

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.05.14

数据采集系统输入电阻的不确定度分析与评定

梁志国¹, 冯秀娟²

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095;

2. 中国计量科学研究院 力学与声学计量科学研究所, 北京 100029)

摘 要: 针对输入电阻的测量误差常常偏大的问题, 分析了物理机理和实际原因。讨论了影响输入电阻测量不确定度的几个主要因素, 包括标准电压、测量电压、标准电阻取值及误差的影响等, 给出了降低输入电阻测量不确定度的主要措施, 即标准电阻与输入电阻的量值越接近越好, 两者应处于同一数量级, 并且两个不同的激励电压差异应该尽量大。通过实例给出了输入电阻测量不确定度的评价结果, 表明了该过程的正确性和切实可行性。

关键词: 输入电阻; 数据采集系统; 不确定度分析; 评价; 校准

中图分类号: TB971

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)05-0097-07

Analysis and evaluation of measurement uncertainty of input resistance of data acquisition systems

LIANG Zhiguo¹, FENG Xiujuan²

(1. National Key Laboratory of Metrology and Calibration Technology,

Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. Division of Mechanics and Acoustics, National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at the problem of large measurement errors in input resistance, the physical mechanism and practical reasons were analyzed. Several main factors affecting the uncertainty of input resistance measurement were discussed, including standard voltage, measurement voltage, standard resistance value and error, and so on. The main measures to reduce the uncertainty of input resistance measurement were given, that is, the closer the value of standard resistance and input resistance, the better, and the two should be in the same order of magnitude, moreover, the difference between two different excitation voltages should be as large as possible. The evaluation results of input resistance measurement uncertainty are provided through an example, and both the correctness and feasibility of the process are proved.

Key words: input resistance; data acquisition system; uncertainty analysis; evaluation; calibration

0 引言

电压类测量仪器的测量原理简言之是将其并联入被测对象的电路之中, 测量并获取被测对象

的电压。因而, 输入阻抗是非常重要的性能指标。在输入阻抗中, 电阻分量居主导地位, 电抗分量往往非常微小, 可以忽略, 故多数情况下的输入阻抗测量是指输入电阻的量值测量, 尤其是高阻状态。

收稿日期: 2023-02-22; 修回日期: 2023-04-05

基金项目: 国家市场监督管理总局规范修订项目(2021-237)

引用格式: 梁志国, 冯秀娟. 数据采集系统输入电阻的不确定度分析与评定[J]. 计测技术, 2023, 43(5): 97-103.

Citation: LIANG Z G, FENG X J. Analysis and evaluation of measurement uncertainty of input resistance of data acquisition systems[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(5): 97-103.



通常,电压类测量仪器的设计应用遵循两种不同理念,一种为高阻设计理念,主要用于100 MHz及以下的中低频率范围,以集总参数元器件为核心的电路理论为基础的仪器仪表;相比于被测量对象的内阻,测量仪表的输入电阻特别巨大,在测量过程中,给被测对象带来的影响很微小,可以忽略不计,例如数字电压表^[1]、100 MHz及以下带宽的示波器。另外一种为匹配设计理念,输入电阻(输入阻抗)通常为50 Ω;主要用于中高频率及以上的频率范围,以分布参数效应元器件为核心的电磁场理论为基础的仪器仪表,如瞬态波形记录仪,宽带示波器等等^[2]。相比于所测对象,其阻抗具有相同的量值,因而在较低频率情况下,能从被测对象处获取最大的信号功率,而在较高频率情况下,对被测对象造成的电能反射最少。

直流以及中低频率测量仪器多采用高阻设计,而射频及微波频率范围测量仪器全部采用匹配设计方案。数据采集系统多数属于中低频率测量范畴,通常使用高阻输入的设计方案。但仍然有少数称为高速数据采集系统的仪器,其模拟带宽可达100 MHz以上,使用了匹配设计模式,并且具有直流耦合和交流耦合两种不同的耦合方式。

