

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.04.08

基于双源自动平衡电桥的高精度电感测量装置设计

李小舟, 王逸洲, 吴康, 金海彬

(北京东方计量测试研究所, 北京 100086)

摘要: 为实现电感的高精度、高效率、宽范围测量, 搭建了一套低失真度、低噪声交流自动平衡电桥装置。该装置能够自动调平电桥并测试电桥各部分电压比例, 从而计算得到电感值。利用数字相敏检波算法(DPSD)和拟牛顿迭代法可准确地完成电桥自动调平过程, 采用高速数据采集卡组成同步采样系统提高电压比例测量部分的准确度, 拓宽测量范围。在 100, 1000, 10000 Hz 等频率下, 对 $10\ \mu\text{H} \sim 10\ \text{H}$ 范围内的电感进行测量。实验证明, 该装置在一定时间内测量相对不确定度为 5×10^{-6} , 准确度指标与阻抗分析仪对比, 一致性好。

关键词: 交流自动平衡电桥; 电感测量; 数字相敏检波; 数据采集卡

中图分类号: TB971; TM 934.41

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)04-0031-05

Design of High Precision Inductance Measurement Device Based on Dual-source Automatic Balanced Bridge

LI Xiaozhou, WANG Yizhou, WU Kang, JIN Haibin

(Beijing Oriental Institute of Measurement and Test, Beijing 100086, China)

Abstract: A high precision inductance measuring device based on a dual-source automatic balanced bridge is built in order to achieve high precision, high efficiency and wide range inductance measurement. The device automatically adjusts the bridge to balance and measures the ratio of voltage across the bridge so as to calculate the inductance. Digital phase sensitive detection (DPSD) and parsimonious Newtonian iteration are applied to ensure that the balancing point can be found efficiently and accurately. A sampling system based on high-speed digitizers can increase the precision and range of measurement. At typical frequencies including 100, 1000 and 10000 Hz, inductances in the range of $10\ \mu\text{H} \sim 10\ \text{H}$ were measured by this device. The device can achieve a measurement stability of 5×10^{-6} , and its accuracy is consistent with Impedance Analyzer Agilent E4980, which is experimentally verified.

Key words: automatic balanced AC bridge; inductance measurement; DPSD; digitizer

0 引言

交流阻抗测量技术广泛应用于传统计量和传感器领域, 近年来, 随着技术的发展, 生物、农业等领域也开始提出对高精度交流阻抗测量方面的需求^[1-4], 因此, 阻抗的高精度测量与校准日趋重要。目前, 阻抗校准通常采用同轴电桥的方式, 具有良好的准确性, 但在装置搭建上操作复杂, 测量带宽较窄(通常在 1 kHz)。传统的阻抗分析仪虽操作方便, 测量带宽较宽, 但不确定度等参数较差, 不能将其作为高精度电感测量装置使用^[5-6]。

为解决传统电感测量装置测量范围窄、操作复杂、测量精度低等不足, 设计了一种基于双源自动平衡电桥的高精度电感测量装置。平衡电桥是整套设备的基础, 可以保证被测电感与标准阻抗流经相同的电流。基于数字相敏检波原理和拟牛顿迭代法的电桥自动平衡算法可自动将电桥调至平衡, 有效提高了测量精度

和测量效率^[7-9]。基于高速数据采集卡的采样系统能够在电桥平衡后对标准阻抗和被测电感两端的电压进行测试, 采样系统具有较高的采样频率和分辨力, 实现了跨多个数量级的宽频电感测量^[10-12]。

通过介绍电桥自动平衡的原理与实现方法, 对采样系统的搭建与数据处理算法进行了研究, 经仿真分析和实验验证, 证明了装置在不同频率和电感下都能够满足高精度电感测量的需要。

1 系统构成与原理

1.1 系统构成

常用的阻抗测量方法包括电桥法、I-V 测量法、RF I-V 法等。如图 1 所示, 电桥法通过调整阻抗 $Z_1 \sim Z_3$, 使电流计 D 的电流为 0, 此时, Z_x 与 Z_1 所在支路和 Z_3 与 Z_2 所在支路对电压的分压比是相通的, 然后通过公式 $Z_x = Z_1 \times Z_3 \div Z_2$ 来计算未知阻抗, 此方法比较

