

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005367

精密交流数字电桥准确度分析

刘霞美 吴爱华 乔玉娥 丁立强 范雅洁
(中国电子科技集团公司第十三研究所 石家庄 050051)

摘要: 针对精密交流数字电桥计量与使用过程中,行业内普遍采用基本准确度作为仪器最终技术指标的现状,研究了精密交流数字电桥原理及影响测量准确度的因素。详细阐述了数字测量仪最大允许误差的计算方法,以E4980A为典型型号给出了电容参数“逐点计算方案”,相同测量点的计算结果较传统的计算方法最大相差 $\pm 11.95\%$,结果表明所提计算方法能够作为交流数字电桥评价性能指标的准确手段,更好地指导用户正确使用每一个测量点的技术指标,同时避免造成计量人员的误判,具有更高的实用性。

关键词: 精密交流数字电桥;基本准确度;最大允许误差

中图分类号: TB971 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 202+.2

Accuracy analysis of precise digital measuring instrument

Liu Xiamei Wu Aihua Qiao Yu'e Ding Liqiang Fan Yajie

(The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: In view of the current situation that the basic accuracy is generally adopted as the final technical indicator of the instrument in the process of measuring and using precise digital measuring instrument, the paper has analysed the principle of precise digital measuring instrument and the factors that affect the measurement accuracy, elaborated the calculation method of the maximum permissible errors of the digital measuring instrument in detail, and proposed the “point-by-point calculation scheme” of capacitance parameter by taking E4980A as a typical model, and finally found the calculation result of the same measurement point is $\pm 11.95\%$ different from the traditional calculation method. The result shows that the calculation method in this article can be used as an accurate method for evaluating performance indicators of AC digital bridges, which can better guide users to correctly use the technical indicators of each measurement point. At the same time, it can also avoid the misjudgment of measurement personnel and has a higher practicability.

Keywords: precise digital measuring instrument; basic accuracy; maximum permissible errors

0 引言

交流数字电桥是以微处理器控制的数字式测量各种无源阻抗参数的仪器,测试速度快,读数方便,广泛应用于计量测试、科研单位测量各类电子元器件的阻抗特性和筛选、元器件生产及维修制作等领域^[1],特别在军工科研生产单位,此类仪器被越来越多地使用,测量元器件准确与否将直接影响到工艺实验参数提取、失效原因分析以及对新型器件研发改进提供数据的参考,其重要性不可忽视。但此类仪器因其型号繁多,进口与国产在操作程序上有各自的规定,对仪器说明书的理解也有所差异^[2]。目前行业内计量站以及各个仪器的用户单位都是采用基本准确度作为判定交流数字电桥准确度的指标。而基本准确度,是指在某个量程和频率范围内,准确度最高的,此范围是该仪器的最佳

范围,并不是所有量程和频率都能达到这个指标,尤其是在极值点。例如在高频半导体器件生产过程中,需要精确知道样片平板电容或边缘电容值的准确度,这些参数一般都是1 MHz下1~100 pF,而对于高频下的小电容参数通常交流数字电桥的实际测量准确度会远远差于基本准确度,比如某型号测量仪在1 MHz下1 pF的基本准确度指标为 $\pm 0.10\%$,通过详细计算仪器在该点的技术指标为 $\pm 0.19\%$,两者相差2倍,此时测量该电容的平板电容使用基本准确度作为测量结果的测量不确定度时,会严重高估仪器的测量能力,测量数据的准确程度难以保障,从而影响对整个器件性能判断。因此,需要根据仪器本身的出厂性能指标,对高精度测量仪的准确度进行详细分析。

目前,有关交流数字电桥的测量准确度的报道包括,

收稿日期:2020-11-16

2010年,焦玉民等^[3]只是通过对TH2811测量仪校准,分析了校准的不确定度;2012年,徐晓光等^[4]也就数字交流数字电桥校准装置进行了不确定度的分析和探讨,但两者都只是对校准不确定度的分析,其中并没有提及对交流数字电桥准确度的分析;在多数文献中,只见到对测量不确定度以及测量原理等的分析及报道,并没有对精密交流数字电桥进行详细的测量准确度指标计算、在涉及仪器测量准确度时均采用基本准确度作为仪器的准确度指标,这样很容易对仪器造成误判和高估仪器测量能力,因此,对精密交流数字电桥准确度进行详细的分析研究十分重要。