输入阻抗测量可使用RLC测量仪、交流电桥等仪器直接测量,并以某种简单的等效电路形式给出其参数,如电阻与电容并联形式分别给出电阻和电容值,电阻与电感串联形式分别给出电阻和电感值;也可使用阻抗分析仪、矢量网络分析仪、时域反射计等仪器分析获得^[3-4]。

通常,匹配传输设计的输入电路使用阻抗参数表征^[5-7]。高阻传输设计的输入电路主要使用输入电阻参数表征^[8-13]。由于阻抗会随频率不同而变化,但输入电阻则具有相对的稳定性与一致性,故在高阻抗电路中常被作为测量对象^[14-19]。同时,针对输入电阻测量的改进研究也曾经不断涌现^[20-22],其中包括输入电阻带来的误差影响^[23-27]。

本文主要讨论数据采集系统输入电阻计量校准中的问题及其不确定度评定。

1 测量原理与方法

数据采集系统输入电阻测量原理为欧姆定律^[28]。如图1所示接线,选择标准电阻 R 为与数据

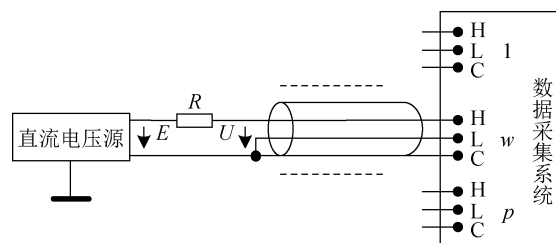


图1 校准输入电阻的接线图

Fig 1 Input resistance calibration diagram

采集系统输入电阻标称量值 R_i 相当的值(一般为 $(0.1 \sim 10)R_i$),将被校采集通道通过标准电阻 R 接到直流电压信号源上。

设置直流电压源信号幅度 $E = E_1$,加载信号,启动采集,记录采集数据 x_{1j} , ($j = 0, \dots, n-1$),折合到输入端的测量幅度值 U_1 为

$$U_1 = \frac{1}{n \cdot G_0} \sum_{j=0}^{n-1} x_{1j} \quad (1)$$

式中: n 为每个通道采集数据个数; G_0 为测量通道的增益值。

将信号幅度调置为 $E = E_2$,加载信号,启动采集,记录采集数据 x_{2j} , ($j = 0, \dots, n-1$),折合到输入端的测量幅度值 U_2 为

$$U_2 = \frac{1}{n \cdot G_0} \sum_{j=0}^{n-1} x_{2j} \quad (2)$$

按式(3)计算数据采集系统通道输入电阻 R_{in} 。

其中, E_1 、 E_2 的选取原则是使得对应的测量值 U_1 、 U_2 两者之差越大越好,从而降低输入电阻的测量不确定度。

$$R_{in} = \frac{(U_2 - U_1) \cdot R}{E_2 - E_1 - U_2 + U_1} = \frac{\Delta U_0 \cdot R}{\Delta E_0 - \Delta U_0} \quad (3)$$

$$\Delta U_0 = U_2 - U_1 \quad (4)$$

$$\Delta E_0 = E_2 - E_1 \quad (5)$$

$$U_1 = \frac{R_{in}}{R + R_{in}} \cdot E_1 = c \cdot E_1 \quad (6)$$

$$U_2 = \frac{R_{in}}{R + R_{in}} \cdot E_2 = c \cdot E_2 \quad (7)$$

2 测量不确定度模型

由式(3)可见,输入电阻 R_{in} 与信号幅度 E_1 、 E_2 、 U_1 、 U_2 以及标准电阻 R 均有关,因此,可以列出输入电阻 R_{in} 测量不确定度的主要来源为:①信号幅度 E_1 、 E_2 之差 ΔE_0 的不确定度 $u(\Delta E_0)$,主要由标准信号源的误差造成;②信号幅度 U_1 、 U_2 之差

