

新型电容电感测试仪校准装置的设计与实现^{*}

张心雨 梁晓瑜

(中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310000)

摘要:针对使用电容器和电抗器对电容电感测试仪进行校准时面临的校准程序复杂、维护成本高、误差过大的技术问题,设计了一种新型电容电感测试仪校准装置。该校准装置包括档位自动切换模块、输出比例控制模块、移相切换模块、电流放大调整模块及控制模块,通过将测试仪需要测量的电容值与电感值转化为电压电流的相位关系实现标准值的溯源。设计中依据电流输出范围将标准值划分为7个档位且各档位间自动切换,可以有效提高校准精度。实验测试结果表明,电流放大调整模块输出电流的稳定度可达到 10^{-4} 量级,对其在2与20V输入电压下电容量及电感量标准值的测量不确定度分别进行评估,校准电感量与电容量相对扩展不确定度均优于0.15%,证明其测量不确定度满足设计要求。

关键词:电容电感测试仪;校准装置;高精度;移相电路;不确定度

中图分类号: TH71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Design and implementation of a new calibration device for capacitance and inductance tester

Zhang Xinyu Liang Xiaoyu

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the technical problems of complicated calibration procedures, high maintenance costs, and excessive errors faced when using capacitors and reactors to calibrate capacitance-inductance testers, a new capacitance-inductance tester calibration device is designed in this paper. The calibration device includes a gear automatic switching module, an output proportional control module, a phase shift switching module, a current amplification adjustment module, and a control module, which realizes the traceability of standard values by converting the capacitance and inductance values to be measured by the tester into the phase relationship of voltage and current. In this design, the standard value is divided into seven steps according to the current output range and automatically switched between the steps, which can effectively improve the calibration accuracy. The experimental test results show that the stability of the output current of the current amplification adjustment module can reach the order of 10^{-4} , and the measurement uncertainties of the standard values of capacitance and inductance at 2 and 20 V input voltages are evaluated separately, and the relative expansion uncertainties of the calibration inductance and capacitance are better than 0.15%, which proves that the measurement uncertainties meet the design requirements.

Keywords: capacitance and inductance tester; calibration device; high precision; phase shift circuit; uncertainty

0 引言

随着行业的发展及国民经济的整体提升,电力电子的应用范围越来越广,各行业对于电气部件的要求也越来越严格,所以更高的质量、更优的性价比、以及更好的性能成为目前对于电子产品的考评标准^[1-4],同时这也意

味着市场对于高精度精密仪器的需求也更为迫切。电力电容电感测试仪是对电力系统无功补偿用电容器、电抗器进行电容量和电感量测量的专用仪器,目前已广泛应用于电力行业电网预试作业测试设备中。对于发现设备可能存在的问题、判断电气电子设备是否处于正常工作状态等问题,准确的电容、电感测量示值很重要,这有助

收稿日期:2023-02-14

^{*} 基金项目:国家市场监督管理总局技术保障专项(2022YJ21)资助

于对设备状态检测和维修工作的正常进行。如果要保证测试仪测量结果的准确可靠,就需要对其进行精确的校准^[5],因此针对电力电容电感测试仪的校准也显得尤为重要。

国外开发电容电感测试仪校准装置的历史可以追溯到20世纪初,Oliver Heaviside提出了一种被称为Heaviside电桥的系统被广泛采用,并成为电感校准的标准。在20世纪60年代,随着更精密的电子测量设备的出现,新的校准技术得到了发展,出现了使用数字信号处理和计算机校准的方法。目前,电力电容电感测试仪的检定存在3种方法,即标准电容器和标准电感器法、自校准法以及计算机辅助校准法,各省级、地市级计量技术机构绝大部分采用标准电容器与标准电感器作为标准器具校准电容电感测试仪^[6-8],标准电容箱是若干精密电容器的组合体,它们安装在同一箱体内,通过转换开关改变其电容值,标准电感箱同理。此方法是用一个“标准电容器”对测试仪的电容部分进行溯源,“标准电感器”对测试仪的电感部分进行溯源^[9-10],国内生产的量程较宽的电容箱是6盘十进制电容箱,可实现 $1 \times 10^0 \sim 1 \times 10^6$ pF的电容量程范围,在电感参数计量中,常见标准电感箱则一般为十进制电感箱,最宽范围的电感箱是六盘十进制电感箱^[11],量程范围 $1 \mu\text{H} \sim 1 \text{H}$ 。

