

互感器丛书 赵修民 编著

电流比例标准

赵修民 编著

山西科学教育出版社

山西科学教育出版社

电 流 比 例 标 准

赵修民 编著

*

山西科学教育出版社出版发行 (太原并州北路十一号)

太原千峰科技印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 5.125 字数: 108千字

1989年12月第1版 1989年12月太原第1次印刷

印数1—6000册

*

ISBN 7-5377-0243-8

Z·54

定价: 2.80元

编 者 的 话

山西省机械设计研究所赵修民高级工程师潜心从事互感器科研工作逾三十年,取得了显著的成绩,他领导的研究室,获三十多项科技成果奖和近十项专利权,发表论文六十多篇,设计产品三百多种规格,生产精密互感器中试产品畅销全国,享有较高的声誉。

为了总结经验和普及提高,本社约请赵修民同志主编这套《互感器丛书》,本丛书拟出五个分册,各分册为《电流互感器》、《电压互感器》、《互感器校验仪的原理和应用》、《电流比例标准》、《电压比例标准》。其中前四分册业已出版,后一分册也将在近年内出版,与读者见面。丛书中除基础知识、基本原理以及有关标准和规程的内容之外,不少篇幅介绍了该所的科研成果及其实际应用。

《电流比例标准》主要介绍双级电流互感器、电流比较仪和零磁通电流互感器等三种电流比例标准。在基本原理的基础上,系统地阐述了有关的线路和特点,以及相互之间的内在联系。着重介绍了电流比例标准的检定,特别是由电流比较仪组成的检定系统的绝对校准。对电流比例标准的设计以及结构和参数的选择,结合国内有关产品,也做了较详细的叙述。其中零磁通电流互感器、调零负荷箱及电流比较仪检定系统,都是该所的科研成果。

电流比例标准是高准确度的电磁仪器。《电流比例标

准》是丛书的第四册，按照由浅入深的原则，其内容进一步加深。有了前三分册的基础知识再学本书，就容易理解。本书适合于从事电流比例标准和电流互感器设计、制造、使用和试验的科技人员以及具有高中以上文化程度试验员和工人参考，也可供从事交流电测量的有关人员阅读。

目 录

概述.....	(1)
双级电流互感器.....	(3)
一、双级电流互感器基本原理.....	(3)
二、双级补偿电流互感器.....	(7)
三、双级电流互感器误差计算.....	(10)
四、双级电流互感器检定线路.....	(15)
电流比较仪.....	(18)
一、无源电流比较仪.....	(20)
二、外源电流比较仪.....	(23)
三、补偿式电流比较仪.....	(25)
四、分离式电流比较仪.....	(29)
五、测差式电流比较仪.....	(32)
六、电流比较仪检定线路.....	(33)
零磁通电流互感器.....	(42)
一、零磁通电流互感器基本原理.....	(43)
二、零磁通双级电流互感器.....	(55)
三、零磁通电流互感器检定线路.....	(59)
调零负荷箱.....	(67)
一、磁势补偿零磁通电流互感器的调零负荷箱 (I_p)	(67)

二、电势补偿零磁通电流互感器的调零负荷箱 (Z_b)	(68)
三、电流源调零负荷箱	(71)
四、电压源调零负荷箱	(74)
五、零磁通双级电流互感器的调零负荷箱	(77)
电流比例标准的检定	(79)
一、补偿式电流比较仪各种检定线路的原理	(80)
二、实用自校线路	(88)
三、实用比较线路	(91)
四、实用加法 ($N+1$) 线路	(98)
五、实用乘法 (级联) 线路	(103)
电流比较仪检定系统	(111)
一、由 4 台电流比较仪组成的检定系统	(113)
二、由 3 台电流比较仪组成的检定系统	(122)
三、绝对校准结果和计算举例	(128)
电流比较仪的设计	(142)
一、磁屏蔽的选取	(142)
二、绕组的设计	(145)
三、其它参数的选择	(149)
四、误差的补偿	(152)
参考文献	(160)