ΔU_0 的不确定度 $u(\Delta U_0)$ ，主要由标准信号源的误差和测量系统自身造成；③标准电阻 R 的测量不确定度 $u(R)$ ，主要由标准电阻 R 的误差等因素造成。

由式(3)可得

$$\begin{aligned} dR_{in} &= \frac{\partial R_{in}}{\partial(\Delta E_0)} d(\Delta E_0) + \frac{\partial R_{in}}{\partial(\Delta U_0)} d(\Delta U_0) + \frac{\partial R_{in}}{\partial(R)} dR \\ &= -\frac{\Delta U_0 \cdot R}{(\Delta E_0 - \Delta U_0)^2} d(\Delta E_0) + \frac{\Delta E_0 \cdot R}{(\Delta E_0 - \Delta U_0)^2} d(\Delta U_0) + \\ &\quad \frac{\Delta U_0}{\Delta E_0 - \Delta U_0} dR \\ &= c_1 \cdot d(\Delta E_0) + c_2 \cdot d(\Delta U_0) + c_3 \cdot dR \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{in}}{R_{in}} &= -\frac{\Delta E_0}{(\Delta E_0 - \Delta U_0)} \cdot \frac{d(\Delta E_0)}{\Delta E_0} + \\ &\quad \frac{\Delta E_0}{(\Delta E_0 - \Delta U_0)} \cdot \frac{d(\Delta U_0)}{\Delta U_0} + \frac{dR}{R} \\ &= -c_0 \cdot \frac{d(\Delta E_0)}{\Delta E_0} + c_0 \cdot \frac{d(\Delta U_0)}{\Delta U_0} + \frac{dR}{R} \end{aligned} \quad (9)$$

灵敏系数为

$$c_1 = -\frac{\Delta U_0 \cdot R}{(\Delta E_0 - \Delta U_0)^2} \quad (10)$$

$$c_2 = \frac{\Delta E_0 \cdot R}{(\Delta E_0 - \Delta U_0)^2} \quad (11)$$

$$c_3 = \frac{\Delta U_0}{\Delta E_0 - \Delta U_0} \quad (12)$$

$$c_0 = \frac{\Delta E_0}{\Delta E_0 - \Delta U_0} = 1 + \frac{R_{in}}{R} \quad (13)$$

测量过程中，假设输入电阻 R_{in} 测量不确定度的不同分量之间不相关，根据输出测量值对于输入量的测量值的不确定度传递公式^[29]，由式(8)获得其合成标准不确定度 $u_c(R_{in})$ 为

$$u_c(R_{in}) = \sqrt{c_1^2 u^2(\Delta E_0) + c_2^2 u^2(\Delta U_0) + c_3^2 u^2(R)} \quad (14)$$

由式(9)获得其相对合成标准不确定度 $u_{rel}(R_{in})$ 为

$$u_{rel}(R_{in}) = \sqrt{c_0^2 u_{rel}^2(\Delta E_0) + c_0^2 u_{rel}^2(\Delta U_0) + u_{rel}^2(R)} \quad (15)$$

由式(15)可见，输入电阻测量不确定度为标准直流电压 ΔE_0 不确定度、测量电压 ΔU_0 不确定度和标准电阻 R 不确定度的合成，其传递系数 c_0 则由输入电阻与标准电阻的比值 R_{in}/R 确定，为降低其测量不确定度，除了标准直流电压源的不确定度和标准电阻的不确定度要求外，需要选取输入电阻与标准电阻的比值 (R_{in}/R) 足够小，通常要求 $R \geq R_{in}$ 。

3 测量数据及处理

选取NI USB-4431型数据采集系统作为被测对象^[30]，共有4个差分输入通道，量程范围为 ± 10 V，24位A/D，最大允许误差为 $\pm 0.15\%$ ，采集速率1~102.4 kSa/s，标称输入电阻200 k Ω 。选取通道1作为测量通道，其通道增益标定为 $G_0 = 1.002\ 857$ 。

