



电流夹钳一种测量电流强度的适用性方法研究

周家明^{1,2}

(1、武汉大学北京研究院, 北京 100165;

2、北京海洋兴业科技有限公司, 北京 100081)

摘要: 在节能型社会中电流测量已变得越来越重要, 在电压确定情况下关系到电源功耗。夹钳式电流探头的出现, 是为了解决测量电流的问题, 它不仅使用方便, 不像分流测量方法, 需要断开电路进行测试, 而且它采用感应式非接触传感器, 安全可靠; 更重要的是它适用广泛, 可以全面提升万用表、示波器、功率计、记录仪等仪器电流和功率测量能力。本文从夹钳式电流探头的作用出发, 从交流和直流两个方面重点研究了夹钳式电流探头的原理和应用, 并简单列举了夹钳式电流探头一些具体应用。最后从实际出发, 论述了日常测试工作中我们如何选择夹钳式电流探头。

关键词: 电流测量 电流钳 霍尔效应 电子仪器

一、引言

夹钳式电流探头主要用来提升万用表、功率计、示波器、手持示波表、记录仪或记录器、以及其它各种各样仪器的电流测量能力, 现已得到广泛使用。电流探头“钳围”载流导体, 在不中断被测电路的情况下, 进行非接触电流测量, 它们输出与被测电流成比例的电压或电流信号, 并且直接传送到具有低电流或电压输入的测试仪器上, 通过仪器测量和显示相应的测量值, 进而根据相应的转换比得出实际的导体通过电流。

使用夹钳式电流探头测量时, 电流的载导电路不用断开, 并且从仪表的输入端保持电气绝缘从仪表的输入端保持电气绝缘。这样既方便又安全, 会使配套的测量仪表低输入端是既可以悬浮也可以接地。这种特点使钳形电流探头测量电流时, 不需要断开电路, 节省了设备来回启动的宝贵时间。

实际电路中电信号一般都不是完全的正弦波, 为了保证测量精度和其高频特性, 使用夹钳式电流探头时(如 E3N), 配套的显示仪表最好为真有效值 (Trms) 的万用表(如 BM807 和 OI857)。在大多数情况下, 钳形电流探头不会限制有效值 (rms) 测量, 但是与它配套的仪器含限制有效值测量。好的钳形电流探头内部具有以下良好的特性: 高精度、良好的频率响应和极小的相位偏移。

根据测量电流的频率, 钳形电流探头根据两种不同原理, 设计出两种不同的钳形电流探头: ①交流夹钳式电流探头; ②交直流夹钳式电流探头。

二、交流夹钳式电流探头的原理和应用

交流夹钳式电流探头在原理上可以看成是一个简单的电流变压器(图 1)。图 1 中变压器在磁体上缠绕了两个基本线圈。电流 I_1 流过初级线圈 C_1 , 通过互感, 次级线圈 C_2 上产生相应的互感电流 I_2 。这两个线圈的圈数(匝数)与电流关系的公式如下: $N_1 \times I_1 = N_2 \times I_2$, 其中 N_1 为线圈 C_1 的圈数, N_2 为线圈 C_2 的圈数, 这样我们可以导出如下公式:

$$I_2 = \frac{N_1 \times I_1}{N_2} \quad \text{或} \quad I_1 = \frac{N_2 \times I_2}{N_1}$$

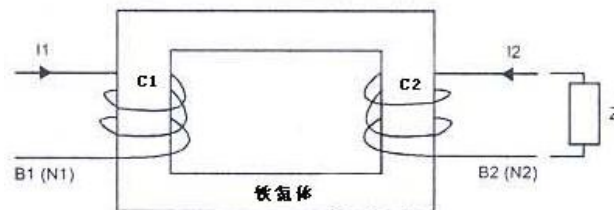


图1 简易电流变压器原理图

同理，适用于钳式交流电流探头（图2）。钳式交流电流探头中可以张开的铁磁体表示为线圈 B2，钳颞口夹住的导体流经电流 I1。其中 B1 是一根简单的导体，它的线圈匝数 N1 为 1，流经的电流 I1 是被测电流，这样电流探头“钳围”导体时，电流探头内部线圈 B2 根据其匝数，按比例产生输出电流 I2，即

$$I_2 \text{ (探头输出)} = \frac{N_1}{N_2} \times I_1, \text{ 其中 } N_1=1, \text{ 这样探头输出 } I_2 = \frac{I_1}{N_2} \text{ (} N_2 \text{ 为探头线圈匝数)}$$