概 述

随着电能计量准确度的提高，对扩大电流量限装置电流互感器的准确度也提出了更高的要求。目前我国已能设计制作一次电流范围由0.1A至50kA、二次电流由0.05A至5A、准确度由0.05级至0.01级的各种规格高准确度电流互感器。

为了保证这些高准确度电流互感器的准确度，就必须有更高准确度的标准设备，对它进行检定。这种更高准确度的标准器就是电流比例标准，其准确度一般在 2×10^{-5} 以上，可以用来检定0.01级及以下的高准确度电流互感器。

同时，随着电阻、电容、电感等元件准确度的提高，对测量这些元件的电桥也提出了更高的要求。过去各种电桥的比例臂，主要用的是电阻比例，其准确度一般为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ，改用电流比例臂或者电压比例臂，其准确度可提高1~2个数量级，达到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 以上。

实际上电流互感器是一种简单的电流比例仪器，其电流比反比于绕组的匝数比。但是由于电流互感器的二次有负荷，一次电流通过铁心和绕组感应传递到二次时，需要给铁心励磁，有能量损失，带来了误差。而电磁式电流比例标准，其电流比也反比于绕组的匝数比，一般不带负荷或者接近为零负荷，不传递能量，没有或者极少能量损失，没有或者极少电流互感器的误差，因此具有很高的准确度。

由于电流比例标准的二次不带负荷或接近为零负荷，不传递能量，因此一般电磁式电流比例标准不能作为电流互感器，用来扩大测量仪表的量限。电流比例标准主要作为电流比例的标准，用来检定包括电流互感器在内的各种电流比例仪器。

最常用的电磁式电流比例标准有：双级电流互感器，零磁通电流互感器和电流比较仪，以下分别加以介绍。同时还将介绍提高电流比例标准准确度的方法，电流比例标准的检定方法和各种调零磁通装置，以及由电流比例标准组成的可以实现自校准的检定系统。

双级电流互感器

双级电流互感器的基本原理，大约在三十年代就提出来了。最早用于生产的，可能是与磁耦合式互感器校验仪配套的0.01级双级电流互感器，由奥地利于四十年代开始生产。

五十年代以来，由于电流比较仪的出现，其准确度远高于双级电流互感器，因此电流比较仪很快取代了双级电流互感器，并且逐步在生产中应用。六十年代以来，由于电流比较仪准确度的提高，需要更准确的校验，而电流比较仪检定电流比较仪必须通过调零装置，不仅检定麻烦而且影响检定的准确度，同时由于电流比较仪的电流增大，超过了10kA，这时双级电流互感器的准确度本来就比较，再加上把提高电流比较仪准确度的各种屏蔽方法，也用在双级电流互感器上，使双级电流互感器具有与电流比较仪相同的准确度，因此在电流大于5~10kA（即安匝数大于5~10kA）时，又用双级电流互感器代替电流比较仪。双级电流互感器检定双级电流互感器要比电流比较仪检定电流比较仪方便多了。

一、双级电流互感器基本原理

电流互感器误差的产生是由于互感器二次有负荷，需要提供感应电势，为此铁心需要励磁电流，励磁电流就是电流互感器的误差。

根据磁动势平衡原理，电流互感器铁心绕组中的磁动势关系为：

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1)$$

式中 I_1 、 I_2 ——一次电流和二次电流；
 N_1 、 N_2 ——一次绕组和二次绕组匝数；
 I_0 ——励磁电流。

电流互感器的复数误差为：

$$\tilde{\varepsilon}_1 = f + j\delta = - \frac{\dot{I}_0 N_1}{\dot{I}_1 N_1} = - \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_1} = - \frac{Z_{02}}{Z_m'} \quad (2)$$

式中 f 、 δ ——互感器的比差和角差；
 Z_{02} ——二次负荷总阻抗；
 Z_m' ——折算至二次的铁心励磁阻抗。

双级电流互感器就是由两级电流互感器组成的特殊电流互感器。其中第一级电流互感器与一般电流互感器相同，满足上述式(1)和式(2)。而第二级电流互感器是将第一级互感器的励磁安匝 $I_0 N_1$ 作为第二级互感器的一次安匝，第二级互感器的二次安匝为 $I_{B2} N_B$ ，励磁安匝为 $I_{0B} N_1$ 。双级电流互感器的原理线路如图1所示。