以9500B型示波器校准仪作为直流电压标准源^[31]，幅度范围为 $\pm(10\text{ mV} \sim 10\text{ V})$ ，最大允许误差为 $\pm 0.03\% \sim \pm 0.001\%$ 。选标准电阻 $R = 200\text{ k}\Omega$ ，最大允许误差 $\pm 0.01\%$ ，误差在 $[-0.01\%, +0.01\%]$ 范围内服从均匀分布，相对不确定度为

$$u_{rel}(R) = 0.01\% \div \sqrt{3} = 0.005\ 77\%$$

给数据采集系统通道1分别加载 $E_1 = 7.000\text{ V}$ ， $E_2 = 9.000\text{ V}$ ，设置采集数据个数 $n = 100$ 。获得采集测量结果，用式(1)、(2)计算得 U_1 、 U_2 ，用式(3)计算得输入电阻 R_{in} ，如表1所示。

按照直流标准源9500B的指标，设 E_1 和 E_2 的最大相对误差均为 $\pm 0.001\%$ ，并假设均服从均匀分布。则，

E_1 的最大允许误差为

$$\Delta E_1 = \pm 0.001\% \times E_1 = \pm 0.07\text{ mV}$$

E_1 的不确定度为

$$u(E_1) = |\Delta E_1| \div \sqrt{3} = 0.04\text{ mV}$$

E_2 的最大允许误差为

$$\Delta E_2 = \pm 0.001\% \times E_2 = \pm 0.09\text{ mV}$$

E_2 的不确定度为

$$u(E_2) = |\Delta E_2| \div \sqrt{3} = 0.052\text{ mV}$$

$\Delta E_0 = E_2 - E_1$ 的不确定度为

$$u(\Delta E_0) = \sqrt{u^2(E_1) + u^2(E_2)} = 0.066\text{ mV}$$

$$u_{rel}(\Delta E_0) = u(\Delta E_0)/\Delta E_0 = 0.003\ 3\%$$

按照数据采集系统NI USB-4431的指标，设 U_1 和 U_2 的最大相对误差均为 $\pm 0.15\%$ ，并假设均服从均匀分布。则

U_1 的最大允许误差为

$$\Delta U_1 = \pm 0.15\% \times U_1 = \pm 5.37\text{ mV}$$

U_1 的不确定度为

$$u(U_1) = |\Delta U_1| \div \sqrt{3} = 3.10\text{ mV}$$

U_2 的最大允许误差为

$$\Delta U_2 = \pm 0.15\% \times U_2 = \pm 6.90\text{ mV}$$

表1 输入电阻测量结果

Tab.1 Input resistance measurement results

序号	电压 U_1		电压 U_2		电阻 R_{in} /k Ω	C_0	$u_{rel}(\Delta E_0)$ /%	$u_{rel}(\Delta U_0)$ /%	$u_{rel}(R)$ /%	$u_{rel}(R_{in})$ /%
	均值/V	标准差/mV	均值/V	标准差/mV						
1	3.578 840	0.204	4.601 372	0.232	209.221	2.046 103	0.003 3	0.49	0.005 77	1.0
2	3.578 535	0.194	4.601 589	0.235	209.439	2.047 196	0.003 3	0.49	0.005 77	1.0
3	3.578 386	0.207	4.601 480	0.204	209.456	2.047 280	0.003 3	0.49	0.005 77	1.0
4	3.578 428	0.229	4.601 426	0.200	209.416	2.047 079	0.003 3	0.49	0.005 77	1.0
5	3.578 283	0.198	4.601 358	0.181	209.448	2.047 240	0.003 3	0.49	0.005 77	1.0
6	3.578 339	0.190	4.601 270	0.211	209.388	2.046 938	0.003 3	0.49	0.005 77	1.0
7	3.578 476	0.231	4.601 335	0.167	209.358	2.046 788	0.003 3	0.49	0.005 77	1.0
8	3.578 757	0.185	4.601 211	0.186	209.188	2.045 940	0.003 3	0.49	0.005 77	1.0
9	3.578 796	0.194	4.601 169	0.192	209.154	2.045 770	0.003 3	0.49	0.005 77	1.0
10	3.578 839	0.176	4.601 057	0.202	209.089	2.045 446	0.003 3	0.49	0.005 77	1.0