从发展和今后需求来看,现有的使用电容箱及电感箱对电容电感测试仪参量进行分开校准的方法难以满足实用需求^[12],需要用到多种标准仪器进行参数组合才能完成测量,校准程序较为复杂,且生产高精度宽量程的电容箱或电感箱存在技术难点,导致标准器体积大,箱体重量较重,运输不便,且标准器易受到环境等因素影响老化,导致维护成本高。为了能满足电容电感测试仪的校准需求,简化校准程序,亟待推出一种新型电容电感测试仪校准装置,实现高效率高精度的校准。

本文依据JJF(浙)1139—2017电力电容电感测试仪校准规范行业标准,设计了用于输出电压不高于20 V,输入电流20 A及以下电力电容电感测试仪(简称测试仪)的校准装置,相应参数的测量范围覆盖了被校测试仪,最大允许误差优于被校测试仪的1/5,容量校准精度达到 $\pm 0.2\%$,电感量校准精度达到 $\pm 0.4\%$,适用于大部分电容电感测试仪,且该设备体积小,运输方便,因此在现场校准中有丰富的应用场景。

1 电容电感测试仪校准装置系统整体设计

1.1 电容电感测试仪工作原理

电容电感测试仪通常由测量主机和钳形电流互感器两部分组成,测量主机集恒压源单元、测量单元于一体^[13]。其工作原理如图1所示。测量工作开始时,主机恒压源单元输出交流电压于被测对象,电流互感器反馈电流测量信号于测试仪主机,测量单元通过计算得到被测对象的容量值和电感量值^[14]。

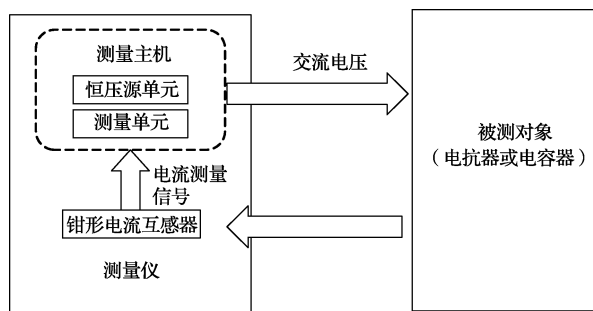


图1 电容电感测试仪工作原理

1.2 电容电感测试仪校准装置系统整体设计

本文设计的电容电感测试仪校准装置的整体设计主要包括液晶显示模块、单片机控制模块、输入电压检测模块、DAC7811输出比例控制模块、移相电路切换模块、电流放大调整模块;输入电压检测模块具体包括电压比较器、全波整流电路及电压衰减电路。其结构框图如图2所示。

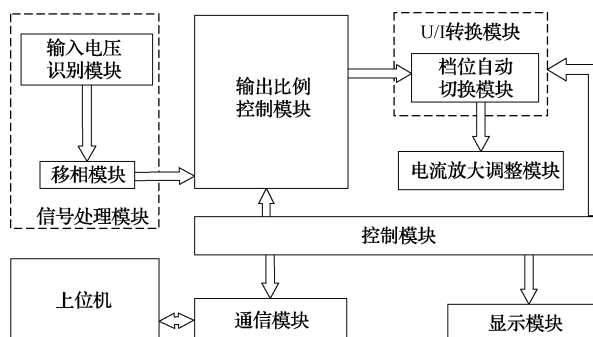


图2 电容电感测试仪校准装置结构框图

工作原理为电力电容电感检测仪的恒压源单元输出的电压一路经输入电压检测模块,该模块对输入端电压进行识别,若输入端电压为20 V,则对其进行衰减至2 V,电压经移相切换模块输出,单片机控制移相电路切换至恒流源模块,恒流源模块使用精密运放构成恒流源电路,7个高精无感采样电阻形成七路输出,用于输出测试仪标准值对应的恒定电流,测试仪通过钳形电流互感器采集恒流源模块输出电流值,计算得到标准值的测量值,显示模块用于显示当前设置的电容值或电感值。

