu\text{F} = 1 * 10^{-6} \text{F}$

下限负荷下补偿值

$$\begin{aligned} \Delta f_x &= 25\% \Delta f_n = 0.25 * 0.015 = 0.0038 (\%) \\ \Delta \delta_x &= 25\% \Delta \delta_n = 0.25 * (-0.69) = -0.17 (') \end{aligned}$$

[例 37] 在例 36 中，如附加绕组匝数为二次绕组匝数的 2 倍，即 $W_3 = 2W_2$ ，且二次绕组的内阻抗 $Z_2 = R_2 = 0.2\Omega$ ，求附加绕组并联电容补偿在额定负荷和下限负荷下的补偿值。

$$\begin{aligned} Z_{on} &= Z_n + Z_2 = 0.8 * 0.8 + j0.8 * 0.6 + 0.2 \\ &= 0.84 + j0.48 (\Omega) \\ Z_{ox} &= Z_x + Z_2 = 0.2 * 0.8 + j0.2 * 0.6 + 0.2 \\ &= 0.36 + j0.12 (\Omega) \end{aligned}$$

由式（86）和（87）求得：

额定负荷下补偿值

$$\begin{aligned} \Delta f_n &= (W_3 / W_2)^2 * 100 \pi C R_{on} * 100\% \\ &= 2^2 * 100 \pi * 1 * 10^{-6} * 0.48 * 100\% \\ &= 0.06\% \\ \Delta \delta_n &= - (W_3 / W_2)^2 * 100 \pi C R_{on} * 3438 \end{aligned}$$

$$= -2^2 * 100\pi * 1 * 10^{-6} * 0.84 * 3438$$

$$= -3.63(\prime)$$

下限负荷下补偿值

$$\Delta f_x = (W_3/W_2)^2 * 100\pi C R_{ox} * 100\%$$

$$= 2^2 * 100\pi * 1 * 10^{-6} * 0.12 * 100\%$$

$$= 0.015\%$$

$$\Delta \delta_x = - (W_3/W_2)^2 * 100\pi C R_{ox} * 3438$$

$$= -2^2 * 100\pi * 1 * 10^{-6} * 0.36 * 3438$$

$$= -1.56(\prime)$$

[例 38] 在例 37 中如改用二次绕组正接附加绕组并联电容补偿, 求额定负荷和下限负荷下的补偿值。

由式 (90) 和 (91) 可以算得

额定负荷下补偿值

$$\Delta f_n = 100\pi C \{ [(W_2+W_3)/W_2]^2 X + [W_3(W_2+W_3)/W_2^2] X_2 \} * 100\%$$

$$= 100\pi * 10^{-6} * [3^2 * 0.8 * 0.6 + 6 * 0] * 100\%$$

$$= 0.14\%$$

$$\Delta \delta = -100\pi C \{ [(W_2+W_3)/W_2]^2 R + [W_3(W_2+W_3)/W_2^2] R_2 \} * 3438$$

$$= -100\pi * 10^{-6} * [3^2 * 0.8 * 0.8 + 6 * 0.2] * 3438$$

$$= -7.5(\prime)$$

下限负荷下补偿值

$$\Delta f_x = 100\pi * 10^{-6} * [3^2 * 0.2 * 0.6 + 6 * 0] * 100\%$$

$$= 0.034\%$$

$$\Delta \delta_x = -100\pi * 10^{-6} * [3^2 * 0.2 * 0.8 + 6 * 0.2] * 3438$$

$$= -2.85(\prime)$$

比较例 36 至 38 计算结果可见, $W_3=2W_2$, 三种并联电容补偿的补偿值按匝数的平方增大, 例 38 和例 37 分别比例 36 增大为原补偿值的 4 倍多和 9 倍多 (因为 $Z_{02} \gg Z$)。

九、圆环磁分路补偿电流互感器的计算举例

现以全国统一设计的 LMZ-0.5 型 200/5A 电流互感器为例。说明圆环磁分路补偿电流互感器的计算过程。

铁心尺寸 $\phi 45/\phi 68 * 25$, 铁心材料 Z11 (相当于 D340), 容量 5VA, $\cos\psi=0.8$ 。二次绕组用两根 $\phi 1.25$ 铝线或 $\phi 1.04$ 铜线绕制, 一根 40 匝, 一根 39 匝, 即半匝补偿。二次绕组内阻 $R_2 \approx 0.05\Omega$, 内感抗 $X_2 \approx 0$ 。因此, 在额定负荷 Z_n 和下限负荷 Z_x 时, 二次负荷总阻抗为:

$$Z_{on} = Z_n + R_2 = 0.16 + j0.12 + 0.05 = 0.21 + j0.12 \approx 0.24 \angle 30^\circ \Omega$$

即 Z_{on} 的阻抗角 $\alpha_{on} = 30^\circ$

$$Z_{ox} = Z_x + R_2 = 0.12 + j0.09 + 0.05 = 0.17 + j0.09 \approx 0.19 \angle 28^\circ \Omega$$

即 Z_{ox} 的阻抗角 $\alpha_{ox} = 28^\circ$

先算出没有补偿时电流互感器的误差, 计算结果列于下表 14。

其次算出半匝补偿的数值

$$\Delta f_R = 0.5 * (1/W_2) * 100 = 0.5 * (1/40) * 100 = 1.25 (\%)$$

最后计算圆环磁分路对误差的补偿, 以及经过半匝补偿和磁分路补偿后互感器的比值差和相位差。

圆环磁分路的直径为 $\phi 72$ ，片数为 1 片，即截面 $S_b=2.5*0.035=0.88\text{cm}^2$ ，材料与主铁心相同。

由例 33 已知 D340 铁心的 $H_m=0.2\text{A/cm}$ ，可算出补偿匝数。

$$W_b=H_m L_b/10\%I_{2n}=0.2*7.2\pi/0.5=9$$

故选取 $W_b=9$ 匝

再按式 (60) 至 (63) 算出圆环磁分路对比之差和相位差的补偿。最后求得补偿后 200/5 互感器的比值差和相位差。计算结果列于表 15。

表 14 没有补偿电流互感器误差计算结果

二次负荷	$Z_n=0.2\Omega$		$Z_x=0.15\Omega$	
	10	120	10	120
I/I_n (%)	10	120	10	120
E_2 (V)	0.12	1.44	0.095	1.04
B (Gs)	530	6300	380	4600
H (A/cm)	0.023	0.13	0.018	0.105
Ψ (°)	29	54	27	51
$I_0 W_1$ (A)	0.41	2.3	0.32	1.86
$\alpha+\Psi$ (°)	59	84	55	79
ε (%)	2.05	0.96	1.6	0.78
f (%)	-1.76	-0.95	-1.31	-0.77
δ (')	+36.5	+3.5	+31	+5.1

表 15 圆环磁分路补偿电流互感器误差计算结果

二次负荷	$Z_n=0.2\Omega$		$Z_x=0.15\Omega$	
	10	120	10	120
I/I_n (%)	10	120	10	120
H_b (A/cm)	0.2	2.4	0.2	2.4
B_b (T)	1.02	1.85	1.02	1.85
Ψ_b (°)	60.5	20	60.5	20
$-\Psi_b+\Psi$ (°)	-31.5	+36.5	-33.5	+32
μ_b/μ	2.22	0.16	2.5	0.175
G_b/G	0.0535	0.0038	0.06	0.0043
$\Delta\varepsilon$ (%)	0.94	0.065	1.05	0.076
Δf_b (%)	+0.58	+0.036	+0.62	+0.045
$\Delta\delta_b$ (')	-8.4	+0.65	-10.8	+0.7
Δf_R (%)	+1.25	+1.25	+1.25	+1.25
$\Delta\delta_R$ (')	0	0	0	0
f' (%)	+0.07	+0.34	+0.56	+0.52
δ' (')	+28.1	+4.1	+20.2	+5.8

现以额定负荷 10% I_n 点为例，说明圆环磁分路补偿的计算过程。

$$H_b=I_2 W_b/L_b=10\%*5*9/7.2\pi=0.2\text{A/cm}$$

由 D340B-H 曲线和 Ψ -H 曲线查得，当 $H_b=0.2\text{A/cm}$ 时， $B_b=1.02\text{T}$ ， $\Psi_b=60.5^\circ$ 。

$$-\Psi_b+\Psi=-60.5^\circ+29=-31.5^\circ$$

$$\begin{aligned} \mu_b/\mu &= (B_b/B) * (H/H_b) = (10200/530) * (0.023/0.2) \\ &= 2.22 G_b/G = (\mu_b/\mu) * (S_b L/SL_b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &=2.22 * (0.088 * 5.65\pi / 2.5 * 1.15 * 7.2\pi) \\
 &=0.0535 \\
 \Delta \varepsilon &= [W_b (W_2 - W_b) / W_2^2] * (G_b / G) = (9 * 31 / 40^2) * 0.0535 = 0.94\% \\
 \Delta f_b &= K_f \Delta \varepsilon \cos (-\Psi_b + \Psi) * 100 \\
 &= 0.7 * 0.94\% \cos (-31.5^\circ) * 100 \\
 &= 0.58 (\%) \\
 \Delta \delta_b &= K_\delta \Delta \varepsilon \sin (-\Psi_b + \Psi) * 3438 \\
 &= 0.5 * 0.94\% \sin (-31.5^\circ) * 3438 \\
 &= -8.4 (')
 \end{aligned}$$