U_2 的不确定度为

$$u(U_2) = \frac{|\Delta U_2|}{\sqrt{3}} = 3.98 \text{ mV}$$

$\Delta U_0 = U_2 - U_1$ 的不确定度为

$$u(\Delta U_0) = \sqrt{(u^2(U_1) + u^2(U_2))} = 5.04 \text{ mV}$$

$$u_{rel}(\Delta U_0) = \frac{u(\Delta U_0)}{\Delta U_0} = 0.49\%$$

计算结果如表1所示。

4 合成不确定度

通过式(13)计算灵敏系数,按照式(15)计算合成标准不确定度相对值 $u_{rel}(R_{in})$,如表1所示。

从输入电阻 R_{in} 的10次测量结果可见,实验标准偏差为0.14 k Ω ,与输入电阻之比为0.067%,与 $u_{rel}(\Delta U_0)$ 相比,可以被忽略。因此, R_{in} 测量重复性造成的不确定度可以忽略,从单次测量获得的

结果及不确定度可以完整表征 R_{in} 的测量。

5 扩展不确定度及测量结果

将表1中各个不确定度分量集中列出,如表2所示。

从表2中各个不确定度分量的量值水平来看,存在主导分量 $u_{rel}(\Delta U_0)$,其量值水平占据主导地位且量值服从梯形分布,由此可认定,合成标准不确定度相对值 $u_{rel}(R_{in})$ 近似服从梯形分布。

由于 U_1 的误差在区间 $[-\Delta U_1, \Delta U_1] = [-5.37 \text{ mV}, +5.37 \text{ mV}]$ 内服从均匀分布, U_2 的误差在区间 $[-\Delta U_2, \Delta U_2] = [-6.90 \text{ mV}, +6.90 \text{ mV}]$ 内服从均匀分布,则其差值 $\Delta U_0 = U_2 - U_1$ 应服从梯形分布,其上下底之比为

$$\beta = \frac{|\Delta U_2| - |\Delta U_1|}{|\Delta U_2| + |\Delta U_1|} = \frac{6.90 - 5.37}{6.90 + 5.37} = 0.124 69$$

取置信概率 $p = 95\%$,则有包含因子^[32]

表2 不确定度分量概算表

Tab.2 Estimation table of uncertainty components

序号 <i>i</i>	输入量 X_i	输入值 x_i	标准不确定度 $U_{rel}(x_i)/\%$	自由度	灵敏系数 c_i	不确定度分量 $c_i \cdot u_i(B)/\%$	分布
1	ΔE_0	2.000 V	0.003 3	∞	2.047	0.006 7	梯形
2	ΔU_0	1.022 8 V	0.49	∞	2.047	1.0	梯形
3	R	200 k Ω	0.005 77	∞	1	0.005 77	矩形
4	R_{in}	\	\	\	\	1.0	梯形

$$k_{95} = \begin{cases} \frac{1 - \sqrt{0.05(1 - \beta^2)}}{\sqrt{(1 + \beta^2)/6}}, & \beta \leq 0.905 \\ \frac{0.95(1 + \beta)}{2\sqrt{(1 + \beta^2)/6}}, & \beta \geq 0.905 \end{cases} \quad (18)$$

$k_{95} = 1.89$, 则扩展不确定度为

$$\begin{aligned} U_{\text{rel}}(R_{\text{in}}) &= k_{95} \times u_{\text{rel}}(R_{\text{in}}) \\ &= 1.89 \times 1.0\% \\ &= 1.9\% \end{aligned}$$