对于测量准确度的表征,在计量领域通常用准确度等级或最大允许误差来定量的表示,根据精密交流数字电桥的性能,本文将采用最大允许误差的形式进行描述^[5]。

1 精密交流数字电桥的原理

交流数字电桥是目前最常用的测量电容、电感、电阻的测量工具。有些交流数字电桥基本原理与交流电桥一样,它把计算机技术、数字电路技术、数据采集技术应用到传统交流电桥上,完成了自动平衡、自动补偿、自动计算、数字显示等功能。也有些交流数字电桥则利用电压矢量比例法,分别测量阻抗的实部与虚部,通过计算,直接显示阻抗的主量和辅量及其各种组合^[6-7]。在很多应用领域传统的交流电桥已经被交流数字电桥所取代,交流数字电桥也称为交流数字电桥,目前交流数字电桥已基本取代了传统手动调节的交流电桥,其优点在于其测量性能稳定可靠,无需进行反复、复杂的手动平衡,测量频率范围宽^[8]。

本文所研究的精密交流数字电桥的工作原理与传统的交流电桥原理不同^[9],它是以内附的标准为基础,采用等电流自动平衡原理,测量被测元件与内附标准上矢量电压比例,通过一定的相位变换和计算获得被测元件的量值。仪器由程控正弦波电源、放大器、相敏检波器、积分器、转换开关、微处理器、显示器几部分组成,如图1所示。正弦波电源也就是交流源一般为有一定驱动能力的交流信号发生装置,其频率和电压在一定范围可调,通常将交流源、输入接口部分、比较电路部分统称为前端电路。现在较通用的输入接口为五端或四端对形式,可以通过外部测量线缆转换为两端、三端、四端^[10-14]。

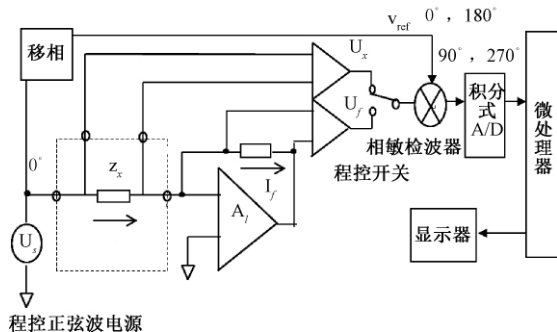


图1 矢量比例法交流数字电桥测量原理

根据仪器原理,由数字测量仪内部元件特性的不理想,设计不完善,以及测试的接口、线缆转换、线缆长度、测量时间、测试信号电压等,都会造成测量误差。例如两线测量电容时,接触电阻会增大损耗测量结果,四线测量电容时,接触电阻对幅值和相位测量产生影响,线缆长度会带来相位移动,使电桥不平衡等,这些都会影响交流数字测量的测量准确度^[14]。下面对影响测量准确度的各种因素进行分析。

2 影响精密交流数字电桥准确度的因素

对于精密交流数字电桥的准确度,这里用最大允许误差形式表示,通常采用一个比较复杂的数学公式来描述,如式(1)所示。

$$\gamma_{\lim} = \pm a[1 + K_1(X) + K_2(V) + K_3(f) + K_4(D, Q)] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\gamma_{\lim}$ 为最大允许误差; a 为准确度级别指数; $K_1(X)$ 为与测量读数和量程有关的函数; $K_2(V)$ 为与测量电压有关的函数; $K_3(f)$ 为与测量频率有关的函数; $K_4(D, Q)$ 为与损耗因数 D 或品质因数 Q 有关的函数。

通过式(1)可以反映出的影响量有:基本准确度,量程,测试频率,测试电压、正交分量,测量时间。对于量程的影响,交流数字电桥的量程范围比传统交流电桥宽,都超出了实物阻抗标准元件的量值范围,说明书中的量程范围都是计算出来的理论结果,实际上测量电路的分布参数、漂移和引线的自感、互感、接触电阻等都会引入较大的误差,被测阻抗值太大或者是太小,最大允许误差都会增加,也就是此时的准确度较低,它们的关系如图2所示。对于频率的影响,在低频或高频时,同样交流数字电桥准确度较低^[15-16]。

