

电流测量技术的新突破

--Fluke A40B 系列精密分流器

一. 用分流器电流测量电流的主要技术问题

如何准确、方便地测量电流，一直是测量技术努力追求，不断探索的课题。在电路中接入分流器，测量分流器两端的电压，再根据欧姆定律，用测得的电压除以分流器的电阻值就可以得到电路中的电流值。这种测量方法使用设备少，方便，快捷，受到了普遍地欢迎，成为测量电流的主要方法。特别是采用数字化测量技术后，以测量电压为对象的模/数转换器的大量应用，使得用分流器测量电流的方法更流行，更普遍。

然而，使用分流器测量电流也受到许多的限制。这种限制主要表现在三个方面。首先，由于电流在分流器电阻上消耗的电功率转换成加热能量，使分流器发热，使电阻值发生变化，从而影响测量电流的准确度。其次，在测量交流电流时，分流器的交流参数使分流器成为一阻抗，阻抗的模值随频率变化，分流器两端的电压也会随频率变化，使得测量交流电流的准确度大大降低。在音频范围内，电阻值小于 10 欧姆的电阻容易呈感性，电阻值大于 10 欧姆的电阻容易呈容性。在测量大电流时，电阻值都很小，分流器的电感参数影响大；在测量小电流时，电阻值较大，分流器的电容参数影响较大，测量电压的电压表的输入电容的影响会进一步加重这种影响。最后，在测量交流电功率时，要求从分流器得到的电压信号保持电流的相位。分流器在通过交流电流时，尽管分流器的阻抗模值可能变化不大，但是，分流器两端的电压相对于电流的相位已不再同相位，产生了附加相移。这对分流器的交流参数提出了更高的要求，如何降低分流器的附加相移，成为测量交流电功率的关键技术。

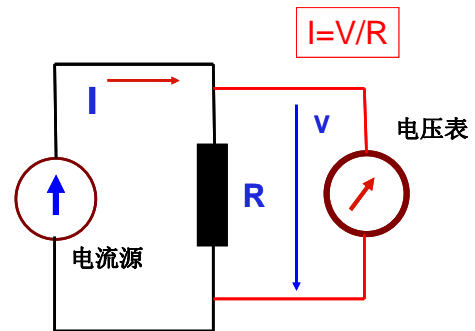


图 1 用分流器测量电流

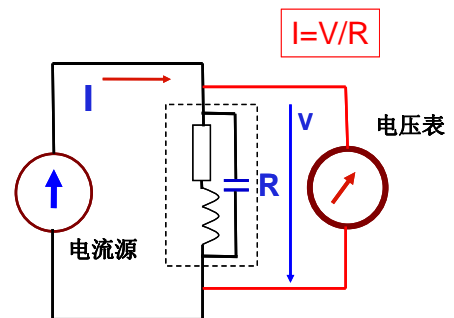


图 2 分流器交流参数的影响

目前市场上流行的 6 1/2 位数字多用表至 8 1/2 位数字多用表的交流电流性能就反映了当前交流电流测量的水平。这些数字多用表都毫无例外地采用分流器来测量交流电流，而在交流电流测量中，分流器引起的误差在测量误差中占主导地位，这些数字多用数字表测量交流电流的技术指标基本上就是这些仪器的分流器的性能指标。

表 1 目前流行数字多用表交流电流量技术指标 (% , 20Hz~5kHz)

型号 量程	8508A	1281	3458A	8846A	34411A	2002	2001	2000	34401A
200μA	0.05	0.05	0.25	0.3	0.3	0.52	0.52	无	无
200mA	0.05	0.05	0.4	0.3	0.3	0.32	0.32	无	无
2A	0.1	0.23	0.32/1A	0.24	0.16	0.47	0.47	0.24	0.24
20A	0.26	无	无	0.21/10A	无	无	无	无	无

从表中可以看出，目前流行的高精度数字多用表中，仅有 8508A 可以测量 20A 电流。用这些高精度数字多用表测量 2A 的交流电流时，测量准确度仅能达到 0.1%。有的八位半数字多用表也仅能达到 0.5% 左右。其中主要的原因就是受使用的分流器的性能的影响。