依据技术指标与实用性及开发性,本文设计的电容电感测试仪校准装置选用STC15W408S-351-SOP28,STC15系列单片机具有超强抗干扰能力,片内集成了高速10 bit 8路A/D转换器、2个通用定时器,在相同的时钟频率下,其速度比早期1T系列单片机速度快20%^[15]。由此可以看出,STC15系列单片机丰富的片内外设和接口完全可以满足设计要求且不造成接口的浪费。

2 电容电感测试仪校准装置关键组成部分的设计与分析

2.1 输出比例控制电路设计

针对输出比例控制电路选用 DAC7811 芯片, DAC7811 是一款 CMOS 12 bit 电流输出数模转换器 (distributed autonomous corporation, DAC), 该器件由 2.7~5.5 V 电源供电。当 DAC7811 与外部电流到电压精密放大器结合使用时, 集成式反馈电阻器 (feedback resistor, RFB) 可提供温度跟踪和满量程电压输出, 输出电压 V_{out} 如下:

$$V_{out} = -V_{ref} \times \left(\frac{CODE}{4096} \right) \quad (1)$$

式中: V_{ref} 为参考电压。

针对 DAC7811 芯片设计了输出比例控制电路如图 3 所示, 外部 I/V 转换器选用了 OPA277, 具有足够低的失调电压, 以便运放失调不会受到 DAC 输出端子阻抗变化的调制。

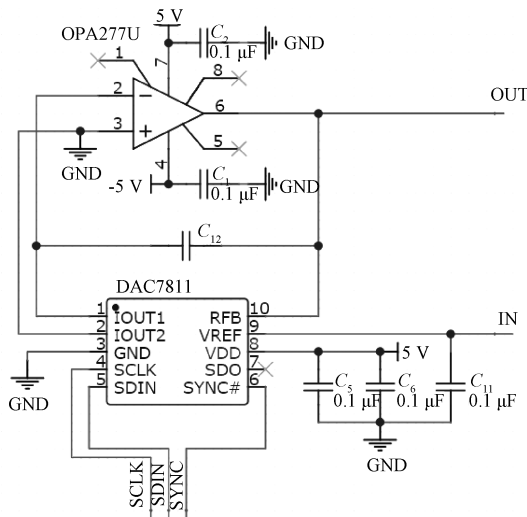


图 3 输出比例控制电路原理

2.2 移相电路切换模块电路设计

电容和电感均有移相功能, 电容的端电压落后于电流 90° , 电感端电压超前于电流 90° 。电容通电后, 电路给电容充电, 至电容充电结束时, 其端电压为电路的最大值, 如果取电容的端电压作为输出, 即可得到一个落后于电流 90° 的移相电压^[16]。

本文选用电容与电路参数串并联实现电压的超前或滞后, 当电容与电路参数串联, 分压作用增加, 加到放大元件两端的有效信号减小产生超前, 同理, 并联时可以算出电压是滞后的, 但是由于频率和具体相位的确定需要各个元器件参数的改变, 所以越精确就越难以实现, 因此想要实现 180° 的大范围调控选用电路如图 4 所示, 计算电路传递函数, $j\omega RC$ 为电路阻抗, 移相角 φ 的公式如下:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{-2\omega RC}{1 - \omega^2 R^2 C^2} \quad (2)$$