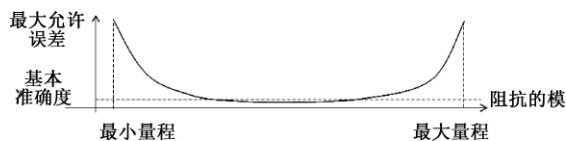


图2 量程与最大允许误差的关系

对于测量时间,交流数字电桥通常是用自带软件的方法对测量数据进行处理,来提高测量准确度,常用的方法是计算平均值,当获取的测量结果越多,平均值越接近于真值,也就是测量时间长,准确度相应的就提高了,测量时间短,平均的次数少,准确度就偏低。

3 交流数字电桥 E4980A 的最大允许误差计算

在精密交流数字电桥 E4980A 的说明书中规定,相对测量准确度包括稳定性、温度系数、线性、重复性和校准内插误差。此时相对测量误差的计算公式如式(2)所示。

$$Ae = \pm [Ab + Zs / |Zm| \times 100 + Yo \times |Zm| \times 100] \times Kt \quad (2)$$

式中: Zm 为被测件的阻抗; Ab 为基本准确度; Zs 为短路偏

置; Y_o 为开路偏置; K_t 为温度系数;依据式(2),对各个影响测量仪准确度的影响量进行分析计算,最终得到准确的数字测量仪最大允许误差。

1)基本准确度

交流数字电桥在出厂时会根据测量时间模式、测试信号电压的不同,规定其基本准确度指标,如表1所示,基本

准确度指标是在该仪器的最佳范围,最大允许误差最小的技术指标。在计算交流数字电桥的最大允许误差时,首先要根据测量时间、测试信号电压以及测试频率选择相应的基本准确度,例如,测量电容功能1 kHz下的1 000 pF点,测量时间选择 LONG,测试信号电压为1 V,从表1中可以得出该测量点的最大允许误差为 $\pm 0.05\%$ 。

表1 基本准确度(测量时间模式=MED,LONG)

测试频率/Hz	测试信号电压 V_s				
	5~30 V	30 mV~0.3 V	0.3~1 V	1~10 V	10~20 V
20~100	$\pm 0.25\% \times (30 \text{ mV}/V_s)$	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.10\%$	$\pm 0.15\%$	$\pm 0.15\%$
100~1 M	$\pm 0.1\% \times (30 \text{ mV}/V_s)$	$\pm 0.10\%$	$\pm 0.05\%$	$\pm 0.10\%$	$\pm 0.15\%$
1 M~2 M	$\pm 0.2\% \times (30 \text{ mV}/V_s)$	$\pm 0.20\%$	$\pm 0.10\%$	$\pm 0.20\%$	$\pm 0.30\%$

2)被测件阻抗

被测件的阻抗根据电容、电感、电阻的阻抗计算公式,如式(3)、(4)计算得到被测点的阻抗值。计算测量电容功能1 kHz下的1 000 pF点的阻抗则根据式(3),计算结果约为159.1 k Ω 。

$$Z_c = \frac{1}{2\pi f c} \tag{3}$$

$$Z_L = 2\pi f L \tag{4}$$

式中: Z_c 表示电容的阻抗; Z_L 为电感的阻抗; f 为测试频率。

3)短路偏置

在精密交流数字电桥 E4980A 说明书中根据测量点的阻抗值与1.08 Ω 进行比较,分别选择相应的计算公式,对于电容功能1 kHz下的1 000 pF点,由上述计算得知阻抗大于1.08 Ω ,故选择计算方法如表2所示,测试时间为LONG,计算该点的 $Z_s=1.68 \text{ m}\Omega$ 。

表2 短路偏置(被测件阻抗>1.08 Ω)

测量时间模式	测试频率 20 Hz~2 MHz
SHORT	$2.5 \text{ m}\Omega \times \left(1 + \frac{0.4}{V_s}\right) \times \left(1 + \sqrt{\frac{1000}{f}}\right)$
MED,LONG	$0.6 \text{ m}\Omega \times \left(1 + \frac{0.4}{V_s}\right) \times \left(1 + \sqrt{\frac{1000}{f}}\right)$

