

## 高精度，高带宽，高稳定性的电流传感器测量技术

池田 健太，增田 秀和

### 1 前言

当今，在功率调节器和变频器等功率转换系统所代表的电力电子领域中，大家对电流都有着高精度，高带宽的测量需求。我司自从 1971 年发售了钳形测试仪 CT-300 ( Fig. 1 ) 以后，一直以来根据不同的测量用途，提供着各种各样的电流传感器 ( Fig. 2 )。在本稿中，我们聚焦高精度，高带宽的电流测量需求，对我司的电流传感器的特长以及电流测量的要点做一个记述。



Fig. 1 Current Sensor CT-300, launched in 1971.



Fig. 2 Hioki zero-flux current sensors.

### 2 关于电流传感器的检测方式

电流传感器的检测方式虽然涉及到多方多面，但大多数的方式，都是由被测导体中流过的电流在磁力铁芯中产生磁通量，然后插入钳表空隙时，通过磁电转换元件或者在磁力铁芯上缠绕的线圈来进行检测的。而每种检测方式，都有它的优点和缺点。所以用 1 种检测方式，去应对所有的测量需求是非常困难的。我司把 2 种检测方式进行了组合，我们称它为零磁通方式（也被称作闭环方式或磁力平衡方式）。通过采用这种方式，我们提供着高精度，高带宽的电流传感器。

零磁通方式，就如 Fig. 3，4 中所示要形成包含了磁力电路的负反馈电路。而为了能够抵

消被测电流在铁芯中所产生的磁通量，在反馈线圈中也会流过电流。因为运行的磁通量可以控制的非常小，所以其优势在于受到磁性材料的非线性性的影响可以抑制在最低限度。我司的高精度电流传感器使用的就是由 Fig. 3 中所示的磁通门方式和变流器 (CT) 方式组合之后的零磁通方式。磁通门方式可以从直流开始测量，因其检测用的不是半导体，所以失调电压较小，在温度稳定性，长期稳定性上都有很卓越的表现。我司提供的电流传感器精度为  $0.02\% \text{rdg}$ ，频宽  $3.5\text{MHz}$ ，其精度和频宽都是世界顶尖水准。另外，我们灵活利用了磁通门方式在高温下的稳定性，还提供了可以在  $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$  温度环境下测量的产品。

另一方面，高带宽电流传感器采用的是如 Fig. 4 中所示的霍尔元件和变流器 (CT) 方式组合的零磁通方式。它拥有着从直流到最大  $120\text{MHz}$  的测量频宽。测量用的关键元器件，霍尔元件是由我司自主研发生产的。因其拥有着高灵敏度，低噪音的特性，和示波器组合后观测微弱的电流波形也是非常合适的。

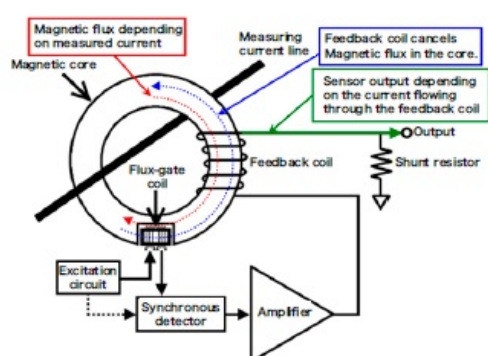


Fig. 3 Zero-flux method (flux-gate type).

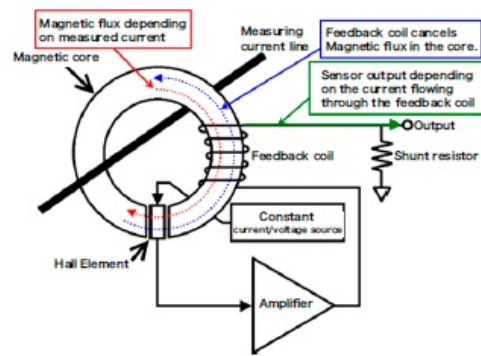


Fig. 4 Zero-flux method (Hall element type).