式中取 $K_f=0.7$, $K_\delta=0.5$, 因小铁芯补偿稍强。

$$f' = f + \Delta f_b + \Delta f_R = -1.76 + 0.58 + 1.25 = +0.07 (\%)$$

$$\delta' = \delta + \Delta \delta_b + \Delta \delta_R = 36.5 - 8.4 - 0 = 28.1 (')$$

由于计算中所用的 D340 的 B-H 曲线的磁性能比一般 D340 和 Z11 铁心都好, 所以计算结果偏正值。而且互感器铁心绕组经树脂浇注后, 因树脂收缩铁心受力, 铁心磁性能还要下降, 因此在设计计算时应适当偏向正值。由此可见, 原来只能满足 1 级的互感器, 经过半匝补偿和圆环磁分路补偿后达到了 0.5 级, 而且性能良好。

由实验测得 LMZ-0.5 型 200/5 电流互感器在补偿前后和浇注前后 (补偿后即浇注前) 的误差列于表 16。被使得互感器系从某厂大量生产的产品中抽出的, 其铁心材料为 Z11, 并选择性能稍差一些的做 200/5, 稍好一些的做 150/5 互感器。因此, 表 16 试验数据均比表 15 计算数据比值差偏负相位差偏正, 但随着电流的增大, 比值差和相位差变化的趋势, 计算和试验结果是一致的。由表 16 可见, 在补偿前, 比值差随电流的变化减弱了很多, 同时对相位差也起一些补偿作用。这与上述圆环磁分路的补偿原理的分析完全一致。

表 16 圆环磁分路补偿电流互感器的误差

二次负荷		$Z_n=0.2\Omega$					$Z_x=0.15\Omega$				
I/I _n (%)		10	20	50	100	120	10	20	50	100	120
补偿前	f (%)	-1.93	-1.58	-1.38	-1.23	-1.13	-1.70	-1.43	-1.2	-1.07	-0.95
	δ (')	+45	+30	+15	+6	+6	+46	+31	+19	+11	+10
浇注前	f (%)	-0.12	-0.05	0	+0.11	+0.11	+0.38	+0.34	+0.30	+0.28	+0.28
	δ (')	+33	+22	+13	+5	+5	+30	+23	+18	+8	+8
浇注后	f (%)	-0.25	—	—	1	+0.05	+0.18	—	—	—	+0.25
	δ (')	+35	—	—	1	+4	+33	—	—	—	8

十、分数匝电容补偿电流互感器的计算举例

现以 5/1A0.1 级电流互感器为例, 说明分数匝电容补偿电流互感器的计算过程。

铁心尺寸 $\phi 70/\phi 100 * 30$, 铁心材料 Z11 (相当于 D340), 二次负荷 5VA, $\cos\psi=1 \sim 0.8$ 。二次绕组用 $\phi 0.8$ 导线绕制, 一次绕组用 $\phi 1.56$ 导线绕制。互感器采用 500 安匝。

二次绕组匝数为 $500/I_{2n}=500/1=500$ 匝。

先算出二次绕组的内阻抗 R_2 和 X_2

$$R_2 = \rho (L/A) = 0.02 * (55/0.5) = 2.2 \Omega$$

其中 $L = 2 * [(30+5) + (15+5)] * 500$
 $= 55000 \text{mm} = 55 \text{m}$

$$A = (\pi/4) * 0.8^2 = 0.5 \text{mm}^2$$

$$X_2 \approx 0$$

再算出额定负荷 5VA 和下限负荷 2.5VA 下的二次负荷总阻抗 Z_{on} 和 Z_{ox} 及阻抗角 α_{on} 和 α_{ox} :

当二次负荷 $\cos\psi=1$ 时

$$Z_{on} = Z_2 + Z_n = R_2 + R_n = 2.2 + 5 = 7.2 \Omega$$

$$\alpha_{on} = 0^\circ$$

$$Z_{ox} = Z_2 + Z_x = R_2 + R_x = 2.2 + 2.5 = 4.7 \Omega$$

$$\alpha_{ox} = 0^\circ$$

当二次负荷 $\cos\psi=0.8$ 时

$$Z_{on} = Z_2 + Z_n = 2.2 + 4 + j3 = 6.9 \Omega$$

$$\alpha_{on} = \cos^{-1} (R_{on}/Z_{on}) = \cos^{-1} (6.2/6.9) = 26^\circ$$

$$Z_{ox} = Z_2 + Z_x = R_2 + R_x = 2.2 + 2 + j1.5 = 4.5 \Omega$$

$$\alpha_{ox} = \cos^{-1} (R_{ox}/Z_{ox}) = \cos^{-1} (4.2/4.5) = 21^\circ$$

以 $Z_{on}=7.2\Omega$ 和 $Z_{ox}=4.7\Omega$ 计算没有补偿时电流互感器的误差, 计算 5%、10% 和 120% 额定电流三点。计算结果列于表 17。

表 17 没有补偿电流互感器误差计算结果

Z_{02} (Ω)	I_n %	E_2 (V)	B (Gs)	H (A/cm)	Ψ ($^\circ$)	ε (%)	$\cos\psi=1$		$\cos\psi=0.8$	
							f (%)	δ (')	F (%)	δ (')
7.2	5	0.36	80	0.005	20	0.53	-0.18	17	-0.38	13
	10	0.72	160	0.009	22	0.48	-0.17	15	-0.36	11
	120	8.6	1900	0.06	45	0.26	-0.18	6	-0.24	3
4.7	5	0.24	53	0.004	19	0.42	-0.14	14	-0.27	11
	10	0.47	100	0.006	21	0.32	-0.11	10	-0.21	8
	120	5.6	1200	0.04	39	0.18	-0.11	5	-0.16	3

以 $Z_{02}=Z_{on}=7.2\Omega$, 120% I_n 为例, 说明计算过程:

$$E_2 = I_2 Z_{02} = 120\% I_n * 7.2 = 8.6 \text{ (V)}$$

$$B = 45 E_2 / W_2 S k = (45 * 8.6) / (500 * 4.5 * 0.9) = 0.19 \text{T} = 1900 \text{Gs}$$

其中 $S = 30 * (100 - 70) / 2 = 450 \text{mm}^2 = 4.5 \text{cm}^2$

$$K = 0.9$$

由 D340 环形铁心的 B-H 和 Ψ -H 曲线查得, 当 $B=1900\text{Gs}$ 时, $H=0.06\text{A/cm}$, $\Psi=45^\circ$ 。

$$\varepsilon = (HL/I_2 W_2) * 100 = (0.06 * 26.7 / 120\% * 500) * 100 = 0.26 \text{ (%)}$$

其中 $L = \pi (100 + 70) / 2 = 267 \text{mm} = 26.7 \text{cm}$

当 $\cos\psi=1$ 时

$$f = -\varepsilon \sin\psi = -0.26 \sin 45^\circ = -0.18 \text{ (%)}$$

$$\delta = \varepsilon \cos\psi * 3438 = 0.26\% \cos 45^\circ * 3438 = 6.3 \text{ (')}$$

当二次负荷 $\cos\psi=0.8$ 时

$$f = -\epsilon \sin(\psi + \alpha) = -0.26 \sin(45^\circ + 26^\circ) = -0.24 (\%)$$

$$\delta = \epsilon \cos(\psi + \alpha) * 3438 = 0.26\% \cos(45^\circ + 26^\circ) * 3438 = 2.9 (')$$

采用分数匝和电容补偿，分数匝的补偿量约为+0.13%，电容补偿量在额定负荷 $\cos\psi=1$ 下约为-8'。为此，二次绕组改用 $\phi 0.69$ 和 $\phi 0.51$ 两根导线并联绕制，且 $\phi 0.69$ 这根导线少绕 1 匝，得到 0.65 匝补偿。二次绕组并联 $1.5\mu\text{F}$ 电容补偿，补偿原理线路如图 23 所示。分数匝和电容补偿的补偿量以及补偿后电流互感器的误差列于表 18。

表 18 分数匝电容补偿电流互感器误差

(Ω)	In %	分数匝补偿 Δf (%)	并联电容补偿				补偿后误差			
			$\cos\psi=1$		$\cos\psi=0.8$		$\cos\psi=1$		$\cos\psi=0.8$	
			Δf_c (%)	$\Delta \delta_c$ (')	Δf_c (%)	$\Delta \delta_c$ (')	f' (%)	δ' (')	f' (%)	δ' (')
5	5	+0.13	0	-8	+0.14	-6	-0.05	9	-0.11	7
	10						-0.04	7	-0.09	5
	120						-0.05	-2	+0.03	-3
2.5	5	+0.13	0	-4	+0.07	-3	-0.01	10	-0.07	8
	10						+0.02	6	-0.01	5
	120						+0.02	1	+0.04	0

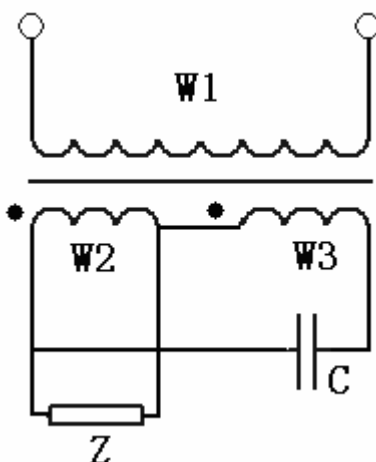


图 23 分数匝电容补偿电流互感器原理线路

分数匝补偿可按式 (58) 计算

$$\begin{aligned} \Delta f &= (1/W_2) * [D_b^2 / (D_b^2 + D_b'^2)] * 100 \\ &= (1/5000 * [0.69^2 / (0.69^2 + 0.51^2)]) * 100 \\ &= 0.13 (\%) \end{aligned}$$