4)开路偏置

在精密交流数字电桥 E4980A 说明书中根据测试信号电压与2 V 进行比较,分别选择相应的计算公式,对于电容功能1 kHz下的1 000 pF点,通常选择测试电压为1 V,故选择计算方法如表3所示,测试时间为LONG,计算该点的 $Y_o=1.68 \text{ nS}$ 。

5)温度系数

交流数字电桥的内附标准器一般都采用温度系数小的交流标准电阻或有控温装置的密封标准电容,能在较宽

表3 开路偏置(测试信号电压 $\leq 2 \text{ V}$)

测量时间模式	测试频率 20 Hz~100 kHz
SHORT	$2 \text{ nS} \times \left(1 + \frac{0.1}{V_s}\right) \times \left(1 + \sqrt{\frac{100}{f}}\right)$
MED,LONG	$0.5 \text{ nS} \times \left(1 + \frac{0.1}{V_s}\right) \times \left(1 + \sqrt{\frac{100}{f}}\right)$
测量时间模式	测试频率 100 kHz~1 MHz
SHORT	$20 \text{ nS} \times \left(1 + \frac{0.1}{V_s}\right)$
MED,LONG	$5 \text{ nS} \times \left(1 + \frac{0.1}{V_s}\right)$
测量时间模式	测试频率 1~2 MHz
SHORT	$40 \text{ nS} \times \left(1 + \frac{0.1}{V_s}\right)$
MED,LONG	$10 \text{ nS} \times \left(1 + \frac{0.1}{V_s}\right)$

松的环境内使用,一般使用条件温度为18 $^{\circ}\text{C}$ ~28 $^{\circ}\text{C}$,计量时根据规程要求比较严格,规定18 $^{\circ}\text{C}$ ~22 $^{\circ}\text{C}$ 。说明书中给出了温度系数 K_t ,如表4所示,对于精密交流数字电桥,使用时通常在常规温度下,即 $K_t=1$ 。

表4 开路偏置(测试信号电压 $\leq 2 \text{ V}$)

温度/ $^{\circ}\text{C}$	K_t
0~18	4
18~28	1
28~55	4

由上述分析,测量电容功能1 kHz下的1 000 pF点,测量时间选择 LONG,测试信号电压为1 V,测试线缆0 m,根据式(4)计算此点最大允许误差为 $\pm 0.062\%$,根据该方法对精密交流数字电桥 E4980A 其他点进行计算,在 excel 中编入计算公式,则会使得计算更为简单,且不易出

错,部分电容功能计算过程及结果如表5所示(温度系数均为1)。表格中阴影部分都为自动公式计算部分,如F7中公式为“ $=1/(2*PI()*B7*D7)$ ”,G7为“ $=0.6*(1+0.4/1)*(1+SQRT(1000/B7))$ ”,H7为“ $=0.5*(1+0.1/1)*(1+SQRT(100/B7))$ ”最后准确度指标J7“ $=(E7+(G7*0.001)/F7*100+(H7*1.0E-9)*F7*100)*I7$ ”,特别注意的是在计算短路偏置和开路偏置

时,要根据被测件的阻抗值、频率、以及偏置电压值来确定不同算法,进而再进行公式计算。另外基本准确度指标判定时,若被测点阻抗 $<30\ \Omega$ 与 $>9.2\ k\Omega$ 时,需要添加相应的百分比,而测试时电缆的延伸也会对基本准确度、短路偏置、开路偏置产生影响,计算时也要添加其相应的影响量。电感、电阻功能的测量点算法同电容功能一样。

表5 部分电容功能最大允许误差计算过程

频率/Hz	测量点/pF	基本准确度 (查表)/%	被测件的 阻抗/ Ω	短路偏置/m Ω	开路偏置/nS	最大允许 误差/%
1 k	1	± 0.05	1.59×10^8	1.68	0.72	± 12
1 k	1 000	± 0.05	1.59×10^5	1.68	0.72	± 0.062
100 k	1	± 0.10	1.59×10^6	0.92	0.57	± 0.19
100 k	1 000	± 0.05	1.59×10^3	0.92	0.57	± 0.050
1 M	1	± 0.10	1.59×10^5	0.87	5.50	± 0.19
1 M	1 000	± 0.05	1.59×10^2	0.87	5.50	± 0.051