繁琐,测试效率低且需要反复调整。如图 2 所示, I-V 测量法利用同一个源驱动被测阻抗和标准阻抗, 保证两阻抗的电流相等, 分别测试两阻抗两端的电压, 通过公式 $Z_x = V_1 \times Z \div V_2$ 来计算未知阻抗, 此方法的缺陷是由于被测阻抗和标准阻抗连接处的电位不为零, 经电压测量装置的输入阻抗产生泄漏电流, 破坏了两个阻抗的电流相等关系, 会造成测量误差。RF I-V 法在 I-V 法的基础上增加了匹配高频同轴的特性阻抗回路和高频同轴连接器, 能够在高频下进行测量, 但也因此导致测试带宽受到限制。

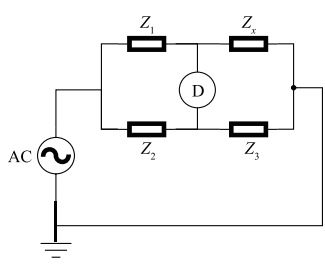


图 1 电桥法

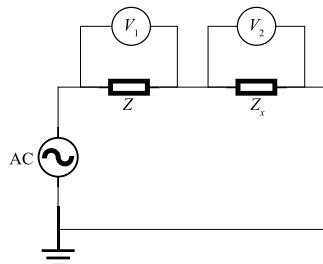


图 2 I-V 法

为解决以上常规测量方法所存在的问题,设计了一种基于双源自动平衡电桥的高精度电感测量装置。该装置主要分为平衡电桥和电压比例测量两部分,其系统结构见图 3 所示,先通过程序调节信号源输出信号的幅值与相位,使电桥自动平衡,免去了传统电桥法中繁琐的电桥调整过程。电桥平衡后,被测电感与标准阻抗电流相同,避免了传统 I-V 法中泄露电流带来的误差,再通过两块差分采集卡来采集被测电感和标准阻抗两端电压,经计算得到被测电感的值。

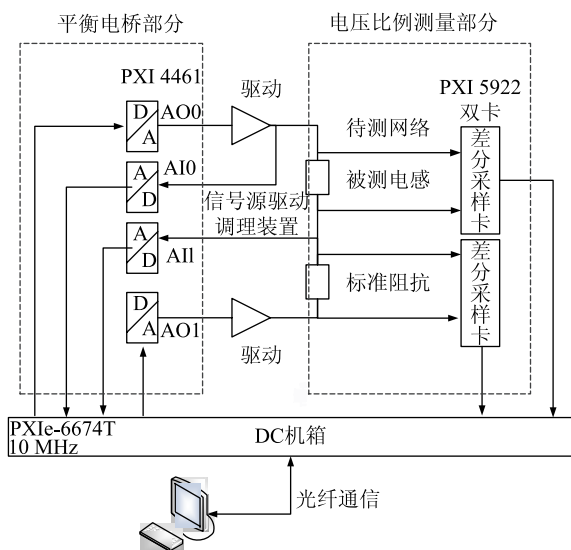


图 3 系统结构示意图

平衡电桥部分以动态信号采集卡(DSA)PXI-4461 为核心,包括输入接口两组,用于判断电桥平衡;输出信号两组,用于驱动被测电感和标准阻抗。如图 3 所示,A00 为参考信号,A01 为平衡电桥的调节信号,两路信号通过信号源驱动调理装置缓冲后,分别驱动被测电感和标准阻抗,完成交流电桥连接。测试前,先对电桥进行调零,利用 PXI-4461 板卡上的两个 24 bit 高精度模拟输入通道 AI0 和 AI1 分别对电桥中的参考电压源和电桥平衡点电压进行采样,通过数字相敏检波(DPSD)算法测量平衡点电压,检测电桥平衡状态。同时,计算机根据测量数据自动调节该电桥测量系统中的 AO1 电压信号,完成电桥调平衡过程。电压比例测量部分,采用分辨力为 24 bit 的两张差分采集卡来对上、下桥臂电压进行采样,每块采集卡有两个通道,进行高精度差分采样的同时还可以消除共模误差,该部分可准确测量被测电感和标准阻抗间的阻抗比。

将整个系统装载在直流供电机箱中,通过直流电源供电和光隔离通信,最大限度地减小 CPU 动态负载和电网工频噪声对测量系统的影响,同时整个交流电桥系统的数字时钟会同步到高精度时钟卡上,以保证信号源和采样系统物理同步,减小由频谱泄漏引起的测量误差。