并联电容补偿按式 (82) 和 (83) 计算

$$\begin{aligned} \Delta f_c &= 100\pi C X * 100 = 100\pi * 1.5 * 10^{-6} * 3 * 100 \\ &= 0.14 (\%) \end{aligned}$$

式中 $X=3\Omega$ (在额定负荷 $\cos\psi=0.8$ 时)

$$\begin{aligned} \Delta \delta_c &= -100\pi C R * 3438 = -100\pi * 1.5 * 10^{-6} * 4 * 3438 \\ &= -6.5 (') \end{aligned}$$

式中 $R=4\Omega$ (在额定负荷 $\cos\psi=0.8$ 时)

在额定负荷 $\cos\psi=1$ 以及下限负荷 $\cos\psi=1$ 和 0.8 时, 算得并联电容补偿量列于表 18。

补偿后电流互感器的误差

$$f' = f + \Delta f + \Delta f_c = -0.24 + 0.13 + 0.14 = +0.03 (\%)$$

$$\delta' = \delta + \Delta \delta_c = 3 - 6 = -3 (')$$

由表 18 全部计算结果可见, 这台采用分数匝并联电容补偿的电流互感器的误差满足 0.1 级要求, 且有 50% 以上的裕度。

电流互感器的误差实验

为了保证测量的准确度, 每台电流互感器在出厂前, 都必须进行误差实验, 以判定是否满足准确级的要求。电流互感器在进行误差实验之前, 一般还需要检查极性和退磁。

一、 极性检查

按照规定, 电流互感器的一次绕组标志为 L_1 、 L_2 ……, 二次绕组标志为 K_1 、 K_2 ……。当一次电流由 L_1 进入一次绕组时, 二次电流由 K_1 流出。这样的极性标志叫做减极性。 L_1 或 K_1 叫做极性端或同名端, 有的用绕组旁加一圆点表示极性端。

检查互感器绕组极性标志是否正确, 通常采用以下几种方法:

1、在互感器校验仪上检查极性

一般互感器校验仪上都带有极性指示器。这样, 在误差实验的同时, 就可以预先进行极性检查。

这时, 标准互感器和被试互感器与校验仪的连接, 必须按误差实验的规定进行接线, 线路图见图 28 或图 29。当通电时, 如极性指示器没有指示, 则说明被测试互感器绕组的极性标志正确。

有的互感器校验仪(例如 HE5 型和 HEG4 型)的指示器直接串联在测差回路, 测互感器误差的同时可以先看极性是否正确。有的互感器校验仪(例如 HE11 型和 HEG2 型)的极性指示器需要通过选择开关 K_p 接通, 因此在检查极性时, 应将 K_p 置于“极性”位置, 通电 10%—20% 额定电流, 检查极性正确后再将 K_p 置于“测量”, 进行误差测试。

检查极性也可以不用极性指示器, 在测误差时, 通电 1% 额定电流, 将检流计置于 2—3 档, 如这时检流计的指示很大, 或者调读数盘(置于最大限量)检流计无法平衡, 则说明极性不正确。

2、直流法检查极性

直流法检查绕组极性, 线路如图 24 所示。在电流互感器的一次绕组(或二次绕组)上, 通以直流电流, 并在二次绕组(或一次绕组)上接电压表, 观察电压表指针的偏转情况。

在图 24 中, 合上开关 K , 如电压表指针由零往正方向偏转时, 则绕组极性标志正确。在试验时应注意调节可变电阻 R , 使绕组中通入的直流电流尽可能小, 只要能明显看出电表偏转则可, 以免电压太高打坏电压表或损坏互感器绕组层间或匝间的绝缘。最简单的办法就用

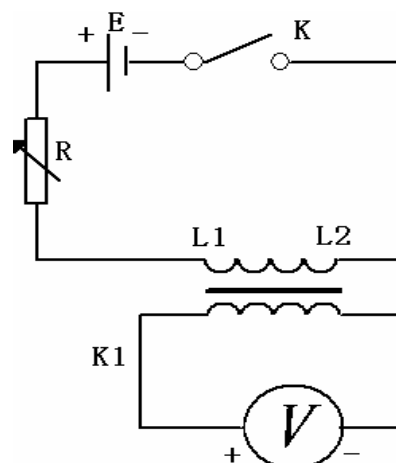


图24 直流法检查绕组极性

一个 1.5V1 号电池，不用电阻 R，按图接线，也不用开关 K，用导线瞬间接通并即断开线路，如果电压表指针先正偏后负偏，则极性正确。

3、串联法检查极性

将电流互感器的一次绕组和二次绕组串联，并在匝数多的一次绕组或二次绕组上通以 1--5V 的交流电压，用 10V 以下小电压表或万用表测量绕组输入电压和串联后两绕组的电压。线路如图 25 所示。图中如 L_1K_2 的电压大于 L_1L_2 的电压，则说明绕组极性标志正确。

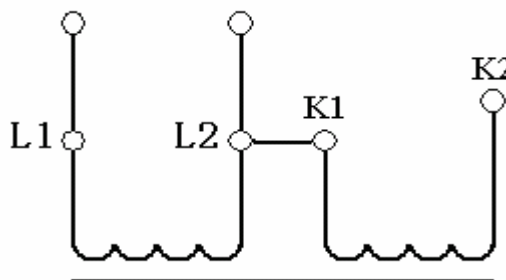


图 25 串联法检查绕组极性

在试验中应注意通入的电压应尽量小，只要电压表上能清楚地读数则可，以免电压太高，电流太大，把绕组烧坏，所以电压表的量程也应尽可能选小些，例如选用 200mV，2V 量程的电压表。当两绕组匝数相近或相差不超过 5 倍时，采用此法判别极性方便准确；当两绕组的匝数相差 10 倍以上时，一般电压表指示不易看清，应用数字式万用表，否则就不宜采用此方法判别极性。

二、退磁

电流互感器如果在大电流下切断电源，或者在运行时二次绕组偶然发生开路，以及通过直流电流进行试验以后，互感器的铁心中就可能产生剩磁，使铁芯的磁导率下降，影响互感器的性能；所以在电流互感器进行误差试验之前，一般应先对互感器进行退磁，以消除剩磁对误差的影响。通常介绍的退磁方法有以下两种：

(1) 开路（强磁场）退磁场

一次和二次绕组全部开路，并在一次或二次绕组中通以工频电流，由零增加到 20%或 50%额定电流，然后均匀且缓慢地降至零。重复这一过程 2-3 次，同时使每次所通入的电流按 50%、20%、10%额定电流递减。退磁完毕在切断电流之前，应将二次绕组短接。

(2) 闭路(大负荷)退磁法

在二次绕组上接以相当于额定负荷 10—20 倍的电阻，一次绕组通工频电流，使由零增加到 20%或 50%额定电流，然后均匀且缓慢地降至零。重复这一过程 2-3 次，同时使每次所通入的电流按 50%、20%、10%额定电流递减。

如果是多次级电流互感器，在退磁过程中，不退磁的二次绕组都应短接。

测量用电流互感器的准确等级由 1 级至 0.01 级，其型式和结构很不相同，所以上述两种退磁方法和所规定的退磁参数并不是对所有电流互感器都适合。一般来说，开路退磁，磁场很强，铁心很饱和；而闭路退磁，磁场较弱，铁心不很饱和。对于精密电流互感器，采用开路退磁铁心磁密很高，电压幅值很大，绕组开路电压很高，容易损坏绕组的绝缘和补偿元件；采用闭路退磁，磁密较低，可能达不到退磁的目的，但对互感器比较安全，所以过去精密电流互感器多采用闭路退磁。有的互感器校验装置还专门设置退磁线路，退磁时接入 10 欧电阻的大负荷。

例如对于 5—5000/5A0.1 级电流互感器，如接上述开路退磁路，通入 20%额定电流，相当于励磁安匝为 200—1200 安匝，铁心严重饱和，可能损坏互感器。如按上述闭路退磁，接入 20 倍额定负荷即 4 欧电阻的大负荷，在额定电流下，铁心磁密不超过 0.2T，达不到退磁目的。

实际上对电流互感器进行退磁，就是将铁心通以交流励磁，使铁芯的磁密和磁导率从低到高，越过最大磁导率，而达到饱和状态，然后逐渐降低磁场至零，使铁心磁密下降，以恢复铁心的磁导率。

设铁心达到最大磁导率时的磁场强度为 H_m ，磁密为 B_m ，可以选取铁心退磁的磁场强度 $H_t = (20.5—5) H_m$ ，这时退磁的磁密 $B_t = (1.5—2) B_m$ 。冷轧、热轧硅钢片和铁镍合金三种材料带绕铁心的 H_m 、 B_m 、 H_t 、 B_t 如表 19 所列。

表 19 各种材料带绕铁心退磁磁场强度和磁密

铁心材料	$H_m(A/cm)$	$B(T)$	$H_t(A/cm)$	$B_t(T)$
热轧硅钢片	≈ 0.4	≈ 0.8	1	≈ 0.3
冷轧硅钢片	≈ 0.2	≈ 1	0.5	≈ 1.6
铁镍合金	≈ 0.02	≈ 0.4	0.1	≈ 0.7