二. 用交直流转换技术测量交流电流

为了提高交流电流的测量准确度，可以采用交直流转换技术测量交流电流，也就是用已知的直流电流校准被测的交流电流。采用交直流转换技术的测量装置都是真有效值电压测量仪器，接入分流器后，可以测量电流。通过直流电流产生的有效值电压与通过交流电流产生的有效值电压相比较，得到交直流转换误差。采用交直流转换技术测量交流电流，可以补偿分流器自加热功率系数的影响和分流器电阻值长期稳定性的影响，比直接测量交流电流有更低的测量不确定度。

在交直流转换测量时，先通入一个与被测交流电流值相近的已知直流电流，得到读数 1；再接入被测的交流电流，得到读数 2，根据这两个读数计算出交直流转换的差。这一转换差就是相对于直流电流值的修正值。

$$C_{ac-dc} = \frac{\text{读数}dc - \text{读数}ac}{\text{读数}dc} \times 100\%$$

Fluke A40 和 Fluke A40A 系列分流器就是专门用于交直流转换技术的分流器，也是目前市场上较为流行的高精度交流电流测量装置。Fluke A40 和 Fluke A40A 系列分流器覆盖 10 mA 至 20A 的交流电流测量范围，年指标为 0.02% ~ 0.05%。Fluke A40 和 Fluke A40A 的技术指标对于许多经常性的精密交流电流校准工作，譬如校准各种多功能校准器，还满足不了校准不确定度的要求。往往还需要对性能稳定的分流器进行特征化标定，利用分流器性能修正值在一段时间内的稳定性来降低校准不确定度。

三. A40B 分流器的主要性能和特点

A40B 系列精密分流器有 14 个低电感同轴分流器，电流量程额定值从 1mA 到 100A，用于在实验室测量交直流电流和校准交直流电流转换测量装置。

A40B 分流器有四种不同的尺寸，如图 3 所示。整个装置包括：

四个封闭的小尺寸分流器：

1mA， 10mA， 20mA ， 50mA；

五个小尺寸同轴分流器 100mA， 200mA， 500mA， 1A， 2A；

三个中等尺寸的分流器：5A， 10A， 20A； 两个大尺寸的分流器：50A 和 100A

分流器的电压输出标称值为 0.8V。可以使用精密电压表或其他测量仪器测量它的输出电压，例如：交流电压测量标准，交直流转换标准，交流电压转换器等。

A40B 采用的同轴型分流器设计使得分流器受外部磁场影响最小，可实现最优的性能。另外，开放式的物理设计能最大限度的实现空气对流，使分流器温度系数最小。这个特点使得分流器在很宽的电流范围内都能实现稳定的电阻特性。100A 电流对应的电阻为 $8m\Omega$ ，电阻增加到 80Ω 时，电流为 10mA。最小的 1mA 的分流器内部有一个电池供电的缓冲放大器，可以驱动输出电压，使得 800Ω 的分流器电阻与测量装置隔离，不让电压测量电路与分流器互相影响。

A40B 分流器的电阻值非常稳定、准确，具有出色的低自加热功率系数和低温度系数。电流测量范围非常宽，电流值从 0.1mA 至 100A，可以直接测量从直流到 100kHz 的电流，准确度远远高于之前的所有分流器装置。



图 3 A40B 精密分流器

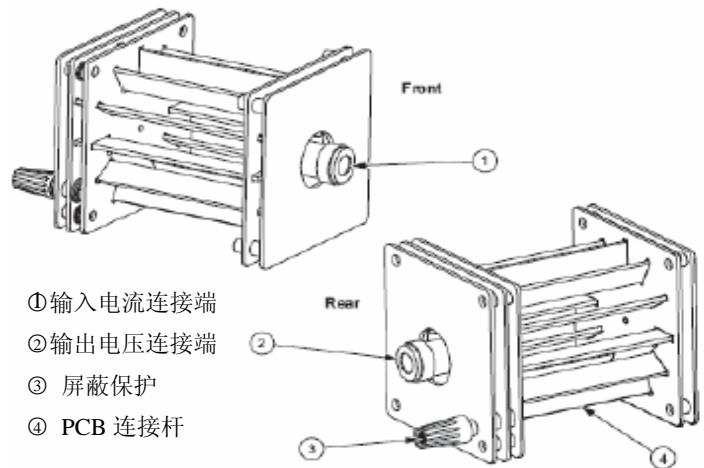
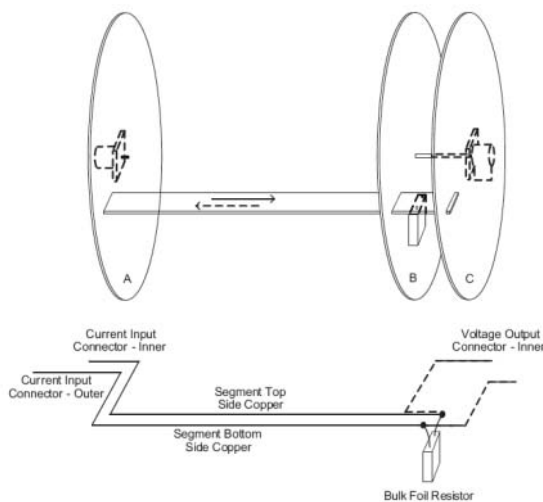