图中绕组 N_1 、 N_2 绕在铁心 I 和 II 上， N_1 、 N_2 和铁心 I 组成第一级电流互感器；绕组 N_B 叫做补偿绕组，只绕在铁心 II 上， N_1 、 N_2 、 N_B 和铁心 II 组成第二级电流互感器，由磁动势平衡原理得到：

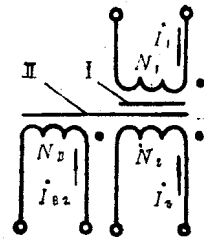


图1 双级电流互感器原理线路

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 + \dot{I}_{B2} N_B &= \dot{I}_{0B} N_1 \\ \dot{I}_0 N_1 + \dot{I}_{B2} N_B &= \dot{I}_{0B} N_1 = \dot{I}_{0B}' N_B \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\dot{I}_{0B}$ ——第二级铁心励磁电流。

第二级电流互感器的误差为：

$$\tilde{\varepsilon}_2 = -\frac{\dot{I}_{0B} N_1}{\dot{I}_0 N_1} = -\frac{\dot{I}_{0B}}{\dot{I}_0} = -\frac{Z_{0B}}{Z_{Bm}'} \quad (4)$$

式中 Z_{0B} ——第二级互感器二次总阻抗；

Z_{Bm}' ——折算至第二级互感器二次的第二级互感器的励磁阻抗。

如果让 $N_B = N_2$ ，且将 $\dot{I}_{B2}$ 与 $\dot{I}_2$ 叠加，即 $\dot{I}_2 + \dot{I}_{B2}$ 为双级电流互感器的二次电流，那么由式 (3) 可以得到：

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 + \dot{I}_{B2} N_2 &= \dot{I}_{0B} N_1 \\ \dot{I}_1 N_1 + (\dot{I}_2 + \dot{I}_{B2}) N_2 &= \dot{I}_{0B} N_1 \end{aligned} \quad (5)$$

双级电流互感器的误差为：

$$\tilde{\varepsilon} = -\frac{\dot{I}_{0B} N_1}{\dot{I}_1 N_1} = -\tilde{\varepsilon}_1 \tilde{\varepsilon}_2 = -\frac{Z_{02} Z_{0B}}{Z_m' Z_{Bm}'} \quad (6)$$

双级电流互感器的误差是由第二级互感器铁心的励磁安匝所决定，且为第一级和第二级互感器误差乘积的负值，也等于两个互感器二次总阻抗的乘积与励磁阻抗乘积的比值的负值。

由此可见，如果第二级互感器的误差为 $10\% \sim 1\%$ ，则双级电流互感器可比一般电流互感器提高准确度 $1 \sim 2$ 个数量级。当然由于第二级的安匝数 $\dot{I}_0 N_1$ 很低，误差 ε_2 很大，一般约为 10% ，即使这样，也还可以提高互感器准确度 $2 \sim 4$