对于叠片铁心，磁导率一般约降低一半，所以退磁磁场强度应加倍选取。

有了退磁磁场强度 H_t ，铁心平均磁路长度 L_p 可以由电流互感器的外形尺寸进行估算，就能求得铁心的退磁安匝 $H_t L_p$ 。至于电流互感器的额定安匝，单匝式的可直接从电流比算出，多匝式的可查阅产品说明书，实在不知道的可根据经验估算。

据此，作者建议采用上述退磁安匝的开路退磁，如退磁电流从匝数少于 10 匝的一次绕组输入，则退磁电流可均匀上升和下降；如退磁电流由匝数多的一次或二次绕组输入，则刚升电压时，几乎见不到电流上升，当见到电流剧增时，铁心已饱和。

由退磁电流安匝 $I_t W_1$ 与额定安匝 $I_n W_1$ 之比，就可以求出从一次绕组输入退磁电流 I_t 为额定电流 I_n 的百分数：

$$I_t / I_n = I_t W_1 / I_n W_1 = (H_t L_p / I_n W_1) * 100\% \quad (92)$$

[例 39] 上述 0.1 级 5—5000/5 电流互感器的铁心材料为 D340 冷轧硅钢片，最低安匝数为 1000 安匝，估计铁心 12 平均磁路长度为 $20\pi cm$ ，求退磁电流为额定电流的百分数。

由表 19 可知，冷轧硅钢片 $H_t = 0.5 A/cm$ ，再由式 (92) 即可算出：

$$I_t / I_n = I_t W_1 / I_n W_1 = (0.5 * 20\pi) / 1000 = 3.2\%$$

上述 0.1 级 5~5000/5 电流互感器只要通以 4% 额定电流就可进行退磁。

在测量电流互感器误差时，先检查极性正确后，可按图 26 和 27 线路将测误差线路改接为开路退磁线路。改接时，只要将被试电流互感器 T_x 的二次端钮 K_2 切断，并将原接在校验仪 K 端钮或 BLH 的 K_2 端钮上的导线，改接在 T_x 端钮或 JLH 的 K_2 端钮。如原接 K 端钮的是屏蔽线，则应改用 5A 的联结导线。如果退磁电流太小，百分表指示不清楚，可改变标准电流互感器 T_0 的电流比。

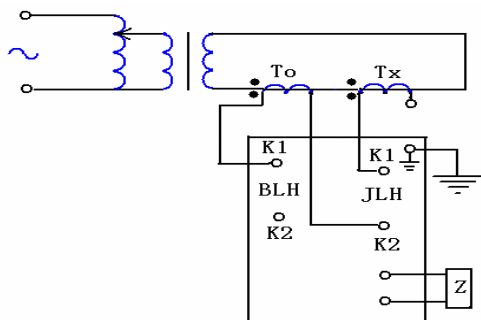


图 26 在 HE5 型上的退磁线路

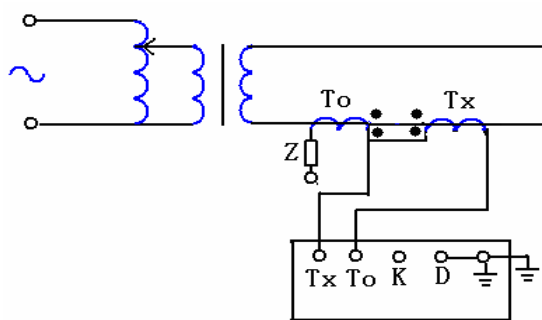


图 27 在 HEG 型上的退磁线路

三、 实验误差

测量电流互感器的误差，国内一般都采用比较法即用一台标准电流互感器与被试互感器进行比较，标准互感器的电流比应与被试互感器相同。如果标准互感器的准确级比被试互感器高二级，即标准互感器的实际误差小于被试互感器允许误差的五分之一，那么，标准互感器本身的误差可略去不计，两台互感器的二次电流之差即差流，就是被试互感器的误差，由互感器校验仪测出。这时互感器校验仪上的读数 f 和 δ ，就是被试互感器的比值差 f_x 和相位差 δ_x ，即：

$$F_x = f (\%) \quad (93)$$

$$\delta_x = \delta (') \quad (94)$$

如果标准互感器的误差不能忽略时，校验仪的读数还要加上标准互感器本身的误差 f_0 和 δ_0 才等于被试互感器的误差，即

$$F_x = f + f_0 (\%) \quad (95)$$

$$\delta_x = \delta + \delta_0 (') \quad (96)$$

因为互感器校验仪测的是两互感器二次电流的差流对二次电流的比值，所以对校验仪本身的测量准确度要求不高，只要仪器读数 f 和 δ 的误差不超过表 6 所列允许误差的 10%，就能满足要求。现在国产的互感器校验仪，主要有 HE5 型、HE11 型、HEG2 型和 HEG4 型等，前二者为电位差式校验仪，可以检定 10 级(或 5 级)至 0.05 级互感器，后二者为比较仪式校验仪，可以检定 10 级至 0.01 级互感器。

利用 HE5 型互感器校验仪测量电流互感器误差的线路如图 28 所示。

图中 T_1 为调压器， T_2 为升流器， T_0 为标准电流互感器， T_x 为被试电流互感器， Z 为电流负荷箱。 T_0 和 T_x 的电流比相同。

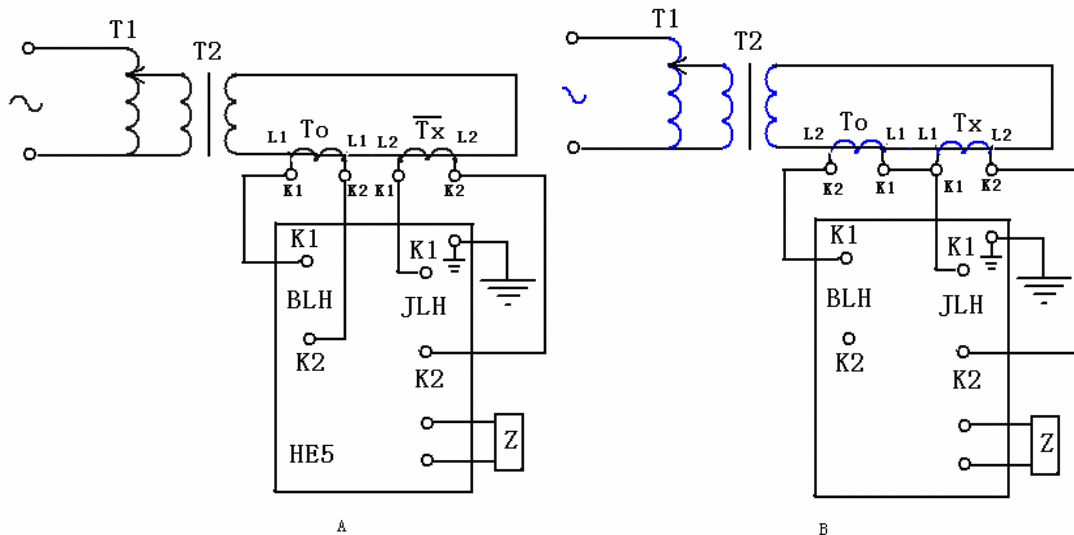


图 28 HE5 型校验仪测量电流互感器误差线路

图 28A 是 HE5 型校验仪使用说明书规定的测误差线路，其特点是二次有四根导线接在校验仪上，且标准 T_0 和被试 T_x 的二次 K_1K_2 分别接校验仪标准 BLH 和被试 JLH 的二次 K_1K_2 ；无论一次和二次都是 T_0 的非极性端接 T_x 的极性端，不符合精密电流互感器极性端处于地电位的规定。

图 28B 是一般校验仪测精密电流互感器误差线路，其特点是二次接到校验仪上的只有三根导线，且无论一次和二次都是极性端对接，能同时处于地电位，

见图 29HEG2 型校验仪线路。实际上在 HE5 型校验仪中，标准回路 BLH 的 K_2 端钮和被试回路 JLH 的 K_1 端钮在仪器内部联接在一起，故可采用三根接线法。这样，由互感器 K_1 接到校验仪 K 上的联接导线，叫做中线，通过的电流误差为误差电流，导线电阻压降很小，其内阻可略去不计。由标准电流互感器二次接至校验仪只有一根联接导线，有被试互感器二次接至校验仪也只是一根导线。如果图 A 和 B 所用联接导线长度相同，内阻相同，那么图 B 联接导线的截面可以只要图 A 连接导线截面的一半，连接导线减细就容易制作，且使用方便。至于二次极性端对接这根导线的电阻 R，当中线接 T_x 的极性端，R 为 T_0 的负荷（如图 B）；如中线接 T_0 的极性端，则 R 为 T_x 的负荷。

试验时转动调压器升电流，如果百分表在 5A 量限的指示为 10%—20%时，极性指示器动作，则应立即将调压器退回到零，并切断电源，检查接线是否正确，如接线错误，则应按图 28 更改接线；如接线正确，则说明被试互感器的极性标志错误或者被试互感器二次开路。如果在百分表指示为 100%—120%时，极性指示器动作，则说明标准和被试互感器的电流比不同，则应检查标准或被试互感器的电流比。