图 4 是电容电感测试仪校准装置的移相电路切换设计图, 通过微调滑动变阻器 RP6 与 RP7 达到精确的超前或滞后的角度。

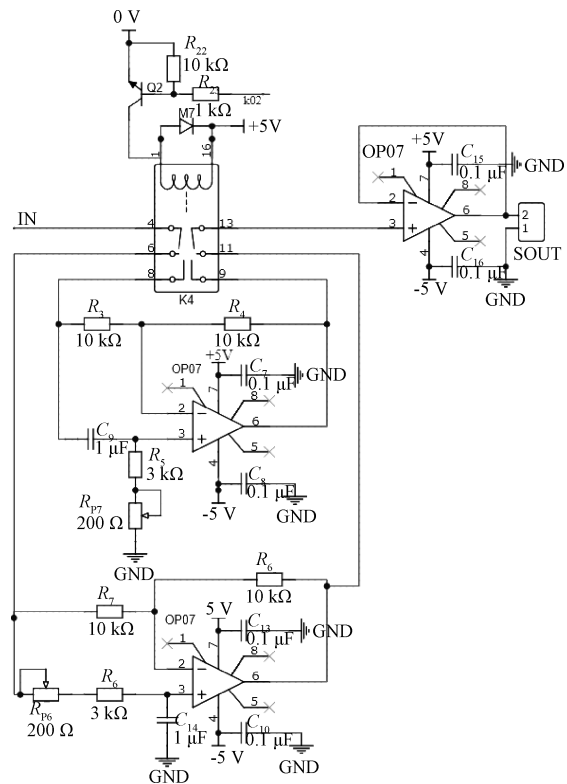


图 4 移相切换电路原理

2.3 采样电阻的选择

该校准装置标准值覆盖被校测试仪, 将标准值转化为电压与电流的关系并依据电流计算结果进行档位划分, 依据容抗、感抗计算公式计算出标准值对应的电流值, 在设置恒流源输出档位时, 考虑到将输入电压控制在 $1\sim 2\text{ V}$, 可以有效增加校准精度, 标准值及其对应的采样电阻档位设置如表 1 所示。

表 1 标准值及其对应的采样电阻档位

档位	标准值	输入电压/V	输出电流/A
0.5 Ω	2 000 μF	1.256 6	1.256 60
	10 mH	1.273 2	0.636 60
	500 μF	0.628 0	0.314 16
20 Ω	1 000 μF	1.256 6	0.628 32
	50 mH	1.273 0	0.127 30
	100 mH	1.273 2	0.063 66
100 Ω	100 μF	1.256 6	0.062 83
	50 μF	0.628 4	0.031 42
	500 mH	1.273 0	0.012 73
500 Ω	1 000 mH	0.637 0	0.006 370
	10 μF	0.628 0	0.006 280
1 kΩ	2 000 mH	1.590 0	0.003 180

由焦耳定律可知,电阻阻值越大其热效应越强。在恒流源的设计中,热效应强不仅会增加功耗,更会增加系统的不稳定性,因此在恒流源电路中根据功率大小采用了两种不同的采样电阻。由于其中3个采样电阻通过的电流过大,因此将其替换为 RTP 大功率厚膜电阻器,25℃下额定功率可达到 50 W,其余使用 BWL 高精无感电阻。

设计时,增加散热板并将3个 RTP 大功率电阻放置于最外缘,同时在两端放置小型风扇加快散热,防止大电流流经时由于功率过大引起输出端电流产生误差与波动。

2.4 电流放大调整电路

根据输入电压的变化及输出电流的范围,设计了7个不同档位自动切换的恒流源电路,综合分析标准值对应的主要性能参数后,本文采用了 OPA549TG3,一个高电压、高电流的运算放大器,电路采用±12 V 供电,电容电感测试仪校准装置的电流放大调整电路如图5所示。与通用运算放大器相比,OPA549TG3可在较高的电源电压下操作,该运放正输入端连接的电阻控制输出电流限值,将 ILIM 直接连接到 Ref 可设置最大输出电流限值,最大可扩展至 20 A。

理想情况下,根据放大器虚短、虚断原则,恒流源输出电流仅与采样电阻有关,7个档位对应的采样电阻之间使用继电器进行切换。

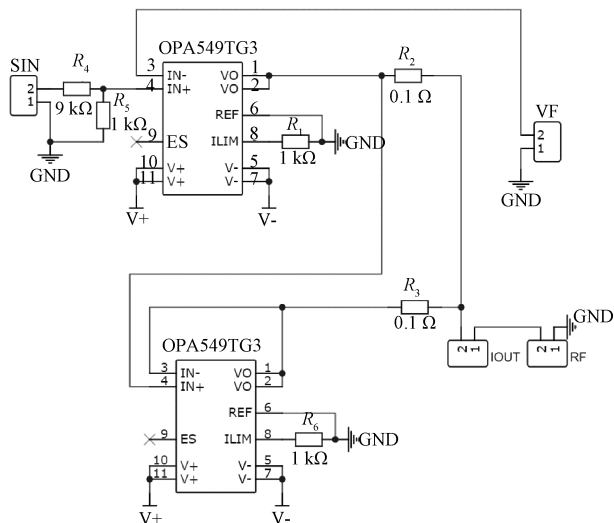


图5 电流放大调整电路原理

使用 UTG932 函数任意波形发生器提供 0~2 V 交流电压,该波形发生器可生成精确、稳定、纯净、低失真的输出信号,利用一个最小分辨力为 100 μA,量程为 20 mA~10 A 的高精度万用表 FLUKE8808A 对输出端电流进行采集测量,实验中每间隔 1 min 测量一次,测量时间持续 30 min,对7个档位依次进行测量,表2为各档位输出端电流测量值部分数据。