数据采集系统的输入电阻为

$$\begin{aligned} R_{\text{in}} &= 209.2 \times (1 \pm 1.9\%) \text{ k}\Omega \\ (k &= 1.89, p = 95\%) \end{aligned}$$

其中, “ $\pm$ ” 后面是输入电阻的扩展不确定度, 包含因子 $k_{95} = 1.89$, 是由梯形分布假设以及置信概率 $p = 95\%$ 的要求计算获得。

6 结论

输入电阻的测量不确定度主要来自标准电压源、输入端测量电压和标准电阻的合成结果。实际工作中输入电阻的不确定度往往非常大, 不知缘故。

输入电阻的相对不确定度为 ΔE_0 的不确定度 $u(\Delta E_0)$ 和 ΔU_0 的不确定度 $u(\Delta U_0)$ 以及标准电阻 R 的测量不确定度 $u(R)$ 的加权合成, 权值 c_0 则由输入电阻与标准电阻的比值 R_{in}/R 确定。此比值不宜过大或过小, 过小时, 电位差的不确定度变大, 过大时, 权值变大, 产生不确定度的放大效果。因此, R_{in}/R 量值在 1 附近为较佳选择。

在本组实验的条件下, 数据采集系统的测量误差占主导地位。若想降低输入电阻的测量不确定度, 除了平衡标准电阻、输入幅度 E_1 和 E_2 和测量幅度 U_1 和 U_2 等各个物理量不确定度的贡献, 从而寻求最佳状态以外, 还可以使用高精度数字电压表来替代数据采集系统测量获得 U_1 和 U_2 , 以降低输入电阻的测量不确定度, 即通过选取电压源、标准电阻以及测量电压的方式控制测量结果的不确定度。

在实际工作中, 使用数字电压表进行测量还应考虑其输入电阻对被测电路带来的额外负载效应的影响。

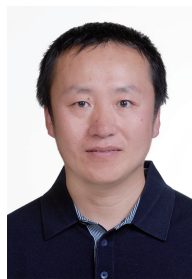
参考文献

- [1] Agilent Technologies. Test & Measurement Catalog [Z]. Room 5022, Santa Clara Campus's mainlobby, 5301 Stevens Creek Blvd. Santa Clara, Calif. USA. Agilent Technologies, 2005: 56.
- [2] Tektronix. Test, Measurement & Monitor Catalog [Z]. 14150 SW Karl Braun Drive P. O. Box 500 Beaverton, OR 97077, USA. Tektronix, 2002: 91.
- [3] Waveform Generation, Testing, and Measurement Committee of the IEEE Instrumentation Society. IEEE standard for digitizing waveform recorders [S]. IEEE Std 1057-2017, 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA. IEEE Instrumentation Society, 2017.
- [4] International Electrotechnical Commission. Performance characteristics and calibration methods for digital data acquisition systems and relevant software [S]. IEC 62008-2005, 3, rue de Varembé. PO Box 131. CH-1211 Geneva 20, Switzerland, International Electrotechnical Commission, 2005.
- [5] 刘芬. 射频功率放大器输入阻抗测量方法的研究[J]. 测控技术, 2010, 29(6): 18-24.
LIU F. Study on input impedance measurement method of RF power amplifier[J]. Measurement & Control Technology, 2010, 29(6): 18-24. (in Chinese)
- [6] 常凤娥. 电子示波器输入阻抗的实用测量方法[J]. 实用测试技术, 1995, 21(4): 25-27.
CHANG F E. A practical method for measuring input impedance of electronic oscilloscope[J]. Practical Measurement Technology, 1995, 21(4): 25-27. (in Chinese)
- [7] 孙玲, 吴先智, 艾学松. 低噪声放大器输入阻抗匹配网络设计优化方法[J]. 南京航空航天大学学报(英文版), 2011, 28(4): 379-384.
SUN L, WU X Z, AI X S. Optimization design method for input impedance matching network of low noise amplifier[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 28(4): 379-384. (in Chinese)
- [8] 刘鹏, 钱玮, 刘宜. 基于输入阻抗匹配的 ADC 模块的应用研究[J]. 仪表技术, 2009(9): 34-35, 38.
LIU P, QIAN W, LIU Y. Application research of ADC module based on impedance matching[J]. Instrumentation Technology, 2009(9): 34-35, 38. (in Chinese)
- [9] 叶培建. 数字电压表输入阻抗的测试[J]. 电测与仪表, 1974(6): 35-36.
YE P J. Test of input impedance of digital voltmeter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1974(6): 35-