在 HE5 型校验仪上检查极性时，量限开关应在大于 1%量限处，不要在小量限特别是 0.1%量限下进行。因为小量限时差流电阻阻值大，对于 0.1%量限，差流电阻为 10 欧。这样，当小电流比（例如 $K_n < 10/5$ ）时，如极性错误，电流不易升上去，百分表看不到指示，极性指示器更不可能动作；当大电流比（例如 $K_n > 500/5$ ）时，如极性错误，升上电流，容易烧坏差流电阻。

当互感器的极性正确时，就可以进行误差测量。按照规定分别在额定负荷和下限负荷下，依次测量 5%、10%、20%、100%和 120%额定电流时的误差。测量时，先调节调压器使百分表指示为所需的电流值，然后转动比值差和相位差两个盘，使检流计之零，检流计的灵敏度开关应在调节过程中，依次从小到大，当检流计的灵敏度已达到或接近最大值时，光线缩小至接近位移直线，且无法再缩小时，说明已调节平衡，则可读比值差盘和相位差盘的读数。

如果在调节过程中，比值差或相位差一个盘已旋转到最大值，检流计还不能平衡，则说明量限太小，应将检流计灵敏度开关退回到零位后才允许转换量限开关，增大量限，例如由 1%转换为 3%。接着再继续调节平衡。如果在调节平衡以后，发现比值差盘和相位差盘读数都小于满刻度的四分之一，则说明量限太大，应按上述相同步骤更换至小限量，例如由 1%转换为 0.3%。

在测量中应注意标准互感器二次实际所接的负荷，应为检定证书所标明的负荷；被试互感器二次实际所接负荷，应为所需的额定负荷或下限负荷。标准互感器二次实际所接的负荷，包括互感器二次到校验仪的两根或一根连接导线的电阻和校验仪在标准电流互感器回路的内阻抗以及导线接触电阻之和。被试互感器二次实际所接的负荷，包括互感器二次到校验仪的两根或一根连接导线的电阻、校验仪到电流负荷箱的两根连接导线的电阻、电流负荷箱的实际阻抗和校验仪在被试电流互感器回路的内阻抗以及导线接触电阻之和。国产 FY49 型电流负荷箱，在标称值（即转换开关上所标明的负荷值）中除了 0.06 欧连接导线电阻。对于 HE5 型校验仪被试电流互感器回路的内阻约为 0.01 欧，所以图 28 中被试互感器回路的四根或三根导线的内阻应为 0.05 欧。

利用 HEG2 型（或者 HEG4 型和 HE11 型，下同）测量电流互感器误差的线路如图 29 所示。

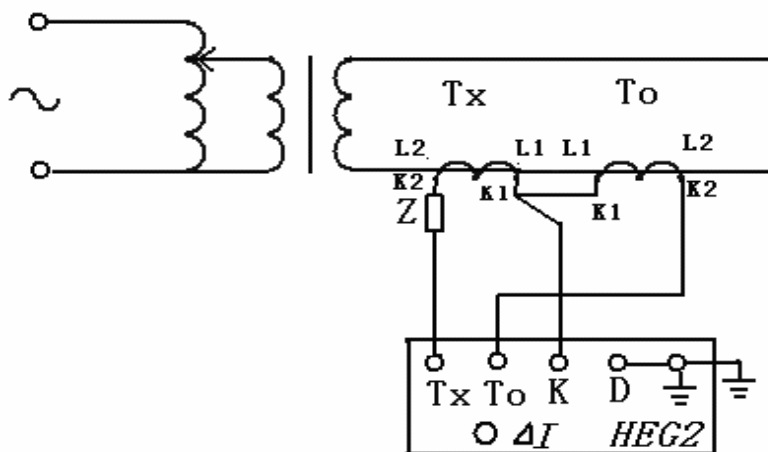


图 29 HEG2 型校验仪测量电流互感器误差线路

图中负号意义与图 28 相同，采用三根接线法。即接线与图 28 B 相同。HEG2 型标准电流互感器回路的内阻抗约为 $0.11 \pm 0.01 \Omega \cos \Phi = 1$ 只要加上连接导线电阻 $0.09 + 0.01 \Omega$ ，则标准互感器二次实际所接的电阻就是 $0.02 \Omega \cos \Phi = 1$ ，一般标准电流互感器的额定负荷也都是 $0.01 \Omega \cos \Phi = 1$ ，与该互感器作标准时所接的实际负荷相同，这样才能保证测量的准确。被试电流互感器回路的内阻也应为 0.05 欧。

HEG2 型校验仪的正交盘单独还有一个开关，当测互感器误差时，正交盘的单位为分，量限开关应置于“0.1'”或“0.5'”（对于 HEG2 型）或（'）（对于 HEG4 型）。当测阻抗、导纳、小电流、小电压时，正交盘应和同相盘的单位相同，量限开关应置于“%%”。“%%”即表示正交盘与同相盘单位相同。如果测互感器误差时，将量限开关置于“%%”，则相位差读数的单位为 10^{-4} 弧度。当测量电感或电容时，量限开关置于“LC”，则测电感时读数单位为 mH（毫亨），测电容时的读数为 μF 。仪器在测量时都是直接读的，使用时不要把量限开关放错了位置。

HEG2 型校验仪的读数盘时步进式的，同相和正交分别由三个盘（对于 HEG2 型）或两个盘（对于 HEB 型）组成。总限量开关是十进位的，有 *1、*10 和 *100 三档。一般检定互感器只要读两个盘的有效数字则可，不一定都要把三个盘的数字都读出来。例如检定 0.1 级互感器，如总限量开关置于 *1，比值差只要读第一和第二盘，第三盘的单位为 1×10^{-6} 就可以不读；这时也可以把开关置于 *10，则读第二盘和第三盘。要是只想看一看互感器是否合格，例如在半成品试验时，实际上只要读一个盘的数也就可以了。

HEG2 型校验仪所附的晶体管检流计灵敏度很高，一般比振动式的高二个数量级，即约高一百倍。在测量时，检流计的灵敏度从低到高，按顺序先从相同和正交的第一个盘（*1）开始调节，调好后，增大一档检流计的灵敏度，再调低二个盘（*0.1），然后再增大一档检流计的灵敏度，调第三个盘（*0.01）。调节时检流计的灵敏度不要太高，只要被调的盘动一步，检流计有明显的指示即可。调完第三个盘后，检流计一般还有 2—3 档灵敏度，可以不用，如果把检流计置于最高灵敏度，那只有在工作电流为 0.1A，正交盘量限为 0.1'，才能把检流计调平衡。而且所谓平衡，也不是要求检流计的指针绝对指零，而是指针接近零，且这时无论同相盘和正交盘向左或向右转动一步，指针的指示都上升，就说明是平衡的了。这点与 HE5 型校验仪不同，使用时应该注意。在测量电流互感器误差时，无论

采用哪种型号的校验仪，都要注意观察极性指示器，保证互感器极性正确后，才能进行试验。同时在试验过程中，应特别注意检流计的安全。使用检流计时，灵敏度开关一定先从零开始，逐级转动，依次提高检流计的灵敏度；测量完毕后，一定要将灵敏度开关退回至零位。

当电流互感器的电流比为 5/5 或 1/1 时，可以直接进行自校，而不需要标准电流互感器，用 HE5 型和 HEG2 型校验仪对电流互感器进行自校的线路如图 30A 和 B 所示。

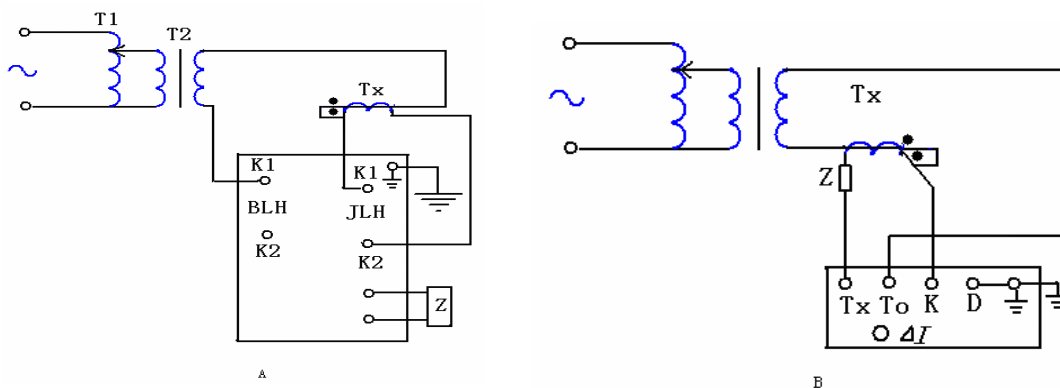


图 30 电流互感器自校线路

四、 复合误差实验

电流互感器的比值差 f 、相位差 δ （用弧度表示）和复数误差 $\sim \epsilon$ 可组成一个误差三角形，如图 31 所示。复数误差的模数 ϵ ，即三角形的斜边就代表复合误差。

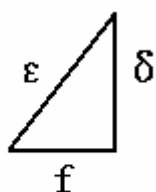


图 31 误差三角形

保护用电流互感器由于铁心饱和，使励磁电流和二次电流出现了高次谐波，用相量图表示互感器的误差已不合理，只能用复合误差概念。即用励磁电流有效值与一次电流有效值的比值表示误差。复合误差自校线路如图 32 所示。互感器的电流比为 5/5 或 1/1，Z 为二次负荷。又电流表 A_1 读出一一次电流有效值，由电流表 A 才读出一一次与二次电流的差值即励磁电流的有效值，算出