表2 各档位输出端电流测量值

序列	输出电流/A						
	1 kΩ	500 Ω	100 Ω	20 Ω	10 Ω	2 Ω	0.5 Ω
1	0.001 993 0	0.004 001 5	0.020 08	0.100 13	0.200 73	0.488 29	0.360 41
2	0.001 992 9	0.004 001 3	0.020 07	0.100 14	0.200 72	0.488 31	0.360 44
3	0.001 992 7	0.004 001 8	0.020 07	0.100 14	0.200 72	0.488 35	0.360 50
4	0.001 993 3	0.004 001 9	0.020 07	0.100 14	0.200 72	0.488 38	0.360 48
5	0.001 993 1	0.004 002 0	0.020 08	0.100 14	0.200 72	0.488 36	0.360 28
6	0.001 992 7	0.004 002 1	0.020 08	0.100 13	0.200 73	0.488 43	0.360 18
7	0.001 993 0	0.004 002 1	0.020 08	0.100 13	0.200 73	0.488 42	0.359 83
8	0.001 993 4	0.004 002 1	0.020 08	0.100 13	0.200 74	0.488 40	0.359 67
9	0.001 993 2	0.004 001 7	0.020 08	0.100 14	0.200 73	0.488 41	0.359 58
10	0.001 993 3	0.004 001 8	0.020 08	0.100 13	0.200 74	0.488 41	0.359 50

电流稳定度是在一定时间内,多次测量通过负载的电流大小,计算得出输出电流稳定度大小^[17]。计算7个档位在 0.001、0.002、0.02、0.1、0.2、0.4、0.5 A 预设点的输出电流标准差及稳定度,结果如表3所示。

由表3可知,电流稳定性测试结果均在 10⁻⁴ 以内,电路稳定性较好,满足设计需求。

3 电容电感测试仪校准装置软件设计

本文采用 C 语言编写单片机程序,使用模块化和结构化的编程思路来对主程序进行编写。该系统的主程序主

表3 各档位输出端电流稳定度

序列	档位/Ω	标准差/A	电流稳定度/(A·s ⁻¹)
1	1 000	1.7×10 ⁻⁷	6.5×10 ⁻⁵
2	500	3.0×10 ⁻⁷	7.5×10 ⁻⁵
3	100	7.0×10 ⁻⁶	3.5×10 ⁻⁴
4	20	7.5×10 ⁻⁶	7.5×10 ⁻⁵
5	10	7.7×10 ⁻⁶	3.9×10 ⁻⁵
6	2	3.5×10 ⁻⁵	7.2×10 ⁻⁵
7	0.5	3.4×10 ⁻⁴	8.7×10 ⁻⁴

要由4个部分组成,档位自动切换程序、输出比例控制程序、移相切换程序、串行通信程序。主程序软件流程如图6所示。主程序工作过程如下:系统上电复位之后进行初始化,对屏幕及通道进行清零,检测是否按下按键,判断加按键或减按键,检测是否有输入电压,判断输入电压是2 V还是20 V,当判断完成后,系统会根据指令对通道进行相应设置,以上步骤不断循环。

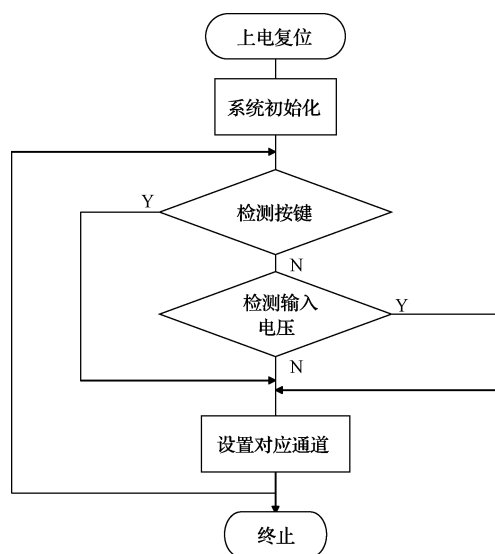


图6 主程序软件设计流程

在各功能模块中,档位自动切换模块可以实现通道设置的功能,工作过程如下:使用函数控制继电器的状态,根据传入参数的值选择是控制哪个继电器通道,然后根据规定的采样电阻参数的值设置通道上的电阻值。根据参数的不同,函数会对不同的控制线进行操作,以达到控制继电器状态的目的。