### 3 电流传感器结构上的区别

电流传感器在结构上，分贯通型和钳形 2 类。贯通型在磁力铁芯上没有分割面，因此可以很容易的让磁力铁芯全周的特性都很平均，可以构造出非常高精度的电流传感器。但是，接线的时候由于需要把电源线穿过传感器，所以需要暂时性的分离电源线，这就不能直接和正

在工作着的设备接线了。

另一方面，钳形的话磁力铁芯的结构是可以分割的，所以只要夹住电源线就能进行测量。因为不需要像贯通型那样要先把电源线分离，所以测量工作状态中的设备也非常方便。但是，制作了铁芯的分割面，就意味着要让全周都获得均衡的特性会变得非常困难。一般的钳形电流传感器测量精度较差，受导体位置的影响较大。想要得到重现性较好的数据比较困难。我司有着长年累积的对电流传感器的开发经验，结合经验，我们制作出了钳形高精度的电流传感器。这个在后面我们再做叙述。

#### 4 电流传感器的选型要点

要使用电流传感器进行高精度的测量，最重要的就是要根据被测对象，选择最合适的电流传感器。

多数的高精度电流传感器（精度 0.1% 以下）采用的是电流输出，而我司的高精度电流传感器采用的是电压输出的方式。一来说，从信号传递的品质上来看，电流输出更为优越。但是在电流传感器的输出方式中，电压输出也有许多好处。下面我们会一边阐述电压输出的好处，一边分享在电流传感器选型方面的要点供大家参考。

##### 4.1 电流传感器的额定，测量频宽需要匹配合适

为了能够实现高精度的去测量电流，我们必须要选择适合于测量对象电流电平的电流传感器。比如，我们使用相同测量精度的 2 个电流传感器。用精度相同，额定 10A 的电流传感器和额定 500A 的电流传感器去测量 5A 的电流，那么使用接近于测量对象的额定 10A 的电流传感器去测量，所测得的精度和重现性一定是更为有利的。我司的电流传感器的额定电流是用有效值去标定的，但是用峰值去标定电流传感器的额定电流的也有很多，需要注意。

加上被测电流的所有频率成分，是否都能被电流传感器的测量频宽所覆盖，也需要进行确认。

#### 4.2 要确认测量频宽的振幅，相位是否在精度上有所标定

一般情况下，和功率计组合的高精度电流传感器，大多数只对工频（50Hz/60Hz）振幅的精度有所标定，相位相关的精度标定一般是没有的。普通的高精度电流传感器的电流输出，想要去标定其高频振幅和相位的精度，是非常困难的。因此除了工频以外，大多公开的都是具有代表特性的图表，这点需要大家注意。我司因为采用的是电压输出的方式，所以对测量频宽的全频段的振幅，相位的精度都能做出标定。要准确测量功率的话，光是看振幅精度是不够的，相位精度也非常之重要。特别在选用测量功率用的电流传感器时，要尤为注意是否有标定相位的精度。

#### 4.3 要确认是否有较高的通用性

电流传感器使用电压输出的话，不只是功率计，DMM，示波器，记录仪等等都能很容易的就连接上去。使用 1 台电流传感器，就能对应各种各样的测试需求。

#### 4.4 确认 S/N 比是否足够高

我司的高精度电流传感器在测量额定电流时，设计是会输出 2V 的电压。比如使用我司的 CT6863（额定 200A）和功率计组合测量 AC 200A 时，就会往功率计输入 AC 2V。另一方面，电流输入型的功率计的输入部分因为内置的是分流电阻，所以从电流传感器中即使输出的是电流，最后还是会被转换成电压进行处理。使用变比 1500：1 的高精度电流传感器来测量 AC 200A 时，通常分流电阻的电阻值为 0.5Ω或是 0.1Ω，那么此时功率计所测量到的输入电压就是，

$$133.3\text{mA} \times 0.5\Omega = 66.65\text{mV AC}$$

$$133.3\text{mA} \times 0.1\Omega = 13.33\text{mV AC}$$

所以从功率计上所测量到的信号电平 2V 和 13.33mV~66.65mV 比较来看，电压输出的电流传感器的 S/N 比是较高的。

#### 4.5 调整，计量是否较为方便

我司的电流传感器因为是电压输出的，所以要做调整，计量就较为方便。因此，涵盖了输出电缆线部分都能做精度的标定。另外，包括线阻造成的微弱的压降部分都能够进行调整。也能特制标配的测试线以外的长度。