复合误差

$$E_c = A_c / A_1 * 100(\%) \quad (97)$$

复合误差互校线路如图 33 所示。途中 T_0 和 T_x 分别表示标准和被试电流互感器， T_0 和 T_x 的电流比相同，且 T_0 的二次负荷很小，复合误差很小，可以略去不计。电流表 A_c 接差流回路，分别测定相应回路的电流有效值，由两电流表读数误差可得到复合误差：

$$E_c = A_c / A_0 * 100(\%) \quad (98)$$

由于 T_0 和 T_x 都工作在年 $nI_n - I_c$ 下， n 为准确限值系数，其标准值为 5、10、15、20、30， I_c 为额定准确限值一次电流。因此 T_0 的铁心也可能饱和，复合误差就不能略去不计，又不能扣除，这样也就不能用图 33 线路测复合误差。

复合误差乘法校验线路如图 34 所示，图中 T_a 和 T_b 均为标准电流互感器，其电流比分别为 K_a 和 K_b ， T_x 为被试电流互感器，其电流比为 K_x ，三个互感器的电流比应满足：

$$K_a = K_b * K_x = nK_x \quad (99)$$

如果选择 T_b 的电流比率 $K_b = n$ ，且 T_a 和 T_b 以及 T_x 的额定二次电流均为 5A，

则 T_x 工作在 nI_n 下，而 T_a 和 T_b 均工作在 $100\%I_n$ ，其复合误差就是复数误差的模数，如 T_a 和 T_b 为 0.2 级以上电流互感器，其复数误差一般不超过 0.5%，故可略去不计。电流互感器 T_b 给被试电流互感 T_x 增添了负荷，可在 T_x 的二次负荷 Z 中扣除。

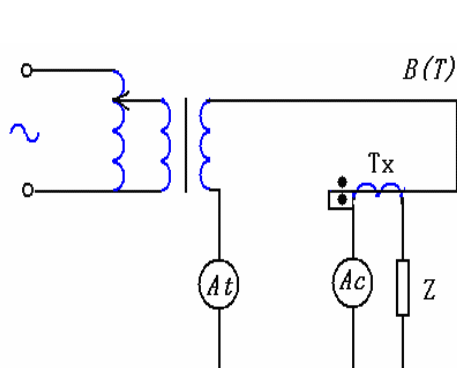


图 32 复合误差自校线路

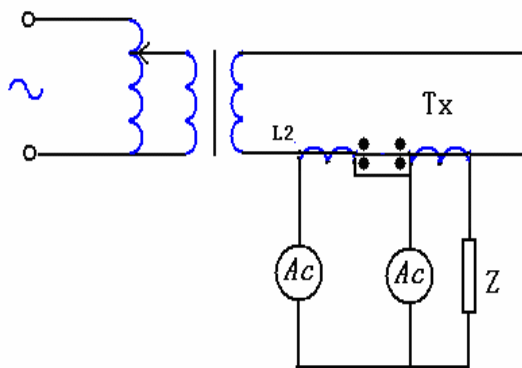


图 33 复合误差互校线路

同样由两电流表 A_0 和 A_c 的读数，可算得复合误差，如式 (98)。

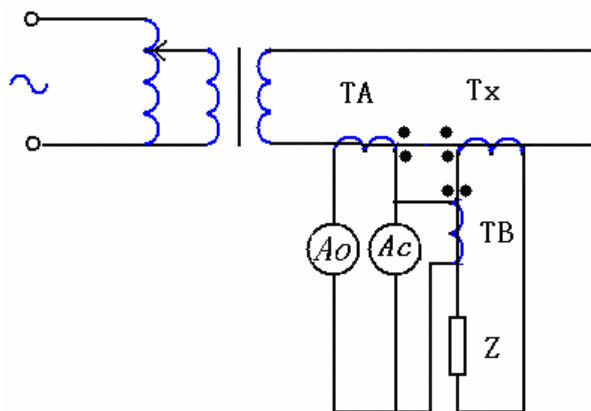


图 34 复合误差乘法校验线路

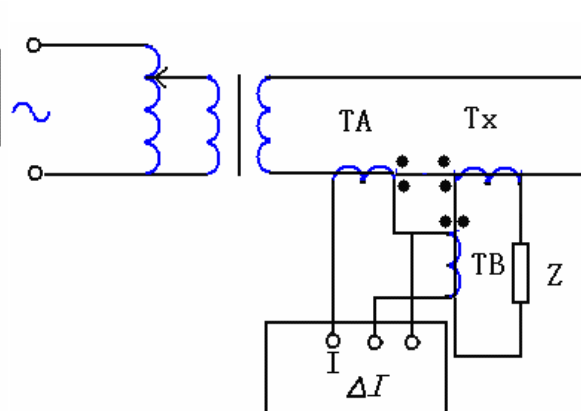


图 35 HEGF1 型测试仪复合误差线路

利用 HEGF1 型复合误差测试仪测复合误差的线路如图 35 所示。实际上是将图 34 中两电流表改用复合误差测试仪，由复合误差测试仪中的百分表，代替 A_0 ，读出 T_0 的二次电流，以确定 T_x 的一次电流，同时由复合误差测试仪直接读在此电流下被试电流互感器的复合误差 ε_c 。

复合误差测试仪是微机式的，百分表有 3 位数字显示，最大读数 $120\%I_n$ ($I_n=5A$)，准确度为 1%满刻度；复合误差 ε_c 也由 3 位数字显示，最大读数为 10%，准确度为 2%满刻度。利用微机很强的计算功能与 A/D 很高的采集转换速度，能在几秒内完成复合误差的测量。这样不仅可以提高工作效率，而且还可避免被试互感器和二次负荷在 n 倍的额定电流下温升过高。

复合误差的间接测定线路如图 36 所示。对于铁心实际上为连续环形（如图 3），二次绕组均匀分布及一次导体位于中心或一次绕组均匀分布的电流互感器，只要一次返回导体的影响可以忽略不计，则可用间接法实验代替上述直接法试验。

试验时，以此极限感应电势是额定负荷与二次绕组阻抗的复数和、准确限值系数及额定二次电流这三者的乘积，即图 36 中的电压 U 为：

$$U = nI_n(Z + Z_2) = nI_n Z_{02} \quad (100)$$

由电流表 A 读的励磁电流有效值与电压表 V 读得电压有效值，即可算得复合误差：

$$\varepsilon_c = (I_0/nI_n) * 100 = (I_0/U) * Z_{02} * 100 (\%) \quad (101)$$

复合误差 ε_c 应不超过表 8 所列复合误差限值。

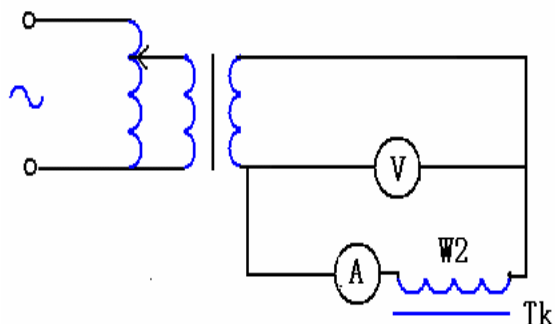


图 36 复合误差间接测定线路

对于其它电流互感器，也可采用测量励磁电流的间接法试验，但对其试验结果应乘以校正系数。此系数是由几何尺寸、铁心材料和二次绕组完全一样的同型电流互感器的直接法和间接法在准确限值系数和负荷条件相同下所测得的复合误差之比。

五、 二次负荷测定

在测定电流互感器误差时，要求标准电流互感器的实际二次负荷与证书上所标负荷之差，不应超过 $\pm 10\%$ ；要求被试电流互感器的实际二次负荷与规定的额定负荷或下限负荷之差，不应超过 $\pm 3\%$ 。二次负荷不准确，特别是被试电流互感器二次负荷偏离规定值，对被试电流互感器的误差影响很大，甚至可能将合格的电流互感器误测为不合格。因此，在测定电流互感器误差时，最好能经常实测这时标准和被试电流互感器的实际二次负荷，确保二次负荷的偏差不得超过允许值和电流互感器误差的数据准确。

1、在 HEG2 型校验仪上测二次负荷

在 HEG2 型互感器校验仪上，实测标准或被试电流互感器实际二次负荷的线路如图 37 所示。

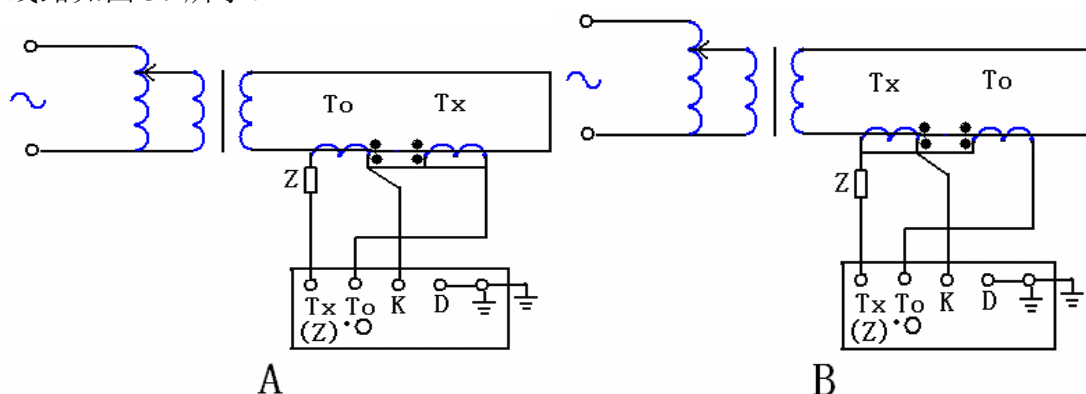


图 37 在 HEG2 型上实测二次负荷

图 37A 是测标准电流互感器二次负荷线路，即在图 29 测定电流互感器误差线路中，将标准电流互感器 T_0 的二次短接，且将校验仪的量限开关改置于 (Z)，正交盘开关改置于 % (对于 HE11 型改用测阻抗刻度)，就可以进行二次负荷的测定。调节同相盘和正交盘使检流计指零时，由同相盘和正交盘读数 R 和 X 即