图 4 A40B 特点和连接

分流器内部的物理结构和元件的精密性保证了它的频率响应平坦性。A40B 的相位偏移也非常小，在 100kHz 内基本可以忽略。在整个带宽都可以直接测量电流。跟以前的交直流电流转换测量过程相比，大大简化了交流电流的测量过程。因此，现在精密电流测量可以直接根据分流器电阻值换算，而不必再使用传统的复杂的交直流转换方法了。

A40B 的这些特性，使它非常适合在传统的精密电流测量场合应用，例如校准校准器的电流功能等。另外，也可以支持大电流跨导放大器的校准。相位偏移极低这一特点，在电能质量分析和数字功率表的测量应用中非常关键，目前只有 A40B 可以胜任对高精度电能标准源、谐波源和电能质量校准源的校准。

表 2 A40B 测量电流技术指标

标称电流	标称电阻 Ω	指标 ±uA/A, TCal ±1°C, ≤50%RH				
		DC	1kHz	10kHz	30kHz	100kHz
1 mA	800	20	55	75	75	150
10mA	80	20	26	26	26	26
20mA	40	20	26	26	26	26
50mA	16	20	23	23	23	23
100mA	8	20	24	24	24	24
200mA	4	20	26	26	26	26
500mA	1.6	21	27	27	27	28
1A	0.8	21	27	28	28	31
2A	0.4	21	27	30	30	48
5A	0.16	21	31	32	40	71
10A	0.08	26	37	60	61	92
20A	0.04	26	43	52	70	113
50A	0.016	32	55	80	81	144
100A	0.008	35	65	90	98	174

表 3 A40B 交直流转换差

分流器标称电流	交直流转换差(ppm) ^{[1][2][3]}			
	1kHz	10kHz	30kHz	100kHz
1mA	53	72	72	150
10mA	20	20	20	40
20mA	18	18	19	30
50mA	13	13	14	16
100mA	14	15	17	27
200mA	17	17	18	28
500mA	17	17	17	21
1A	17	19	19	23
2A	17	22	22	44
5A	23	24	34	69
10A	28	55	58	98
20A	37	51	80	150
50A	47	75	79	180
100A	60	90	120	300

[1] 指标标明偏离直流的最大平坦度，包括交直流转换误差，以及测量不确定度，95%的置信度（K=2）的条件。

[2] 包括交直流转换误差一年的稳定性

[3] 1mA 分流器的指标是在 $T_{Cal} \pm 1^{\circ}C$ 的条件下给出。

四. A40B 应用举例—校准多功能校准器的交流电流功能

用 A40B 与高精度数字多用表配合使用，测量交直流电流，可以大大提高测量电流的准确度，而且使用非常方便。特别是与测量交流电压准确度比较高的数字多用表配合使用，例如 Fluke 8508A 和 Wavetek 1281 八位半数字多用表，可以解决目前许多电流测量校准的难题。

目前流行的多产品校准器都是由福禄克公司生产的，型号有 5520A, 5500A 和 9100。它们的电流功能都具有很高的准确度。准确的校准这些校准器是许多校准实验室的重要工作。使用 Fluke 8508A 八位半数字多用表基本可以完成对这些校准器的直流电压、直流电流、和电阻等功能的校准。对交流电压和交流电流功能尚不能满足校准时的测量不确定度的要求。表 4 列出了 5520A, 5500A 和 9100 多产品校准器交流电流在各量程校准点的指标和 8508A 在这些点的指标。

表 4 多产品校准器交流电流各量程校准点和 8508A 的测量不确定度
(%, 45Hz—1kHz)