从上述计算结果可以看到1 pF(1 kHz)点的最大允许误差为 $\pm 12\%$,而基本准确度指标为 $\pm 0.05\%$,两者相差很多,说明此时该仪器在此点的能力远远差于基本准确度,若此时依旧按照基本准确度来判定该仪器的性能,就会严重高估了该仪器在此测量点的能力。对于1 pF(1 MHz)点的计算最大允许误差为 $\pm 0.19\%$,基本准确度为 $\pm 0.1\%$,相差2倍的关系。当前行业内在半导体器件的生产过程中大多都是对小电容的测量,从仪器原理以及性能分析,也能够得出在低频/高频或最小量程/最大量程点的最大允许误差与基本准确度偏差较大,所以对于这些极值点的最大允许误差确定,本文给出一个合理建议,必须逐点计算,其他测量点可采用基本准确度指标。

4 结 论

本文对精密交流数字电桥的准确度进行了研究分析,从仪器原理出发研究分析影响测量准确度的影响量,针对这些影响因素对测量仪较为复杂的电容功能中每个测量点的最大允许误差进行了计算,更准确地对交流数字电桥进行了准确度的分析,得到准确的性能指标参数,避免产生不必要的测量失误,同时确保被测参数量值的准确可靠,提高了高频半导体器件生产过程中,对样片平板电容或边缘电容值的准确度的判定,保证了对整个器件性能的判断,提高了测量交流阻抗参数测量能力。同时对于计量人员来说,也避免了对仪器产生误判。

参考文献

- [1] 吴勇,汪树青.LCR测量仪校准方法研究[J].电子世界,2020(23):11-12.
- [2] 赵承军.LCR测量仪校准的探讨[J].计量与测试技术,2014,41(1):36-37.
- [3] 焦玉民,许兴明.数字LCR测量仪校准及测量不确定度评定[C].2010国防计量与测试学术交流会,2010:

412-415.

- [4] 徐晓光,胥蓓.数字LCR测量仪校准装置不确定度分析[J].计量与测试技术,2012,39(11):58-60.
- [5] 丁红英,于贺军,李建英.气压传感器示值误差的测量不确定度评定[J].电子测量技术,2020,43(5):63-66.
- [6] 陆祖良,黄璐,杨雁.可动屏蔽型计算电容复现电容单位的方法研究[J].计量学报,2014,35(6):521-527.
- [7] 孙谊,张晓冬.基于复阻抗测量的碳基超级电容器建模研究[J].电子测量与仪器学报,2012,26(11):977-981.
- [8] 侯亚宾,卜雄洙,孙斌.微小电容检测系统的设计及应用[J].国外电子测量技术,2015,34(12):87-90.
- [9] 谷静,杨雁,陆青.基于数字比例技术的高精度交流电桥研究[J].仪器仪表学报,2020,41(7):29-37.
- [10] 杨孟涛,金红伟,蔡苇.基于Agilent E4980A的LCR自动测试系统设计[J].重庆科技学院学报,2015,17(4):97-100.
- [11] CALLEGARO L, DELIA V, TRINCERA B. Realization of the farad from the dc quantum hall effect with digitally assisted impedance bridges [J]. Metrologia, 2010, 47(4):464.
- [12] NISSILA J, OJASALO K, KAMPIK M, et al. A precise two-channel digitally synthesized AC voltage source for impedance metrology [C]. 29th Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 2014: 768-769.
- [13] 吴晓媛,杨雁,贺青,等.基于保角变换的微小电容标准建模与设计[J].仪器仪表学报,2019,40(9):116-123.
- [14] 吴凌燕.基于Multisim11的串联谐振电路特性研究[J].电子测量技术,2011,30(8):84-86.
- [15] 宋欣欣,钱慧.一种基于LPTV的开关电容模拟信息转换器设计[J].电子测量与仪器学报,2020,34(5):165-173.
- [16] 刘宇,刘文忠,武春爱,等.数字压力计测量结果不确定度评定方法研究[J].国外电子测量技术,2019,38(8):134-136.

作者简介

刘霞美,本科,技术员,主要研究方向为电磁学计量。
E-mail:liuxiamei89@126.com