36. (in Chinese)
- [10] 唐志平, 虞吉林. SHPB技术中超动态应变仪的带宽和输入阻抗[J]. 仪器仪表学报, 1985, 6(2): 196-204.
TANG Z P, YU J L. The band width and input impedance of the ultra-dynamic strain amplifier used in SHPB technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1985, 6(2): 196-204. (in Chinese)
- [11] 姜晖, 黄诗江. 差分放大器输入电阻的分析[J]. 电气电子教学学报, 1999, 21(4): 38-39.
JIANG H, HUANG S J. The analysis of input resistance in the differential amplifier[J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 1999, 21(4): 38-39. (in Chinese)
- [12] 李弋, 史力斌. 同相型运算放大器输入电阻的分析[J]. 辽宁工学院学报(自然科学版), 2001, 21(1): 39-40.
LI Y, SHI L B. Analysis of input resistor of non-inverting operational amplifier[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology (Natural Science Edition), 2001, 21(1): 39-40. (in Chinese)
- [13] 陶瑞民, 彭梅香. 关于差分式放大器输入电阻的研究[J]. 新余学院学报, 2007, 12(1): 95-96.
TAO R M, PENG M X. Research into the input resistance of differential amplifier[J]. Journal of XinYu College, 2007, 12(1): 95-96. (in Chinese)
- [14] 黎嘉明, 张林. 差分放大电路输入电阻的合理计算[J]. 电气电子教学学报, 2011, 33(3): 45-47.
LI J M, ZHANG L. The calculation of input resistance in the differential amplifier[J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 2011, 33(3): 45-47. (in Chinese)
- [15] 曹锁胜, 李金海, 方立德. 高输入阻抗的测试方法, 实验技术与管理. 2010, 27(1): 37-39.
CAO S S, LI J H, FANG L D. A new method for high input impedance measurement. Experimental Technology and Management. 2010, 27(1): 37-39. (in Chinese)
- [16] 邵中元, 熊发明, 何国民. 放大器输入阻抗测试方法的改进[J]. 桂林电子科技大学学报, 2002, 22(2): 16-18.
SHAO Z Y, XIONG F M, HE G M. The improvement of the method for input-impedance measurement of the amplifier[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2002, 22(2): 16-18. (in Chinese)
- [17] 张玲, 郑恩让. 高输入阻抗仪器输入阻抗的简易测量[J]. 电测与仪表, 1995, 32(12): 21-21, 35.
ZHANG L, ZHENG E R. Simple measurement of input impedance of high input impedance instrument[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1995, 32(12): 21-21, 35. (in Chinese)
- [18] 祝敏. 低频放大器输入阻抗的测量方法[J]. 电子制作, 2005(9): 40-41.
ZHU M. Measurement method of input impedance of low frequency amplifier[J]. Electronics DIY, 2005(9): 40-41. (in Chinese)
- [19] 张端仪. 应用电阻"折合"的概念简化输入电阻, 输出电阻的计算[J]. 电气电子教学学报, 1987, 9(2): 19-23.
ZHANG D Y. Simplify the calculation of input resistance and output resistance by using the concept of resistance "conversion"[J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 1987, 9(2): 19-23. (in Chinese)
- [20] 余一峰. 放大器输入电阻测试方法的改进[J]. 实验室研究与探索, 1998, 17(2): 36-37.
YU Y F. Improvement of measuring method of amplifier input resistance[J]. Laboratory Research and Exploration, 1998, 17(2): 36-37. (in Chinese)
- [21] 郭定进. 微弱信号放大器输入电阻测量时值得注意的问题[J]. 实验室研究与探索, 1996(3): 87-87, 92.
GUO D J. Problems worthy of attention when measuring input resistance of weak signal amplifier[J]. Laboratory Research and Exploration, 1996(3): 87-87, 92. (in Chinese)
- [22] 李建云, 陈红. 放大器高输入电阻的测量新方法[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 1997, 14(4): 72-74.
LI J Y, CHEN H. A new measuring method on the high input resistance[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 1997, 14(4): 72-74. (in Chinese)
- [23] 胡彩莉. 数字电压表的输入阻抗和零电流对测量的影响[J]. 现代计量测试, 2001, 9(1): 56-59.
HU C L. Influence of input impedance and zero current of digital voltmeter on measurement[J]. Modern Measurement and Test, 2001, 9(1): 56-59. (in Chinese)
- [24] 王秉时. 线性电路中消除仪表输入阻抗影响的电流、电压测量方法[J]. 电测与仪表, 1993, 30(6): 43-45, 54.
WANG B S. Current and voltage measurement method for eliminating the influence of instrument input impedance in linear circuit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1993, 30(6): 43-45, 54. (in Chinese)
- [25] 宋哲. 消除仪表输入阻抗影响提高测量精度的几种方法[J]. 山西机械, 1994(4): 37-40.
SONG Z. Several methods of eliminating the influence of