级。

如上所述，双级电流互感器是一种特殊的电流互感器，必须具备两个条件：

(1) 第一级和第二级互感器的二次回路必须是相互独立的，否则就破坏了上述双级互感器的原理；

(2) I_2 和 I_{B2} 必须能够叠加。

因此双级电流互感器首先应用于磁耦合式互感器校验仪上，其原理线路如图 2 所示。

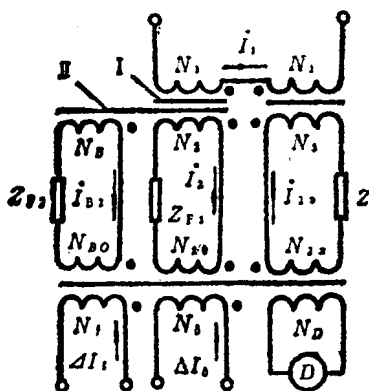


图2 磁耦合式互感器校验仪上的双级电流互感器

双级电流互感器作为标准电流互感器 T_0 ，第一级互感器的二次电流 I_2 输入 N_{20} 绕组，第二级互感器的二次电流 I_B 输入 N_{B0} 绕组，被试互感器 T_X 的二次电流 I_{2X} 输入 N_{2X} 绕组，测差电流 $\Delta I_1 + j\Delta I_2$ ，分别输入 N_1 和 N_2 绕组， T_c 为磁耦合器铁心， N_D 为检测绕组。当指零仪 D 指零时，根据磁动势平衡原理：

$$\dot{I}_2 N_{20} + \dot{I}_{B2} N_{B0} - \dot{I}_{2X} N_{2X} + \Delta I_f N_f + j \Delta I_\delta N_\delta = 0$$

设 $N_{20} = N_{B0} = N_{2X} = N_f = N_\delta$, 则:

$$(\dot{I}_2 + \dot{I}_{B2}) - \dot{I}_{2X} = -\Delta I_f - j \Delta I_\delta \quad (7)$$

即把 $\dot{I}_2 + \dot{I}_{B2}$ 作为标准互感器的二次电流, 由校验仪直接读出被试互感器相对于标准互感器的误差, 并预先规定好比差和角差的符号:

$$\tilde{\varepsilon} = f + j\delta \approx \frac{\Delta I_f}{I_2} + j \frac{\Delta I_\delta}{I_2} \quad (8)$$

由图 2 可见, 当指零仪指零时, 双级电流互感器第一级互感器的二次总负荷 Z_{02} 为

$$Z_{02} = Z_{F1} + Z_2 + Z_{20} \quad (9)$$

式中 Z_{F1} —— 第一级外接负荷, 包括联接导线电阻和接触电阻;

Z_2 —— N_2 绕组内阻抗;

Z_{20} —— N_{20} 绕组内阻抗。

第二级互感器的二次总负荷 Z_{0B} 为

$$Z_{0B} = Z_{F2} + Z_B + Z_{B0} \quad (10)$$

式中 Z_{F2} —— 第二级外接负荷, 就是联接导线电阻和接触电阻;

Z_B —— N_B 绕组的内阻抗;

Z_{B0} —— N_{B0} 绕组的内阻抗。

二、双级补偿电流互感器

六十年代以来, 国内生产和使用的互感器校验仪, 基本上都是测差式互感器校验仪。双级电流互感器在测差式互感

器校验仪上应用时的联接线路如图 3 所示。

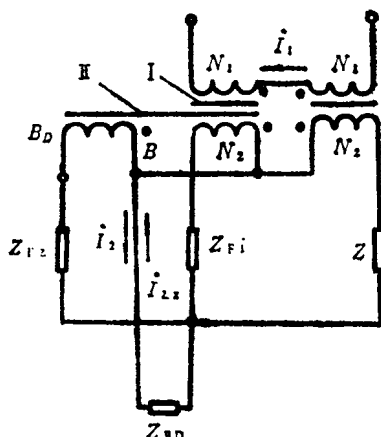


图 3 测差式互感器校验
仪上的双级电流互感器

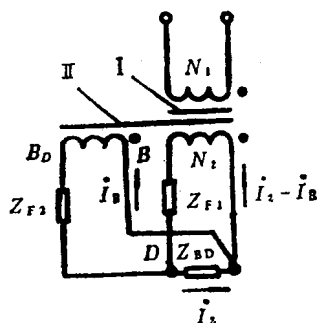


图 4 双级补偿电流互
感器原理线路

图中符号意义同前, $N_B = N_2$, Z_{BD} 为测差式校验仪测量回路等值阻抗, 是第一级和第二级互感器的共同负荷。由于补偿绕组回路与二次回路并联联接, 实际上已破坏了上述双级电流互感器运行的两个条件, 所以不能再用双级电流互感器的原理进行分析。