1.2 测量原理

测量时,先将平衡电桥调零,电桥的简化原理如图 4 所示。

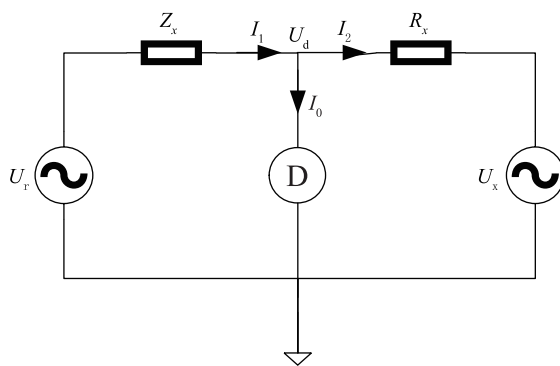


图 4 电桥简化分析电路

由基尔霍夫电流定理(KCL)可得

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

式中: $\dot{I}$ 为通过被测阻抗的电流; $\dot{I}_2$ 为通过标准电阻电流; $\dot{I}_0$ 为泄漏电流。

DPSD 算法可测量到微伏量级的电压,当电桥完成自动调平,检零仪所带来的泄漏电流 $\dot{I}_0$ 可忽略。电桥调零后,利用差分采集卡测得待测电感和标准阻抗两端的

电压分别为 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ ，忽略标准电阻的等效电容，此时

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{Z_x}{R_x} = \frac{R_x + j \cdot \omega \cdot L_s}{R_x} \quad (2)$$

式中： Z_x 为被测阻抗； R_x 为标准电阻； $j \cdot \omega \cdot L_s$ 为被测阻抗的感性分量。

被测电感的等效电感为

$$L_s = \frac{R_x \cdot A \cdot \sin \theta}{2\pi f} \quad (3)$$

式中： A 为被测阻抗两端电压幅值； θ 为被测阻抗两端电压相角； f 为被测阻抗的信号频率。

2 双源自动平衡电桥及算法

2.1 自动平衡算法

基于 DPSD 和拟牛顿迭代法的自动平衡算法是准确测量电感值的关键^[13-15]。DPSD 信号处理方法，常用作将特定频率的信号从固定频率载波中解调出来，用于测量微伏量级的交流小信号，表达式为

$$\begin{aligned} V_{\text{output}} &= V_{\text{in}} \cos(\omega t) \times V_{\text{ref}} \cos(\omega t + \theta) \\ &= \frac{V_{\text{in}} V_{\text{ref}}}{2} \cos \theta + \frac{V_{\text{in}} V_{\text{ref}}}{2} \cos(2\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

如图 5 所示，将信号源 A00 生成的参考信号通过希尔伯特变换相移 90° ，原信号为 $\dot{U}_{\text{ref1}}$ ，移相后的信号为 $\dot{U}_{\text{ref2}}$ ，将两路信号分别与采样得到的电压误差信号 $\dot{U}_d$ 相乘，并通过积分来消除高频项。此方法以 $\dot{U}_{\text{ref1}}$ 和 $\dot{U}_{\text{ref2}}$ 组成的一组基向量作为参考，对 $\dot{U}_d$ 进行分解，两分量分别记为 I 和 Q ，再通过坐标转换，将 $\dot{U}_d$ 的基向量转换到原向量空间，即可计算出 $\dot{U}_d$ 的幅值和相位。

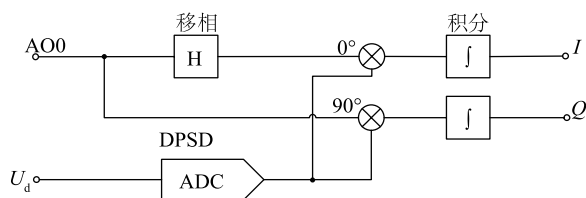


图 5 DPSD 算法

当电桥平衡时，泄漏电流 $\dot{I}_0$ 几乎为零，根据式 (2) 可得，电桥的平衡条件为

$$\dot{U}_1 R_x - \dot{U}_2 Z_x = 0 \quad (5)$$

当电桥达到平衡之前，指零仪可检测待测电感和标准电阻连接处的电压误差信号 $\dot{U}_d$ ，并根据 $\dot{U}_d$ 调节信号源的通道 2 输出的调制信号 $\dot{U}_x$ 的值，又由于 $\dot{U}_x$ 与 $\dot{U}_2$ 成比例，因此桥路误差电平 $\dot{U}_d$ 与 $\dot{U}_x$ 成线性关系，将电桥看做一个输入为 $\dot{U}_x$ ，输出为 $\dot{U}_d$ 的系统。