可得到标准电流互感器的二次负荷阻抗

$$Z=R+jX \quad (102)$$

图 37B 是测被试电流互感器二次负荷线路，即在图 29 测定电流互感器误差线路中，将被试电流互感器 T_x 的二次短接，其它同上，有同相盘和正交盘读数 R 和 X 即可得到被试电流互感器的二次负荷阻抗。

$$Z=- (R+jX) \quad (103)$$

即校验仪读数易号，才是被试电流互感器的二次负荷阻抗值。

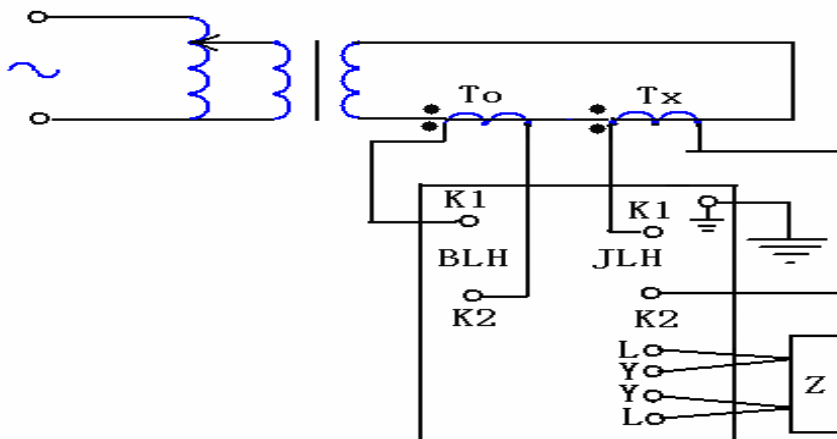


图 38 HE5 型测阻抗线路

2、在 HE5 型校验仪上测二次负荷

在 HE5 型互感器校验仪的使用说明书中，测阻抗线路如图 38 所示，只能测定负荷箱的阻抗，而不能测定标准和被试电流互感器的实际二次负荷，这是 HE5 型互感器校验仪线路设计中的缺陷。

被试电流互感器的二次负荷由负荷箱和连接导线的阻抗（包括接触电阻）组成，不仅要求负荷箱准确，而且还要求连接导线的电阻值也准确。实际上二次负荷超差，除了个别是电流负荷箱超差外，大部分都是连接导线的电阻值超差所造成的。因此在 HE5 型校验仪上也应该设法实测被试电流互感器的二次负荷。

如果在 HE5 型校验仪上测定电流互感器误差采用图 28B 线路，那么按图 39 线路即可测定被试电流互感器的实际二次负荷。

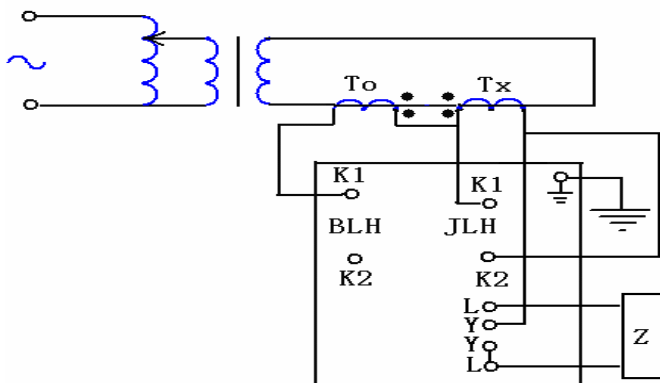


图 39 线路及在图 28B 线路中，将被试电流互感器 T_x 的二次非极性 $K2$ 端钮接测阻抗的 Y 端钮（上端），另一 Y 端钮（下端）和 L 端钮（下端）相接，同时将量限开关改置于测阻抗量限。由校验仪同相盘和正交盘读数 R 和 X ，即可测得被试电

图 39 在 HE5 型上实

测二次负荷

流互感器的二次负荷，也就是从互感器的二次非极性端至负荷箱末端（图中 L 下端）的阻抗。

$$\sim Z=R+jX (\Omega) \quad (104)$$

在 5%~120%额定电流下，二次负荷阻抗应为常数，但有时由于负荷箱开关

接触电阻增大，可能使负荷箱电阻值超差，并使电阻值（实际上是接触电阻值）随着电流的增大而减小。这时应将电流先升到 120% 额定值，使接触电阻减小，或者将开关修理好，是接触电阻减小后，负荷箱才能使用。

应注意：在 HEG2 型上实测二次负荷图 37 中，所测得的二次负荷包括 T_0 和 T_x 二次极性负荷图 39 中，所测得的二次负荷不包括上述极性端连接导线电阻 R ，因此在测电流互感器误差时，中线只能接在 T_x 的二次极性端，才能实现二次负荷。

六、升流器的选用

在测电流互感器误差时，需要调压器调节电源，升流器提供电源。调压器和升流器必须配套，例如一般调压器（单相）的输出电压为 0~250V，因此升流器的输入电压也应为 0~250V，通过调压器来调节升流器的输入电压。同时调压器和升流器的容量必须相当，例如升流器为 5kVA，也要选用 5kVA 的调压器。如果调压器的容量大于升流器，可以使用，但容量太大造成浪费；如果调压器的容量小于升流器，则使调压器过载，严重过载可能烧坏调压器。

升流器的输出电压 U 、电流 I 和容量 S ，满足下式：

$$S=UI(\text{VA}) \quad (105)$$

是由测量电流互感器误差时所需要的容量选定的。由图 28 和图 29 可见，测误差时升流器需要提供的容量有：

(1) 表准和被试电流互感器本身的空载容量和它们所带的二次负荷

一般互感器本身的空载容量为 5~50VA，高压和大电流互感器的空载容量更大一些。标准互感器所带的负荷为 5VA，被试互感器所带的负荷一般为 5~50VA，总共为 20~150VA，而且在一次电流小于 10A 下，基本上与额定一次电流大小无关。

(2) 互感器一次回路连接导线

如果在不同的额定一次电流下连接导线的长度和电流密度都基本相同，那么连接导线的电阻与电流成反比，而连接导线消耗的容量与电流的平方成正比，因此一次回路连接导线所消耗的容量与电流成正比。当电流大于 2000A 时，连接导线的电抗值可能大于电阻值，且电抗值只与导线的长度及它所包围的空间面积有关，而与导线的电流密度基本无关，因此，这时连接导线的电抗所消耗的无边容量就与电流的平方成正比。

根据以上分析，测电流互感器误差时升流器实际需要的容量 S 与额定一次电流 I_{1n} 的关系如下：当 $I_{1n} < 10\text{A}$ 时

$$S=50\sim 200\text{VA} \quad (106)$$

即小电流时容量为常数，与额定一次电流大小无关。这时升流器的输出电压与电流成反比。这也就是说，当互感器的额定一次电流越小时，升流器的输出电压要选得越高。例如 $S=100\text{VA}$ ， $I_{1n}=10\text{A}$ 时，升流器的输出电压应选 $U=10\text{V}$ ； $I_{1n}=0.1\text{A}$ 时，则应选 $U=1000\text{V}$ 。

当 $I_{1n}=10\sim 2000\text{A}$ 时

$$S=K_1 I_{1n} + 50\sim 200(\text{VA}) \quad (107)$$

式中 K_1 ——系数， $K_1=2\sim 4$ (v)，与连接导线的长度和电流密度，以及回路的接触电阻有关。

当 $I_{1n} > 200\text{A}$ 时，50~200VA 这个常数可略去不计，则容量与电流密度成正比，电压为常数，即

$$S=K_1 I_{1n} \quad (\text{VA}) \quad (108)$$

$$U=K_1=2\sim 4 \quad (\text{V}) \quad (109)$$

例如 $I_{1n}=250\text{A}$ ，选用 $U=4\text{V}$ ，则升流器容量为 $S=4*250=1000\text{VA}$ ； $I_{1n}=1000\text{A}$ ， $U=4\text{V}$ ，则 $S=4*1000=4000\text{VA}$ 。