型号 量程 45Hz-1kHz	5520A	5500A	9100	8508A 交流电流年 指标	8508A+A40B 交流电流年 指标
300 μ A	0.16	0.21	0.17	0.134	0.022
300 mA	0.046	0.1	0.09	0.15	0.0154
2 A	0.065	0.115	0.124	0.07	0.0132
20 A	0.175	0.35/10A	0.234	0.1	0.0136

由表 4 可以看出，8508A 的交流电流测量不确定度不能满足校准这些多产品校准器的要求。其中，校准器交流电流量程的许多校准点仅位于 8508A 交流电流量程的 15%，也加大了测量不确定度。

如果使用 8508A 与 A40B 配合使用，就可以大大减少交流电流的测量不确定度。改善的幅度达到 6-10 倍，完全可以满足校准 5520A, 5500A 和 9100 多产品校准器的要求。

图 5 显示了用 8508A 和 A40B 配合使用校准 5520A 的情况，使用 8508A 的交流电压功能，根据电流值选择合适的电压量程，将分流器电阻值输入到 8508A 的存储器（ $\div z$ ）中，使能 $\div z$ 运算功能，连接电流源、分流器和 8508A 数字表，接通电流后，电流值就会显示在数字多用表上。



图 5 用 A40B 校准 5520A 校准器

目前，高精度多功能校准器交流电流的溯源校准还比较困难。许多校准实验室需要根据多年的校准数据挑选性能稳定的分流器，再应用上级校准实验室提供的修正值，用修正值的稳定性来校准高精度多功能校准器的交流电流功能。这样做，既需要长时间的校准数据，又要求对修正值稳定性、测量不确定度作严格地分析，也比较费时。如果使用交直流转换仪器与 A40B 配合使用，可以准确地校准 5720A 或 5700A 等高精度多功能校准器的交流电流功能，实现又快又好的校准。

由于目前交流电流测量仪器的误差主要来源都是分流器，如果配用 A40B 高精度分流器，都可以大大提高测量准确度。譬如，用 8846A 六位半数字多用表与 A40B 配合使用，8846A 的交流电流测量准确度就胜过了目前所有八位半数字多用表的交流电流的测量准确度。

五. 结论

A40B 是一套新式的高精度分流器。可以用于直接测量交直流电流，测量范围从 0.1 mA 到 100A。由于 A40B 电阻值非常准确，稳定，具有出色的低自加热功率系数和低附加相移，可以用来直接测量交直流电流，非常适合在精密电流测量场合应用，以及在交流功率测量和电能质量分析中应用。

福禄克，助您与时代同步！

美国福禄克公司

中文网址：www.fluke.com.cn

英文网址：www.fluke.com

北京办事处

地址：北京建国门外大街22号赛特大厦2301室 邮编：100004

电话：(010)65123435 传真：(010)65123437

上海办事处

地址：上海市长宁区临虹路280弄6号楼3楼 邮编：200335

电话：(021)61286200 传真：(021)61286222

广州办事处

地址：广州体育西路109号, 高盛大厦15楼B1座 邮编：510620

电话：(020)38795800 传真：(020)38791137

成都办事处

地址：成都市人民南路四段19号威斯顿联邦大厦17楼K-N座 邮编：610041

电话：(028)85268810 传真：(028)85268988

西安办事处

地址：西安市二环南路100号，金叶现代之窗1010室 邮编：710065

电话：(029)88376090 传真：(029)88376190

沈阳联络处

地址：沈阳市和平区和平北大街69号总统大厦C座1301室 邮编：110003

电话：(024)23286038 传真：(024)22813667

重庆联络处

地址：重庆市渝中区中山三路131号希尔顿商务楼805室 邮编：400015

电话：(023)89061910 传真：(023)89061909

深圳联络处

地址：深圳市福田区深南中路华能大厦1101室 邮编：518031

电话：(0755)83680050 传真：(0755)83680040

武汉联络处

地址：中国武汉建设大道518号招银大厦1515室 邮编：430022

电话：(027)85743386 传真：(027)85743561

北京维修站

地址：北京建国门外大街22号赛特大厦401室 邮编：100004

电话：(010)65286306 传真：(010)65286307

全国免费服务热线：400 810 343

有关产品说明及技术指标以英文资料为准。如有更改，恕不另行通知。