4 校准装置的测量不确定度评估

以交直流大功率三相标准源 DK-51B3 做标准器,按要求进行接线;当校准 2 V 输入电压下的电容参量时,频率设置为 50 Hz,交流电压幅值为 2 V,根据需要的校准值结合容抗推导公式 $C = I / 2\pi fU$ 计算交流电流输出值,启动三相多功能标准表 TD3300,测量输出电流后读取并记录示值;校准电感参量时同上,设置频率为 50 Hz,交流电压幅值为 2 V,根据需要的校准值结合感抗推导公式 $L = U / 2\pi fI$ 计算交流电流输出理论值,启动测量后读取并记录 TD3300 示值;当校准 20 V 输入电压下的电容参量时,频率设置为 50 Hz,交流电压幅值为 20 V,根据需要的校准值结合容抗推导公式计算交流电流输出值,启动三相多功能标准表 TD3300,测量输出电流后读取并记录示值,校准电感参量时同上。

使用 DK-51B3 型交直流大功率三相标准源校准 20 V 输入电压下电容(50 μ F)测量结果的不确定度评定为例。

4.1 评定步骤

1) 建立测量模型

建立测量模型,被校仪器的示值误差可表示为:

$$\Delta I = I_x - I_s \quad (3)$$

采用标准源法进行校准时,设定输入电压为 20 V,频率 50 Hz,此时 $I_s = C_s / (2\pi fU_s)$,所以示值误差公式为:

$$\Delta I = I_x - \frac{C_s}{2\pi fU_s} \quad (4)$$

式中: ΔI 为示值误差; I_x 为校准装置的电流输出示值; I_s 为标准值对应的电流输出理论值; U_s 为标准装置的电压输出示值。

各输入量之间不相关,不确定度传播公式为:

$$u_{rel}(\Delta I) = \sqrt{u_{rel}^2(I_x) + u_{rel}^2(I_s) + u_{rel}^2(U_s)} \quad (5)$$

2) 不确定度分量

(1) 校准装置电流输出示值引入相对标准不确定度 $u_{rel}(I_x)$

A. 由测量重复性引入

可以通过连续测量得到测量列,采用 A 类方法进行评定。环境温湿度引入的不确定度也包括在连续测量列的分散性中,故不再分析其影响。在重复性条件下进行 10 次测量并计算标准差^[18],所得数据如表 4 所示。

表 4 测量重复性记录

次数 n	测量列 x_i / A
1	0.314 108
2	0.314 113
3	0.314 125
4	0.314 119
5	0.314 113
6	0.314 108
7	0.314 105
8	0.314 112
9	0.314 124
10	0.314 120

则相对标准不确定度:

$$u_{rel}(I_{x1}) = 0.002 2\% \quad (6)$$

B. 由被校仪器有限分辨力引入

采用 B 类不确定度评定,被校仪器的分辨力为 1 μ A,即半宽区间 $a = 0.5 \mu$ A,其满足均匀分布,覆盖因子 k 取 $\sqrt{3}$,相对标准不确定度为:

$$u_{rel}(I_{x2}) = 0.000 092\% \quad (7)$$

由于重复性引入的不确定度分量大于分辨力带来的不确定度分量,所以只考虑重复性的影响,即:

$$u_{rel}(I_x) = 0.002 2\% \quad (8)$$

(2) 标准装置电流示值引入的不确定度 $u_{rel}(I_s)$

标准器交直流大功率三相标准源 DK-51B3 的电流最大允许误差为 $\pm 0.05\%$,其满足均匀分布,覆盖因子 k 取

$\sqrt{3}$, 则标准不确定度为:

$$u_{rel}(I_s) = \frac{a}{k} = 0.029\% \quad (9)$$

(3) 标准装置电压示值引入的不确定度 $u_{rel}(U_S)$

标准器交直流大功率三相标准源 DK-51B3 的电压最大允许误差为 $\pm 0.05\%$, 其满足均匀分布, 覆盖因子 k 取 $\sqrt{3}$, 于是标准不确定度为:

$$u_{rel}(I_s) = \frac{a}{k} = 0.029\% \quad (10)$$

3) 合成标准不确定度

表 5 不确定度分量

分量符号	不确定度来源	灵敏系数 c_i	$ c_i u_{rel}(x_i)/\%$
$u_{rel}(I_x)$		1	0.002 2
$u_{rel}(I_{x1})$	校准装置重复性		0.002 2
$u_{rel}(I_{x2})$	测试仪分辨率		0.000 092
$u_{rel}(I_S)$	标准装置电流示值	-1	0.029
$u_{rel}(U_S)$	标准装置电压示值	-1	0.029

以上所分析的各项标准不确定度分量是互不相关的, 所以其合成相对标准不确定度为:

$$u_{relc} = \sqrt{u_{rel}^2(I_x) + u_{rel}^2(I_S) + u_{rel}^2(U_S)} = 0.041\% \quad (11)$$

4) 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 故相对扩展不确定度为:

$$U = k \times u_{relc} = 0.082\% \quad (12)$$

4.2 电容电感测试仪校准装置测量不确定度评定一览

按照上述评定步骤对电力电容电感测试仪测量范围内的电容与电感参量一一进行评定如表 6~9 所示。

表 6 为 20 V 输入电压下, 标准源法校准电容量(10~2 000 μF) 评定结果, 表 7 为 20 V 输入电压下, 标准源法校准电感量(10~5 000 mH) 评定结果, 表 8 为 2 V 输入电压下, 标准源法校准电容量(10~2 000 μF) 评定结果, 表 9 为 2 V 输入电压下, 标准源法校准电感量(10~5 000 mH) 评定结果。

表 6 20 V 输入电压电容不确定度分量

校准参量	标准值/ μF	不确定度分量/%				扩展不确定度/% $U_{rel} \quad k=2$
		测量重复性	有限分辨力	标准装置电流示值	标准装置电压示值	
电容	10	0.006 8	0.000 46	0.029	0.029	0.08
	50	0.002 2	0.000 092	0.029	0.029	0.08
	100	0.001 1	0.000 46	0.029	0.029	0.08
	500	0.004 0	0.000 092	0.029	0.029	0.08
	1 000	0.003 5	0.000 46	0.029	0.029	0.08
	2 000	0.021 0	0.000 23	0.029	0.029	0.09

表 7 20 V 输入电压电感不确定度分量

校准参量	标准值/ μF	不确定度分量/%				扩展不确定度/% $U_{rel} \quad k=2$
		测量重复性	有限分辨力	标准装置电流示值	标准装置电压示值	
电感	10	0.001 9	0.000 45	0.029	0.029	0.08
	50	0.004 0	0.000 23	0.029	0.029	0.08
	100	0.002 4	0.000 45	0.029	0.029	0.08
	500	0.004 5	0.000 23	0.029	0.029	0.08
	1 000	0.012 0	0.000 45	0.029	0.029	0.09
	2 000	0.026 0	0.000 091	0.029	0.029	0.1

表 8 2 V 输入电压电容不确定度分量

校准参量	标准值/ μF	不确定度分量/%				扩展不确定度/% $U_{rel} \quad k=2$
		测量重复性	有限分辨力	标准装置电流示值	标准装置电压示值	
电容	10	0.009 5	0.000 46	0.029	0.029	0.08
	50	0.016 0	0.000 092	0.029	0.029	0.09
	100	0.002 9	0.000 46	0.029	0.029	0.08
	500	0.005 8	0.000 092	0.029	0.029	0.08
	1 000	0.006 4	0.000 46	0.029	0.029	0.08
	2 000	0.004 3	0.000 23	0.029	0.029	0.08