实际工作中，直接测量电流 I1 常常比较困难，因为电流 I1 一般较大，不能直接接到仪表上，此时也不可以简单地断开电路。为了产生一个能通过相应倍数比例的输出水平，交流电流探头内置了特有的探头线圈架。在钳形线圈上的匝数，一般方便设计成整数倍（如 100、500 或 1000）。此时如果 N2 为 1000，这样钳 N1/N2 的比率为 1: 1000，在输出显示上相应为 1000: 1 的倍数关系。如果从输入和输出的电流关系出发，则这个比率可用探头的输出关系 1mA/A 表示，即探头输出显示为 1mA 时，颞口上流经测量电流为 1A，或者显示为 1A 时，颞口上流经的测量电流为 1000A。

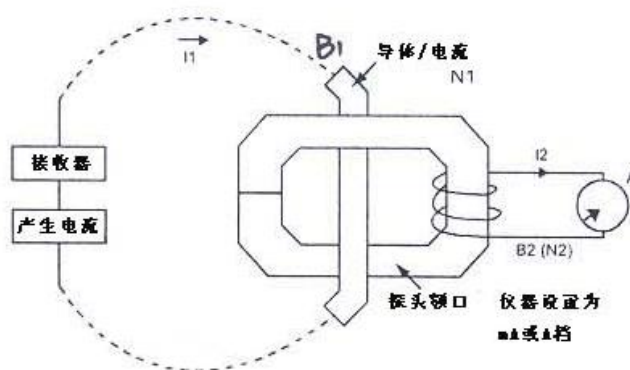


图2 交流钳式电流探头原理图

有些探头也可能会使有更大的比率，例如 500: 5、2000: 2、3000: 1 或者 3000: 5，这是为了满足不同领域测试电流的需要。大多数情况下，交流电流探头一般与数字万用表（如 OI859CF）配套使用。例如当我们使用 1000: 1 的电流探头，它具有 1mA/A 的输出，此时探头颞口流经的电流，按比例会得到相应的输出电流结果（表 1）：

表 1 探头颞口流经电流在 1000: 1 转化后的输出电流

导体电流输入（被测电流）	探头输出电流
1000A	1A
750A	750mA
280A	280mA
...	...



如果探头输出是电流，在连接到万用表时，万用表功能应设置到 AC 电流档，紧接在万用表上读出读数，同时与倍数比例相乘，就可以实际测出流过导体的电流值。例如万用表(一般为手持数字万用表 DMM)在 200mA 量程读数为 150mA，乘上电流探头转换比 1000: 1，在导体上流经的电流值为 $150\text{mA} \times 1000 = 150\text{A}$ 。

交流电流探头不仅用在万用表上，还可以用在其它仪器上，例如示波器。只是需要注意以下两个方面：①电流探头的输出是电流还是电压，譬如示波器只能用带电压输出的交流电流探头；②仪器输入阻抗一定要相互匹配（图 3）。带 AC 或 DC 电压输出的交流电压探头仅仅只能用在具有电压量程的测试仪器上（如示波器、记录仪等）（图 4、图 5），此时电流探头输出电压信号（例如 MN60、Y4N 和 D37N），对应的换算倍数比例为 mV 电压与电流比，即 1mV AC: 1AAC。

交流夹钳式电流探头一般不需要外接电源，其简单经济实用，但是电流变压器内铁芯饱和时限制了线性电流的范围，并且无直流输出，在测量带有直流成份的电流时会影响测量动态性能，现在已广泛使用夹钳式直流电流探头。