补偿绕组回路与二次回路并联联接, 且第一级和第二级有共同负荷的双级电流互感器, 叫做双级补偿电流互感器, 可按图 4 分析其补偿原理。

由图 4 可见, 由于二次绕组和补偿绕组并联联接, N_2 、(这时相当于只绕在铁心 I 上) N_B 和阻抗 Z_{F1} 、 Z_{F2} 形成闭合电路, 因此 N_2 在铁心 I 上产生的感应电势 $\dot{E}_b$ 为:

$$\dot{E}_b = \dot{I}_2 (Z_2 + Z_{F1}) - \dot{I}_B (Z_B + Z_{F2} + Z_2 + Z_{F1})$$

$$\begin{aligned}
&= (\dot{I}_2 - \dot{I}_B) (Z_2 + Z_{F1}) - \dot{I}_B (Z_B + Z_{F2}) \\
&\approx \dot{I}_2 (Z_2 + Z_{F1}) - \dot{I}_B (Z_B + Z_{F2}) \quad (11)
\end{aligned}$$

式中 $\dot{I}_B$ —— 铁心 I 的励磁电流。

如果把第一级和第二级互感器的负荷 Z_{F1} 和 Z_{F2} 分别计入 N_2 和 N_B 的内阻抗 Z_2 和 Z_B 中, 则式 (11) 可简化为:

$$\dot{E}_b \approx \dot{I}_2 Z_2 - \dot{I}_B Z_B \approx \dot{I}_2 Z_2 \quad (12)$$

N_2 在铁心 I 上产生的感应电势 $\dot{E}_u$ 为:

$$\dot{E}_u = \dot{I}_B Z_B + \dot{I}_2 Z \approx \dot{I}_2 Z \quad (13)$$

N_2 在双铁心 I 和 II 上产生的感应电势为:

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_b + \dot{E}_u = \dot{I}_2 (Z_2 + Z) = \dot{I}_2 Z_{02} \quad (14)$$

由此可见, 双级补偿是将二次绕组内阻抗压降 $\dot{I}_2 Z_2$ (包括 Z_{F1}) 由 N_2 在铁心 I 上产生的感应电势承担, 即用补偿组的内阻抗压降 $\dot{I}_B Z_B$ (包括 Z_{F2}) 代替 $\dot{I}_2 Z_2$, 且由于 $\dot{I}_B Z_B \ll \dot{I}_2 Z_2$, 使互感器的二次总负荷减少, 误差减小。这样, N_2 在铁心 I 上产生的感应电势仅承担二次负荷压降 $\dot{I}_2 Z$ 。这时电流互感器的误差仅由铁心 I 的励磁安匝 $\dot{I}_{0B}' N_B$ 所决定, 而与铁心 I 的励磁安匝 $\dot{I}_B N_B$ 无关 (当 $\dot{I}_B Z_B \ll \dot{I}_2 Z$ 时)。因此双级补偿实际上也是一种电势补偿^[1]。

在双级补偿中, 当 $Z_2 < Z$, 且铁心 I 和 II 完全相同时, 补偿后反而使电流互感器的误差增大。当 $Z_2 \gg Z$ 时, 双级补偿可使电流互感器的准确度明显提高。

当双级补偿电流互感器用于测差式互感器校验仪上时 (图 3), $Z = Z_{BD}$ 。

对于比较仪式互感器校验仪, $Z_{BD} \approx 0$, 则由式 (13)

可以得到:

$$\dot{E}_u = \dot{I}_B Z_B + \dot{I}_2 Z_{BD} \approx \dot{I}_B Z_B \quad (15)$$

式(15)中的 $\dot{I}_B$ 和 Z_B 就是式(3)和(10)中的 $\dot{I}_{B2}$ 和 Z_{0B} , 即 $\dot{I}_B = \dot{I}_{B2}$, $Z_B \approx Z_{0B}$; 同时, 图2双级电流互感器补偿绕组 N_B 在铁心Ⅰ上的感应电势

$$\dot{E}_u \approx \dot{I}_{B2} Z_{0B} \quad (16)$$

式(16)与式(15)相同, 第二级铁心Ⅰ的励磁安匝 $\dot{I}_{0B} N_1$ 也相同, 二者的误差也相同, 如式(6)所示。但是二者的分析方法不同, 双级电流互感器是以 $\dot{I}_2 + \dot{I}_{B2}$ 为二次电流, 双级补偿电流互感器仍以 $\dot{I}_2$ 为二次电流。