表9 2 V输入电压电感不确定度分量

校准参量	标准值/ μF	不确定度分量/%				扩展不确定度/% $U_{\text{rel}} \quad k=2$
		测量重复性	有限分辨力	标准装置电流示值	标准装置电压示值	
电感	10	0.004 2	0.000 45	0.029	0.029	0.08
	50	0.007 9	0.000 23	0.029	0.029	0.08
	100	0.003 3	0.000 45	0.029	0.029	0.08
	500	0.006 0	0.000 23	0.029	0.029	0.08
	1 000	0.009 1	0.000 45	0.029	0.029	0.08
	2 000	0.051 0	0.000 91	0.029	0.029	0.13

由表6~9可以得出,在输入电压2 V与输入电压20 V的情况下,本电容电感测试仪校准装置电容及电感参量合成不确定度和扩展不确定度小于0.15%,校准装置的测量结果不确定度符合JJF(浙)1139-2017《电力电容电感测试仪校准规范》的要求。

5 结 论

本文设计了一种新型的电力电容电感测试校准装置,解决了使用电容器和电抗器对电容电感测试仪校准困难、维护成本高、误差过大的技术问题,适用于市面上大多数常用的电容电感测试仪,可以满足10~2 000 μF 电容量、10~5 000 mH电感量的测量范围内1级及以下电容电感测试仪的校准,且电容量校准精度达到 $\pm 0.2\%$,电感量校准精度达到 $\pm 0.4\%$ 。该设备便于携带,运输方便,校准程序简单,因此在现场校准中有丰富的应用场景,具有较好的使用价值。

参 考 文 献

[1] 徐晋,汪可友,李国杰. 电力电子设备及含电力电子设备电力系统实时仿真研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 3-17.

[2] 雷万钧,刘进军,吕高泰,等. 大容量电力电子装备关键器件及系统可靠性综合分析与评估方法综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3353-3361.

[3] 钱照明,张军明,盛况. 电力电子器件及其应用的现状和发展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5149-5161.

[4] 温家良,葛俊,潘艳,等. 直流电网用电力电子器件发展与展望[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 663-669.

[5] 陈纓,岳长喜,杨勇波,等. 配网高压电能计量装置整体校准技术研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(9): 35-39.

[6] HELMY M, RAOUF A. Completely automated system for capacitance measurement through new accurate capacitance box[J]. International Journal of Metrology and Quality Engineering, 2017, DOI: 10.1051/ijmqe/2017017.

[7] TRAN N T M, D'ELIA V, CALLEGARO L, et al. A capacitance build-up method to determine LCR meter errors and capacitance transfer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(8): 5727-5735.

[8] VELYCHKO O, SHEVKUN S, DOBROLIUBOVA M. Features of Calibration of Precision LCR Meters[J]. Sensors & Transducers, 2019, 237(9-10): 171-177.

[9] 王兰芳. 一种基于波形仿真的电容电感测试仪校准方法和装置[P]. 中国: CN113433502B, 2022-09-06.

[10] 吴勇,汪树青. LCR测量仪校准方法研究[J]. 电子世界, 2020(23): 95-97.

[11] 严志鹏,潘立总,黄巧丽. 一种新型PFC电感箱[P]. 中国: 201921042813.1, 2020-02-28.

[12] 姚金平,龚天保,张勇. 一种电容测试仪的校准方法[P]. 中国专利: 201911180041.2, 2020-03-24.

[13] 龚金龙. JJF(浙)1139-2017. 电力电容电感测试仪校准规范[S]. 2017.

[14] 林勇,赵斯衍,张杰梁. 一种新型电力电容电感测试校准装置[J]. 电子测试, 2020(15): 20-21,105.

[15] 何俊鹏,白旭峰,曹虎,等. 移相全桥变换器RC缓冲电路优化研究分析[J]. 电力电子技术, 2021, 55(3): 65-67,113.

[16] 王瑞田,肖飞,范学鑫,等. 三电平移相全桥直流变换器的变压器直流偏置分析与抑制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3345-3354.

[17] 党玉杰,董全林,孙茂多. 高稳定度恒流源的研究与影响因素分析[J]. 电源技术, 2016, 40(4): 865-868.

[18] 杨雪梅,肖鹏,余晓曦,等. 精密伏秒发生器的研制[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 9-15.

作 者 简 介

张心雨,硕士,主要研究方向为测试计量仪器。
E-mail: zxy123yeah@163.com

梁晓瑜,教授,硕士生导师,主要研究方向为安全技术及工程,计算流体力学交叉应用,测试计量技术及仪器。