通过调节信号源输出的 $\dot{U}_x$ 的值，来使 $\dot{U}_d$ 逐渐趋向于零，使电桥达到平衡。

电桥的输入输出关系 $\dot{U}_d = F(\dot{U}_x)$ 可表示为

$$\dot{U}_d = k_1 \dot{U}_x + k_2 \quad (6)$$

式中： $\dot{U}_d$ 为待测电感和标准电阻连接处的电压误差信号， k_1 、 k_2 为待定系数。

根据式 (6)，在平衡电桥中，正割法的原理可表示为

$$\dot{U}_x(k+1) = \dot{U}_x(k) - \frac{\dot{U}_d(k)}{\dot{U}'_d(k)} \quad (7)$$

$$\dot{U}'_d = \frac{\dot{U}_d(k) - \dot{U}_d(k-1)}{\dot{U}_x(k) - \dot{U}_x(k-1)} \quad (8)$$

$$\dot{U}_x(k+1) = \frac{\dot{U}_x(k) - \dot{U}_x(k-1)}{\dot{U}_d(k) - \dot{U}_d(k-1)} \dot{U}_d(k) \quad (9)$$

式中： $\dot{U}_x(k)$ 、 $\dot{U}_d(k)$ 分别为第 k 次迭代的参考向量和误差向量。

进行迭代时，需要先设定好误差电压的阈值 ε ，每次测得误差电压后与阈值对比，若在阈值以外，需根据 $\dot{U}_d(k)$ 计算出 $\dot{U}_x(k+1)$ ，并将调节信号源设置为 $\dot{U}_x(k+1)$ ，再次进行迭代与测量；反之，若 $\dot{U}_d(k)$ 在阈值以内，则可认为电桥已经达到了平衡，结束迭代。通常来说，平衡算法不可能将桥路设置到理想的平衡状态，一般是在微差条件下工作，因此需要合理地设置阈值 ε ，来保证桥路既能够达到良好的精度，避免算法无法收敛的问题。

2.2 电压测量

对动态信息采样点 PXI-5992 进行数据采样后，要得到交流桥臂电压的幅值和相位，还需要对采样数据进行处理，可以采用 DPSD 算法。

电感量的测量计算与信号的频率相关，由于电感量覆盖了 6 个数量级，测量电压范围跨度大，因此易受到噪声和谐波的影响。DPSD 算法可起到滤波的作用，能将规定频率以外的噪声滤除，准确地保留测试所需要的信号，这种窄带测量的特性符合测试需要。

电压比例计算环节，利用 DPSD 算法进行数据处理的基本过程与自动调平衡环节中的检零过程相同，差别在于在电压比例计算环节中，需要通过软件生成两组幅值、频率相同的正交序列，替代图 5 中的 A00 通道采集数据，由于硬件时钟具有很高的稳定性和精度，正交调制可将有效信号转移到 DC 分量。

$$y(t) = \frac{\omega_0}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} A \cdot \sin(\omega_1 t + \phi) \cdot \sin(\omega_0 t) dt \quad (10)$$

式中： ω_1 为被测信号频率； ω_0 为参考信号频率。

本系统中的信号激励和测量均严格同步到同一个

高稳定性时基, PXI-6674 时钟与同步模块上实现了硬件上的物理时钟同步。时钟年稳定性优于 8×10^{-8} , 对测量算法的误差可以忽略。

假定原始信号的信噪比为 SNR, 有效信号频率为 f_0 , 采样周期数为 N , 采样系统的采样率为 f_s , 则由 DPSD 算法得到的测量结果中, 由噪声引入的相对误差满足

$$e_{\text{DPSD}} = \frac{\text{SNR}}{\sqrt{\frac{f_s}{f_0} \cdot N}} \quad (11)$$

本系统有效信号的 SNR 不低于 -80 dB, 用 200 kS/s 的采样率对 1 kHz 信号进行采样, 周期数为 200, 则由 DPSD 算法引入的误差理论上低于 0.0002%。

2.3 采集卡校准

采用两张差分采集卡对电桥桥臂电压进行测量, 根据式(4)可知, 两张卡的线性度比例误差和相位差会带来系统误差, 因此需通过校准先确定两张卡的线性度和相位差^[19]。