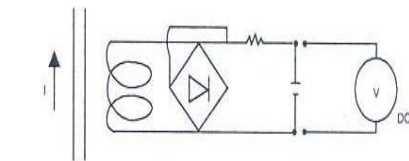
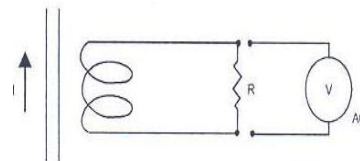
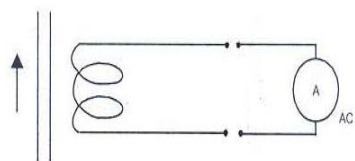


图 3 探头与仪器阻抗匹配 图 4 电流探头输出交流电压信号 图 5 电流探头输出直流电压信号

三、夹钳式直流电流探头的原理和使用

不同于传统的夹钳式交流电流探头，夹钳式直流电流探头采用霍尔效应原理，直接检测变压器铁心内磁通强度，通过载流导体产生的磁场强度，在直流探头内一个半导体芯片上传感产生涡流感应。这个微型半导体(图 6)放在磁场(B)右角时，同时会产生一个电流(I_d)，在此半导体上会产生电压(V_h)，这个电压称为霍尔电压，它以第一个得出此结论的美国科学家 Edwin Hall 命名。

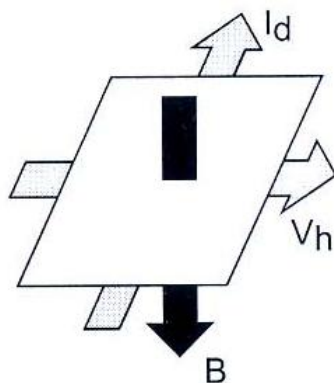


图 6 霍尔效应原理图

当连续产生霍尔驱动电流 (I_d) 时，磁场 (B) 直接等比例在半导体上形成电流，这样电流以霍尔输出电压 (V_h) 表示。在常规电流测量上，会产生两个好处：首先，霍尔电压不仅由反相磁场确定，而且由它的强度确定，这样它就可



以用在直流电流测量；其次当导体流过的电流改变时，磁场强度也随之改变，并且这种变化为随机动态反应，而且复杂的交流波形也可同时被捕获和测量，并且具有较高的精度和较低的相位偏移。

这个探头颚口基本结构按图 7 所示装配，霍尔器件嵌入铁芯用于将测量中的直流电流成份调理成直流电压输出，图中是否使用一个或二个霍尔发生器，由探头的型号决定。好的夹钳式电流探头（如 E3N）在此原理基础上，会具有较好的线性输出和温度补偿网络，在高精度线性输出上，也会同时设计成宽的动态范围和频率响应，有的最高可测量到 1500A 电流的所有应用领域。这种方法测量电流直观简便，不需要昂贵的功耗分流器，并且在复杂的信号和有效值测量中，能精确测量 kHz 以上的交流信号。

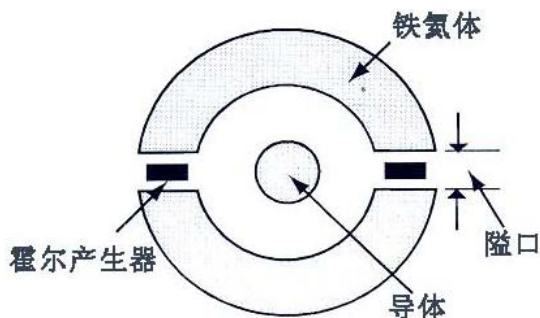


图 7 直流探头颚口基本结构装配图

夹钳式直流探头输出以 mV 表示（直流时为 mV DC，交流时为 mV AC），并且可与具有电压输入的大多数仪器配套使用，例如数字万用表、记录器、示波器、手持示波器、记录仪等。有些厂家的夹钳式直流电流探头更采用小直流电流和磁饱和技术，可用在过程电流测量的小电流领域（如法国 C.A 公司 K2 电流探头）。直流电流探头更可提供真有效值(Trms)AC 或 AC+DC 电流测量。