当 $I_{1n} > 2000\text{A}$ 时

$$S=K_2 I_{1n}^2 \quad (\text{VA}) \quad (110)$$

式中 K_2 ——系数， $K_2=(0.5\sim 1) * 10^{-3} \quad (\Omega)$ ，主要与连接导线长度及其所包围的空间面积有关。

大电流时，容量与电流的平方成正比，阻抗为常数，即

$$Z=K_2=0.5\sim 1 \quad (\text{m}\Omega) \quad (111)$$

由此可见，测电流互感器误差时升流器所需的容量：当 $I_{1n} < 10\text{A}$ 时，只要 $50\sim 200\text{VA}$ ；当 $I_{1n}=10\sim 200\text{A}$ 时，只要 $0.2\sim 1\text{KVA}$ ；当 $I_{1n}=200\sim 2000\text{A}$ 时，需要 $0.5\sim 8\text{KVA}$ ，输出电压约为 $2\sim 4\text{V}$ ；当 $I_{1n} > 2000\text{A}$ 至 10KA 时，需要 $2\sim 100\text{KVA}$ 。根据升流器所需的容量配以相同容量或容量稍大一些的调压器即可。

国内外生产的升流器有等容量的，即不论电流大小容量相同，也有不等容量的，即电流大时容量大，电流小时容量下降。对于等容量的升流器，有的面板上只标有输入电压和输出电压，铭牌上标有容量，由容量和电压按式 (105) 即可算出输入电流和输出电流，有的也标出输出电流。不等容量的升流器，铭牌上标有最大容量，面板上标明每档的输入或输出的电压和电流。例如 SYL1 型 500VA 升流器，输入电压为 250V，输出电压和电流相应为：5V、100A、15V、32A、40V、12A、120V、4A、400V、1.2A、1200V、0.4A。其中输出电压值表示当输入电压为 250V 时，升流器可能输出的最高电压，而输出电流值表示允许通过的电流 (测互感器误差时即为额定一次电流，可长期工作)。

如果要测 10/5 电流互感器的误差，如上例所述只要 100VA，输出电压只需 10V，那么可选取上述升流器 15V、32A 档而不必选 40V、12A 档，因为电压小一些，调节 5% 至 120% 额定电流比较方便。又如测 1/5 互感器的误差，也要 100VA，则应选 120V、4A 档，而不选 400V、1.2A 档如果预先不知道需要多少伏安容量，也要尽量先选低电压档，当电流升不上去时，可升高一档电压。不要以为电流只需 1A 而选用 4A 档得升流器会烧坏互感器，实际上 4A 档仅说明这一档额定电流为 4A，允许通过 4A 的电流，并不是说它一定会输出 4A 电流。决定是否能输出 1A 电流的关键是电压 120V，这时输出电流不要超过 1A 的 120% 即可。如果改选 40V、12A 档，尽管允许电流很大，由于电压低，即使调压器调到最高电压 250V，升流器输出电压为 40V 时，电流也升不到 1A 或 1.2A。因此，选用电流大电压低的档，实际输出电流小，实验设备更安全。既然电压低输出电流小，那么为什么测互感器误差时，额定一次电流小反而要选升流器输出电压高的档，如上述 10/5 互感器选用 15V 档，而 1/5 互感器却选用 120V 档？

其实这是两个不同的概念。当阻抗一定时，电流与电压成正比，符合欧姆定律，所以电压低输出电流小，互感器当 $I_{1n} < 10\text{A}$ 时，在不同的额定一次电流下，消耗的容量相同，也就是说它的阻抗与一次电流的平方成反比。例如，当 $I_{1n}=10\text{A}$ 时，容量为 100VA 其阻抗 $Z=100/10^2=1\Omega$ ，要求升流器输出电压 $U=10\text{V}$ ；当 $I_{1n}=1\text{A}$ 时，容量相同，其阻抗 $Z=(10/1)^2=100\Omega$ ，要求 $U=100\text{V}$ 。因为小电流的互感器虽然电流减小，但阻抗按电流的平方成反比增大。

SZ3-3 型穿心式浇注升流器是不等容量设计的，输入电压 250V，最大容量 3kVA，输出是穿心的，每匝电压为 1V，电流与匝数的乘积为 3000 安匝。此外

还有固定的两个输出档，其输出电压和电流相应为：10V、50A 和 30V、10A，即容量相应为 500VA 和 300VA。电流减小容量下降。穿心部分的容量可根据需要选择，如测 500/5 互感器，升流器输出可穿心 3 匝即容量为 1500VA，最多可穿心 6 匝，则容量达到 3kVA。穿心 3 匝，输出电压为 3V，输出电流最大为 $3000/3=1000A$ ，容量为 3kVA，如这时输出电流只需要 500A，输出容量就只有 1.5kVA。穿心 6 匝，输出电压为 6V，输出电流最大为 $3000/6=500A$ ，容量为 3kVA。

当电流互感器的 $I_{1n} > 2000A$ ，所需升流器的容量按电流平方增长，如 $I_{1n}=10kA$ ，按式(109)计算， $S=(0.5\sim 1)*10^{(-3)}*10000^2=(0.5\sim 1)*10^5VA=50\sim 100kVA$ 。采用穿心式升流器，如果标准和被试也是穿心的，那么可以将三者叠在一起穿心，这样穿心导线最短，电抗最小，所需升流器的容量也可明显地减小。如果穿心导线不是用一根而是用 10~20 根分别穿心，并且均匀布满穿心窗口，那么穿心导线的电抗近似与导线根数成反比地下降。例如 LSZ12-12 升流器，输入电压 250V，输出电压每匝 1V，输出电流与匝数乘积 12000 安匝，容量 12kVA，标准和被试互感器均为 10000/5 穿心式，将三者叠在一起用 10 根导线均匀穿心，电流升到 10kA 时，只需 8kVA，正好可以升到 $120\%I_{1n}=12kA$ ，容量约为 12kVA。比上述用一般升流器所需的 50~100kVA 减小容量 84%~92%。

测大电流互感器的误差需要容量很大的升流器，在现场测试要运去这样笨重的升流器和调压器是极不方便的。有一种可以在二次电流次下测误差的大电流互感器，它是用环形铁心加屏蔽铁心绕制的穿心式双级补偿电流互感器，其二次绕组内阻抗(绕组均匀绕制，电抗近似等于零)由屏蔽铁心感应电势供电，误差由二次负荷所需感应电势即环形铁心励磁电流决定。因此测出二次绕组励磁电流与二次电流之比，就是这种电流互感器的复数误差和相应的比值差和相位差，测试线路图 40 所示。图中 1 为环形铁心， W_b 为补偿绕组，只绕在铁心 1 上；2 位屏蔽铁心， W_2 为二次绕组，绕在铁心 1 和 2 上， W_2 和 W_b 匝数相等且并联联接。校验仪直接读出励磁电流 I_0 与工作电流即二次电流 I_2 的比值，也就是被试互感器 T_x 的比值差 f 和相位差 δ

$$\sim \epsilon = I_0/I_2 = f + j\delta \tag{112}$$

在二次电流下测大电流互感器的误差，升流器只需要几十伏安容量，当然是很方便的。

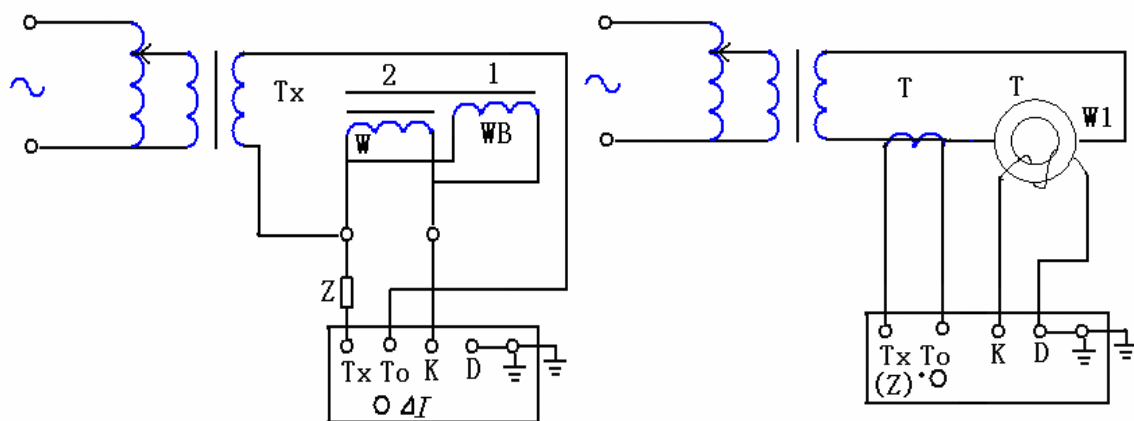


图 40 在二次电流下测误差线路

附录

测铁心磁性能路线如下图所示。图中电流互感器的电流 $I_n=5\sim 50/5$ ，T 为被试铁心，励磁匝数 $W_1=1$ 匝，测量匝数 $W_c=5$ 匝。

先在 $K_n=5/5$ ，校验仪工作电流 $I=0.5\sim 5A$ 下，测 E_c ，校验仪读数为 $Z=R+jK$ (Ω)

由 I 和 Z 的读数算出

$$H=IW_1/L=I/L \text{ (A/cm)}$$

式中 L—铁心平均磁路长度 (cm)

$$B=45E_c/W_cSk=47.4IZ/S \text{ ()}$$

式中 $k=0.95$ ， $W_c=5$

S——铁心截面 (cm^2)。

$$\psi=\text{tg}^{-1}(X/R)$$

由计算结果得到的 H、B 和 ψ 值，即可绘制 B-H 和 ψ -H 曲线。

D340 (曲线 1) 和 D310 (曲线 2) 冷轧硅钢片带绕铁心 B-和 ψ -H 曲线。