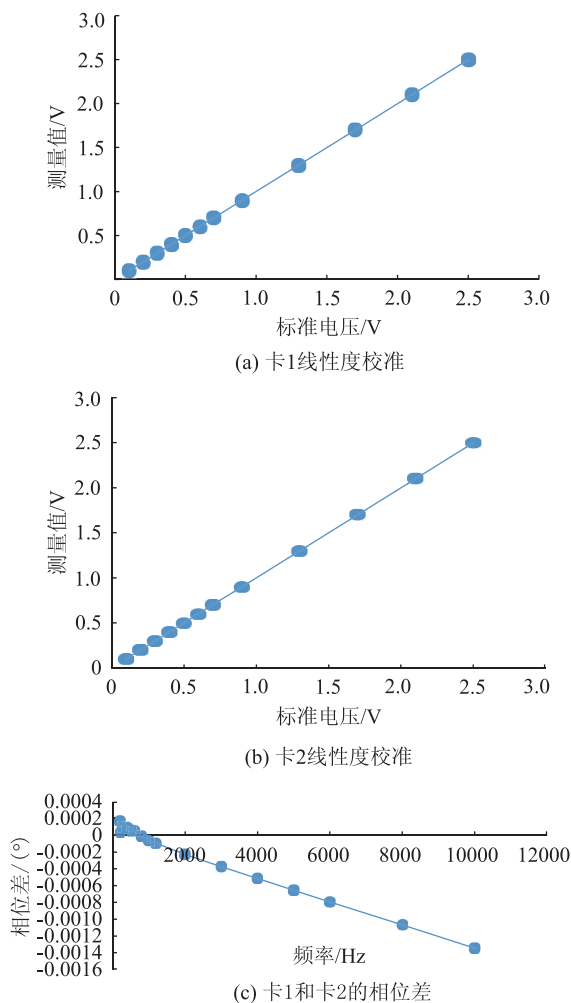


图6 采集卡线性度和相位差校准结果

从图6可看出随着频率的升高, 两块采集卡之间的相位差也会呈线性增大的趋势, 处理数据时, 需要考虑到相位测量的偏差并进行补偿。

频率在 100, 1000, 10000 Hz 下的幅值修正系数 K_c 和相角度 θ_c 修正值如表1所示。

表1 各频率下的幅值和相角修正值

频率/Hz	幅值修正系数 K_c	相角修正值 $\theta_c/(^\circ)$
100	1.000028963	0.00003489
1000	1.00004637	-0.00006354
10000	0.999925784	-0.01346

考虑 PXI-5922 线性度误差和相位差之后, 对电感 L_s 的测量公式应修正为

$$L_s = \frac{R_x \cdot A \cdot K_c \cdot \sin(\theta - \theta_c)}{2\pi f} \quad (12)$$

3 测量结果

如图7所示, 在 1000 Hz 下对一只 10 mH 的电感进行连续 100 min 测量, 得到电感值的 A 类测量相对不确定度为 5×10^{-6} , 符合对整个系统噪声和谐波性能评估的结果。

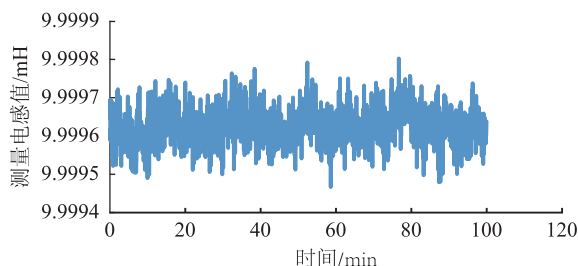


图7 100 min 电感测量结果

完成对系统稳定性误差修正后, 将系统搭建好并放进温箱, 控制温度为 20℃。首先将仪器开机充分预热, 启动时钟与同步模块, 并启动电桥自动平衡程序开始电桥的平衡。根据被测阻抗的不同, 大约 3~5 次迭代后即可找到使系统满足平衡条件的幅值和相位。待 PXI-4461 的通道 2 被设置为这一组参数并达到稳定后, 开始使用 PXI-5922 进行电压采样。

实验对 100, 1000, 10000 Hz 下, 0.1, 1, 10, 100 mH 的标准电感进行测试, 测试时使用的参考电阻已经过校准, 稳定性良好。得到测量值后, 根据上述的标定结果对测得的电压值进行修正, 计算出待测电感和参考电阻的阻抗比例。使用精密阻抗分析仪对不同电感进行测量, 作为电感真值与测量值对比, 得到测量结果如表2所示。