我司的高精度电流传感器不只在直流和工频下，在高频领域也能够进行计量。以下是我司的电流传感器的计量点的例子，在各频率点下都执行了可追溯的计量。

振幅：±DC, 50 Hz, 60 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz,

300 kHz, 700 kHz, 1 MHz

相位：50 Hz, 60 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz,

300 kHz, 700 kHz, 1 MHz

### 5 高精度测量的注意点

从长年研发电流传感器的经验中，我们总结了一些使用电流传感器去高精度的测量电流的注意事项，下面做一个介绍。

#### 5.1 测量导体需要放置在传感器的中心位置

无论是哪种电流传感器，都一定会受到导体位置的影响。其影响量随着测量频率变高，有增大的倾向。即使是特性较好的贯通型电流传感器，一到 10kHz 以上的高频影响就会变大。

电流传感器厂家所标定的测量精度，一定是位于电流传感器中心位置时的精度。特别在测量高频电流时，把导体放在传感器的中心位置，才能高精度，并且高重现性的去进行测量。

## 5.2 让电流传感器远离附近的导体

因为电流传感器检测的是被测物中流通的电流所产生的磁场，所以即便并非测量对象，但是附近有导体流通电流的话，多多少少还是会受到一些影响的。特别高频电流的话，其影响会更大。在测量时，需要考虑到受影响的可能性，再去进行测量。

## 6 高精度电流传感器精度的标定方式

我司的高精度电流传感器在测量频宽内，对所有的频率带宽都有精度标定。一般来说，电流传感器所标定的精度都只是在导体位于传感器中心位置时的。但是，在实际使用的环境下，想要把导体放置在中心位置其实也并没有那么容易。Fig. 5 中所示的，是我司高精度电流传感器 ( CT6841 ) 的频率特性和规格。对于各频带中所标定的精度，即使改变导体位置，也能满足规格要求。

另外，我司对于高精度电流传感器的精度规格，在标定时都留有充足的余地。所以，实际能力要比规格上标定的要强大得多。

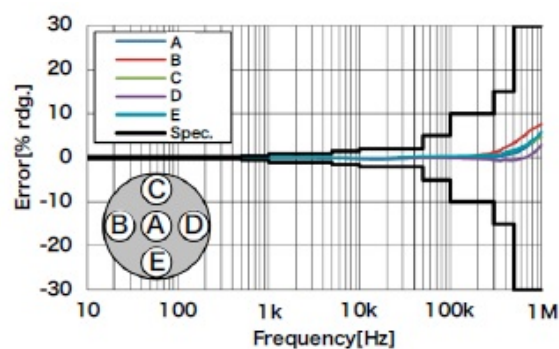


Fig. 5 Gain-frequency characteristics.

## 7 高精度钳形电流传感器



Fig. 6 High-precision clamp sensor.

我们前面已经说过，一般钳形电流传感器会因为设计上有分割面的存在，所以精度和重现性较差。在这一章节中，我们介绍一下我司的高精度钳形电流传感器 CT6843( 额定 200A ) 的一部分特性。Fig7~9 是和我司的额定相同的贯通型电流传感器 CT6863 ( 额定 200A ) 作的一个特性比较。我司的钳形电流传感器的特性，已经直追贯通型电流传感器的特性了，所以要做高精度的功率测量也是完全能够使用的。

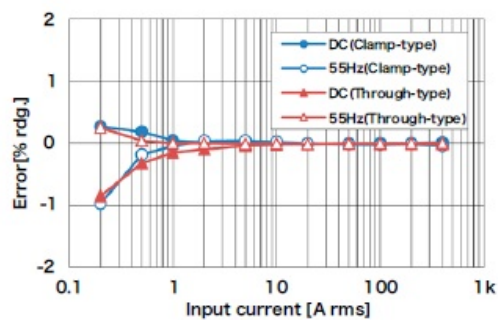


Fig. 7 Linearity.



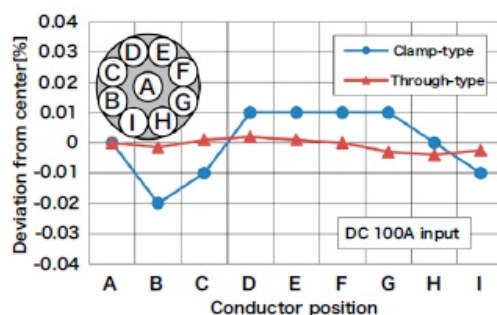


Fig. 8 Effects of conductor position.