随着技术的发展，一些公司（如美国 Tektronix）设计出以上结合以上两种技术的混合式电流探头，将变压器和霍尔效应发生器组合在一个集成单元中，并对输出进行组合，可以测量从直流到 100MHz 带宽的电流信号（如 P6021）。

四、使用夹钳式电流探头

1、交流或直流（AC/DC）电流测量

测试步骤：①把电流探头连接到仪器上；②选择仪器的功能和量程；③在单根导线上夹持探头；④读仪器上的测试值；⑤按照探头的转换比，换算成实际电流值。具体连接见图 8。以 PAC12 一种直流电流探头为例：采用霍尔效应传感器，转换比为 1mV DC/A DC，万用表设置为 200mV 直流电压档，其读数为 160mV 直流，则导体上的测量电流为 160A 直流（ $160\text{mV} \times 1000\text{A/mV}$ ）

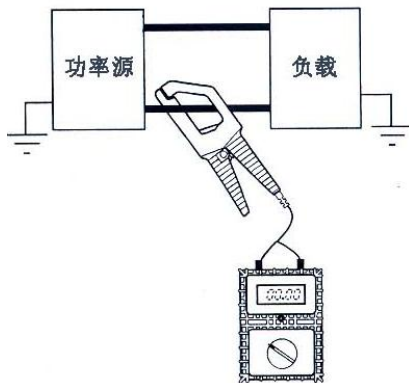




图8 使用夹钳式电流探头的基本操作

2、小电流、过程电流、泄漏电流测量

当电流测量很小，且不能满足探头的最小灵敏度要求，或者测量精度受限，此时可以把被测电流的导线按整数倍缠绕在电流钳口上，即通过在钳口多绕几圈的方法提高直流输出值，这个电流值就会按缠绕的圈数等比例放大，测量值乘以探头转换比再除此缠绕圈数，即可测出实际电流值，图9。例如：转换比为1000:1的电流探头，所接万用表量程为200mA交流，导线在钳口上缠绕10圈，万用表读数为60mA交流，则流过导体的实际电流为： $60\text{mA}(\text{读数}) \times 1000(\text{转换比}) \div 10(\text{圈数}) = 6\text{A}$ 。

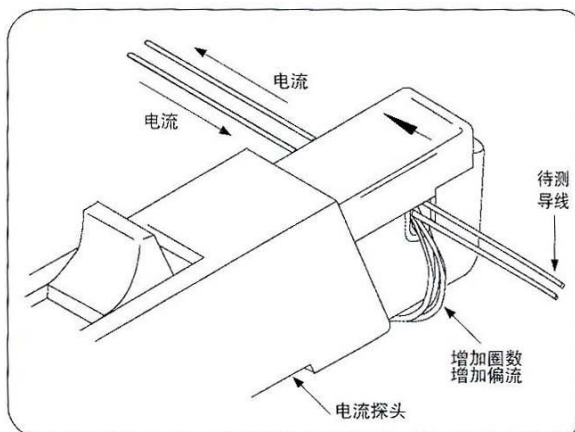


图9 缠绕被测导线测量小电流

有些品牌的电流探头（例 K1 和 K2）本身就具有较低的电流测量，这些电流探头具有 mA 级的直流电流灵敏度，有的甚而可用来测试 4~20mA 的回路过程电流，用来满足回路过程电流测量的需要。

当夹钳式电流探头“钳住”两根带有不同极性的导体时，测量结果会显示两个电流的差值。如果两个电流大小一样，读值为零；如果读值不为零，该读数显示了在负载上的泄漏电流大小（图10），您就可以不用单独购买漏电流钳表来测量泄电故障，记住在测量泄漏电流时，电流探头需要较低的灵敏度（如 MN73 灵敏度达 10mA），此时也可用它直接测量接地漏电流（图11）。