表2 不同频率下不同电感测量结果

频率/Hz	某装置测量值/mH	本装置测量示值/mH	相对偏差
100	99.991	100.0008	0.009%
	9.9994	10.00092	0.015%
	0.9982	0.999871	0.005%
	0.10069	0.100613	0.077%
1000	10010.28	10002.79	0.075%
	1000.171	999.9907	0.013%
	10.00077	10.00067	0.004%
	1.000427	1.000469	0.001%
10000	10.00532	10.00467	0.006%
	1.000244	1.000236	0.001%
	0.100192	0.100186	0.006%

通过测试,可看出本文所设计的电感测量装置的测量结果相对偏差较小,电感的测量结果与精密阻抗分析仪的测量结果对比,一致性较好。

4 结论

基于双源平衡电桥原理,设计了一套可由计算机控制,自动调零,采样和数据处理的精密电感测量装置。通过对系统进行实验和分析,结果表明在100 min内电感示值的A类测量相对不确定度为 5×10^{-6} ,且具有良好的稳定性和较高精度。接下来的工作将从装置的寄生电容、泄漏电流及选择高精度的参考抗体等方面进行深入分析研究以提高测量精度。

参考文献

- [1] Segundo A K R, Pinto E S, Monteiro P M D B, et al. Sensor for measuring electrical parameters of soil based on auto-balancing bridge circuit[C]//2017 IEEE SENSORS. IEEE, 2017.
- [2] Li N, Xu H, Wang W, et al. A high-speed bioelectrical impedance spectroscopy system based on the digital auto-balancing bridge method[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(6): 065701.
- [3] Juan Prado, Cédric Margo, Mourad Kouider, et al. Auto balancing bridge method for bioimpedance measurement at low frequency[J]. cell, 2005, 10: 3.
- [4] KanakaRaju P. Design and Development of Portable Digital LCR Meter by Auto Balancing Bridge Method[G].
- [5] Overney F, Jeanneret B. Realization of an inductance scale traceable to the quantum Hall effect using an automated synchronous sampling system[J]. Metrologia, 2010, 47(6): 690-698.
- [6] 董艳阳. 自动阻抗测量仪工作原理及阻抗测量方法[J]. 现代电子技术, 2002(5): 24-26.
- [7] Zhang J Q, Ovaska S J, Xinmin Z. A novel fast balance technique for the digital AC bridge[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1998, 47(2): 371-377.
- [8] Jiang G L, Yang H, Li R, et al. A new algorithm for a high-

modulation frequency and high-speed digital lock-in amplifier[J]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(1): 015701.

- [9] Zhou M, Li G, Lin L. Fast digital lock-in amplifier for dynamic spectrum extraction[J]. Journal of Biomedical Optics, 2013, 18(5): 57003.
- [10] Toth E, Franco A, Debatin R. Power and energy reference system, applying dual-channel sampling[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2005, 54(1) 404-408.
- [11] Ferrero A, Salicone S, Toscani S. A Fast, Simplified Frequency-Domain Interpolation Method for the Evaluation of the Frequency and Amplitude of Spectral Components[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(5): 1579-1587.
- [12] Ballal T, Al-Naffouri T Y. Low-Sampling-Rate Ultra-Wideband Channel Estimation Using Equivalent-Time Sampling[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(18): 4882-4895.
- [13] Overney F, Jeanneret B. RLC Bridge Based on an Automated Synchronous Sampling System[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(7): 2393-2398.
- [14] Carullo A, Parvis M, Vallan A, et al. Automatic compensation system for impedance measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2003, 52(4): 1239-1242.
- [15] Prado J, Margo C, Kouider M. Auto balancing bridge method for bioimpedance measurement at low frequency[J]. cell, 2005, 10: 3.
- [16] 陆祖良. 周期信号采样测量策略[J]. 电测与仪表, 2008(10): 1-6.
- [17] Wu M, Chen D, Chen G. New Spectral Leakage-Removing Method for Spectral Testing of Approximate Sinusoidal Signals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2012, 61(5): 1296-1306.
- [18] Sedlacek M, Titera M. Interpolations in frequency and time domains used in FFT spectrum analysis[J]. Measurement, 1998, 23(3): 185-193.
- [19] Rietveld G, Zhao D, Kramer C, et al. Characterization of a Wideband Digitizer for Power Measurements up to 1 MHz[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(7): 247-248.

收稿日期: 2020-04-28

作者简介

李小舟(1995-),男,河南安阳人,硕士,本科毕业于北京理工大学,硕士毕业于中国空间技术研究院,研究方向为精密电磁测量技术。