对于电位差式互感器校验仪, $Z_{BD} \approx 0$, 其值与校验仪比差和角差读数盘的读数有关, 读数最大即 Z_{BD} 最大, 读数为零即 $Z_{BD} = 0$ 。 Z_{BD} 的最大值为 $\pm 0.01 \pm j_{0.01}^{0.01} \Omega$ (对于HE5型) 或 $\pm 0.005 \pm j_{0.01}^{0.015} \Omega$ (对于HE11型和HE8型)。这时 $\dot{I}_2 Z_{BD}$ 大于 $\dot{I}_B Z_B$, 不能略去不计; 但 Z_{BD} 仍比一般标准电流互感器的二次负荷 0.2Ω 小很多, 因此用于电位差式校验仪上的双级电流互感器实际上是一种双级补偿电流互感器, 仍有较高的准确度, 仍可简称为双级电流互感器。

由此可见, 双级电流互感器是 $Z_{BD} \approx 0$ 时的双级补偿电流互感器, 前者仅是后者的一个特例。应该说后者的概念更清楚、更确切, 分析方法也更符合实际, 这在以后补偿式电流比较仪原理的分析中将进一步得到证明。

三、双级电流互感器误差计算

设双级电流互感器的参数如下:

第一级铁心(辅铁心)尺寸: $\phi 120 / \phi 150 \times 20$ (内径

／外径×高度)，D340冷轧硅钢片材料。

第二级铁心（主铁心）尺寸： $\phi 120/\phi 150 \times 20$ ，铁镍合金材料，初始磁导率 $\mu_0 = 5\text{T/Oe}$ 。

安匝数 600安匝，二次电流 5A。

二次绕组内阻抗 $Z_2 \approx 0.1 + j0\ \Omega$ 。

补偿绕组内阻抗 $Z_B \approx 0.2 + j0\ \Omega$ 。

第一级负荷 $Z_{F1} = 0.2 + j0\ \Omega$ 。

第二级负荷 $Z_{F2} = 0.1 + j0\ \Omega$ 。

计算 $Z_{BD} \approx 0$ 即用于比较仪式互感器校验仪和 $Z_{BD} = \pm 0.005 \pm j0.006\ \Omega$ 即用于电位差式互感器校验仪上的双级电流互感器的误差。

计算结果列于表1。

现以额定电流即100% I_n 为例说明计算过程。

1. 第一级互感器误差计算

$$E_b = I_2(Z_2 + Z_{F1}) = 5 \times (0.1 + 0.2) = 1.5\text{V}$$

$$B_b = \frac{E_b \times 10^4}{222 N_2 S_b k} = \frac{1.5 \times 10^4}{222 \times 120 \times 3 \times 0.95} = 0.2\text{T}$$

式中 N_2 ——二次绕组匝数， $N_2 = 120$ 匝；

S_b ——辅铁心截面， $S_b = 3\text{cm}^2$ ；

k ——铁心叠片系数， $k = 0.95$ 。

由磁密 $B_b = 0.2\text{T} = 2000\text{Gs}$ ，查D340铁心 $B-H$ 和 $\psi-H$ 曲线〔2〕，得到磁场强度 H_b 和损耗角 ψ_b ：

$$H_b = 0.06\text{A/cm}, \quad \psi_b = 45^\circ$$

$$I_B = H_b l_b / N_B = 0.06 \times 13.5\pi / 120 = 0.021\text{A}$$

式中 l_b ——辅铁心平均磁路长度， $l_b = 13.5\pi\text{cm}$ ；

N_B ——补偿绕组匝数， $N_B = N_2 = 120$ 匝。