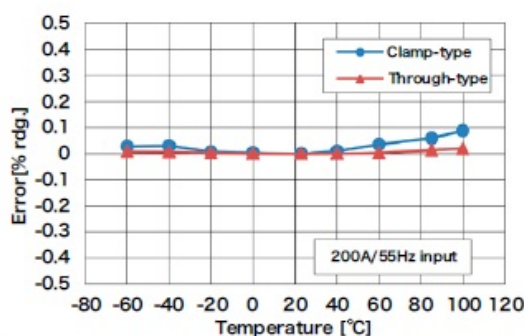


Fig. 9 Gain-temperature characteristics.

能把钳形传感器做到现在的性能，主要是除了分割面之外，全周的结构都很平均，在设计时，分割面的结构也考虑到了要让磁力电阻抑制在最小限度。就和贯通型一样，在制作时会注意让磁力铁芯全周的结构，都平均一致。

另外，我司的钳形电流传感器不只在性能上，在设计时对操作性也非常重视。从开合的操作到传感器部位的锁键，都能单手简单操作。为了对应多样的测量环境，我们还有使用温度范围在-40°C~+85°C的产品。在高温，像汽车引擎箱内这样严酷的环境下，都能稳定使用。

更进一步，我司提供的功率计，也是专门为电流传感器设计的。所以功率计可以直接供电给电流传感器，也能自动识别电流传感器。和功率计组合后作高精度高带宽的功率测量是最为合适的。

## 8 高带宽钳形电流传感器



前文有说过，我司的高带宽电流传感器的特长在于，相比高精度电流传感器其测量带宽要更高，干扰程度也较小。在这之中，我司提供的拥有着最高电流—电压转换比率（以下称输出变比）和频率带宽（Fig.11）的 CT6701（Fig.10），在测量过程响应电流波形，冲击电流等的高速响应波形上，和在观测含有各种频率成分的微弱电流波形上，都是最优的电流传感器。

高频带电流传感器我们前面也说过，是使用了薄膜型霍尔元件的零磁通方式的 AC/DC 电流传感器。其主要元器件，是由我司自主研发生产的薄膜型霍尔元件。通过使用相比以往机型能够大幅度降噪的薄膜霍尔元件，实现了输出变比 1V/A（以往机型的 10 倍）并且低干扰性的性能。Fig. 12 中表示的是和以往机型的测量波形做的比较。通过这个电流传感器，从小型电机开始，到汽车电子零部件中流过的控制电流，都能以 mA 级别去进行细微的观测了。另外，因为还拥有着 120MHz（-3dB）的高带宽，所以还能和示波器等波形观测仪器相连接，可以观测到含有各种频率成分的电流波形。比如，用在观测功率的转换或电机控制上的开关电路的控制电流，负载电流上。进行高速开关时半导体元件的 ON/OFF 电流波形，纹波等都能进行观测。



Fig. 10 Wideband current sensor CT6701.

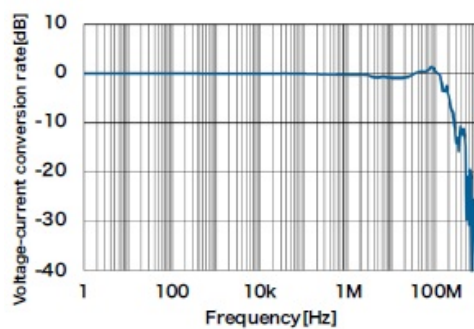


Fig. 11 CT6701 amplitude-frequency characteristics (typical).

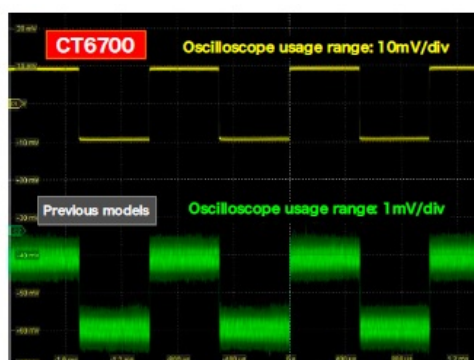


Fig. 12 20 mAp-p waveform (comparison with previous Hioki model).

## 9 结语

本稿把焦点放在了我司持续 40 年以上，不懈努力开发的电流传感器上。从零磁通方式的检测原理，到电流传感器的选型要点，使用时的注意事项，一部分的特性都做了介绍。在需要高精度，高带宽电流测量的电力电子领域中，如果在测量电流时本稿能给您提供一些参考，那么我们也就非常荣幸了。