- instrument input impedance and improving measurement accuracy [J]. Shanxi Machinery, 1994 (4): 37-40. (in Chinese)
- [26] 任骏原. 同相比比例运算电路输入电阻的分析[J]. 渤海大学学报:自然科学版, 2013, 34(1): 30-32.
REN J Y. Analysis on input resistance in in-phase proportion of operational circuits [J]. Journal of Bohai University: Natural Science Edition. 2013, 34 (1): 30-32. (in Chinese)
- [27] 林红军, 王丽娟. 运放开环输入电阻对运算精度影响的分析[J]. 天津理工大学学报, 2005, 21(3): 7-8.
LIN H J, WANG L J. Analysis of operation accuracy influenced by open loop input resistance of operation amplifier [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2005, 21(3): 7-8. (in Chinese)
- [28] JJF 1048-1995 数据采集系统校准规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 1995.
JJF 1048-1995 Calibration Specification of Data Acquisition System [S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1995. (in Chinese)
- [29] 叶德培, 宋振国, 汪贤至. GJB 3756-1999, 测量不确定度的表示及评定[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部军标出版发行部, 1999: 9-11.
YE D P, SONG Z G, WANG X Z. GJB 3756-1999 Representation and evaluation of measurement uncertainty [S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the General Equipment Department of the People's Liberation Army of China, 1999: 9-11. (in Chinese)
- [30] National Instrument corporation. NI USB-443X Specifications [Z]. 11500 N Mopac Expwy Austin, TX78759-3504, USA, National Instrument corporation, 2011.
- [31] Fluke corporation. Fluke 9500B Specifications [Z]. P. O. Box 9090 Everett, Washington 98206 -9090, USA. corporation Fluke, 2011.
- [32] 肖明耀. 误差理论与应用[M]. 北京: 计量出版社, 1985.
XIAO M Y. Error theory and its application [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1985. (in Chinese)

(本文编辑: 郑燕)



第一作者: 梁志国 (1962—), 男, 黑龙江巴彦人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为数字化测量与校准、模式识别、动态校准、精确测量。