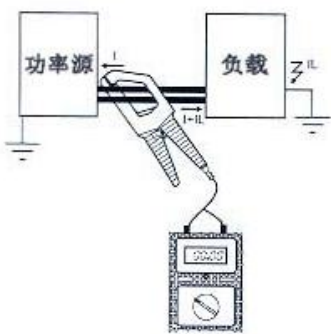


图10 用夹钳式电流探头测量泄漏电流

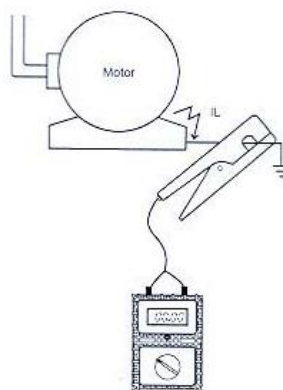


图11 用夹钳式电流探头测量接地漏电流

3、差分电流法以测量大的直流电流

测量中如果需要测量叠加在大的直流信号上的交流成分，或者夹钳式电流探头直流测量量程太小，我们可以使用第二根导线增加偏流的差分方法来实现。此



时，通过增加偏置电流，如上所述测量的直流电流就是二组导线电流之间的差值，只要将测得的数值加上偏置直流电流的数值就可以计算出实际的电流值。测量时将另外一根只通过直流成分的导线与被测导线一起放在颚口内，保证第二根导线电流的方向与待测信号相反，就很容易测出大电流值（图 12）。

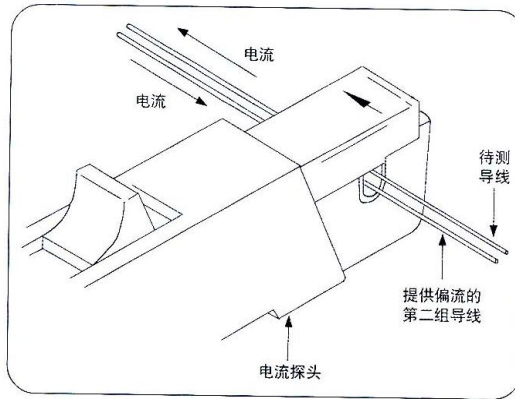


图 12 用钳式电流探头增强大电流测量能力

五、如何选择电流探头

市面上有很多种钳式电流探头可供选择，并且每个品种对应的型号也很多，那么我们应如何选择呢？应根据自身的需求，选择最合适的电流探头，最后做到既能满足要求，又能合乎预算；选择时应注意以下六个方面：

- 1、测量直流电流还是交流电流？交流电流的频率多高？
- 2、测量的最大和最小电流有多大？即测量电流的范围。如果需要测量小电流，为了保证精度最好选用低电流探头。
- 3、测量细电缆还是粗电缆？决定钳头形状和钳口尺寸。
- 4、需要电流探头的输出工作参数是什么？例如 mA、mV、AC、DC 等；同时注意电流探头的输出阻抗与连接仪器的输入阻抗匹配，以确保精度。
- 5、将电流钳主要用在哪些仪器上？即电流钳的输出接头（如 BNC、 \varnothing 4mm 安全香蕉插头等），选择可连接且与仪器接头形式配套的钳头，同时注意 K 插孔与 J 插针相对应。如果使用不配套的接头或者 K 插孔/J 插针不对应，可配用一些接头适配器。请注意以下词汇：Male/Pin/Plug/J 中文为阳/公/插针/插头；Female/Socket/Outlet/Jack/K 中文为阴/母/插孔/插座。
- 6、需要的其它特殊指标和性能要求：被测导体工作电压，一般为 600V 以上；电流钳用在谐波分析仪和功率计上时一定要注意电流钳频率和相位偏移……

总之，选择电流钳或电流探头时，请注意每个电流探头的特点（如精度、质量、分辨率等），最终使选择的钳头真正符合实际需要。

参考文献：

- 1、[美]库姆斯主编，张伦等译，《电子仪器手册》，349~350 页，北京，科学出版社，2006 年 5 月
- 2、Tektronix（美），探头 ABC，2005 年
- 3、Chavrin Arnoux（法），Current Clamps Catalogue
- 4、如何使用电流探头，www.oitek.com.cn
- 5、合理科学地选择探头，www.scopeprobe.com.cn