DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905808

基于 PJVS 的交流量子电压比例研究*

周天地,贾正森,杨 雁,石照民,徐熙彤
(中国计量科学研究院 电磁所 北京 100029)

摘 要:可编程约瑟夫森量子电压基准(PJVS)在电学计量中的应用,完成了电压单位伏特由实物基准到自然基准的过渡,具有高准确性、高稳定性的特点。基于双路量子电压信号,可构建具有量子精度的交流比例,实现任意交流比例高精度的量子复现,从而替代传统交流比例技术。通过驱动 SNS 型双路约瑟夫森结阵,能够同时合成两路幅值精确且相位可调的量子电压。采用双通道差分采样技术减小了台阶间过渡过程对量子电压幅值恢复的影响,结合通道换臂技术实现量子电压比例的高精度测量,交流量子电压比例测量标准不确定度为 0.09 μV/V,交流量子电压比例输出精度优于 0.05 μV/V。通过与传统感应分压器(IVD)比较测量,验证了交流量子电压比例的准确性。最后讨论了交流量子电压比例技术在功率计量以及交流阻抗电桥两个电磁计量领域中的应用。

关键词: 可编程约瑟夫森电压基准;量子电压;交流比例;差分采样;功率计量;阻抗电桥
中图分类号: TH71 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 410.55

Research on AC quantum voltage ratio based on PJVS

Zhou Tiandi, Jia Zhengsen, Yang Yan, Shi Zhaomin, Xu Xitong
(*Division of Electricity and Magnetism, National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China*)

Abstract: The application of programmable Josephson quantum voltage standard (PJVS) in electrical measurement completes the transition from physical reference standard to natural reference standard of voltage unit volt, which has the characteristics of high accuracy and high stability. Based on the double channel quantum voltage signals, the ac ratio with quantum precision can be constructed to realize the high-precision quantum reproduction of arbitrary ac voltage ratio, which can replace the traditional ac ratio technology. Through driving the SNS type double channel Josephson junction array, double quantum voltages with precise amplitude and adjustable phase can be synthesized simultaneously. The two-channel differential sampling technique is adopted to reduce the influence of step transition process on the amplitude recovery of quantum voltage, and combining the channel arm-changing technique the high-precision measurement of quantum voltage ratio is realized. The standard uncertainty of the ac quantum voltage ratio measurement is 0.09 μV/V, and the ac quantum voltage ratio output accuracy is better than 0.05 μV/V. The accuracy of the ac quantum voltage ratio was verified through comparison measurement with the conventional inductive voltage divider (IVD). Finally, the applications of the ac quantum voltage ratio technology in two electromagnetic metrology fields of power measurement and ac impedance bridge are discussed.

Keywords: programmable Josephson voltage standard (PJVS); quantum voltage; AC ratio; differential sampling; power metrology; impedance bridge

0 引 言

在现代计量各个领域中,由于电磁信号便于检测、传输和处理,因此大都借助于各类传感器将被测量转化为电磁信号来实现定量,这也使得电磁计量成为整个计量科学的重要基础。电磁计量可分为两部分内容:1)建立实物计量标准、保存单位量值;2)进行电磁学单位量值复现与传递,二者缺一不可。发展基于量子电压比例技术以及相应的测量技术来提高电磁单位的复现与传递水平

收稿日期:2019-11-14 Received Date:2019-11-14
*基金项目:国家自然科学基金(51877202)项目资助

对促进计量技术发展具有重要意义。

现代交流比例标准是基于 Cutkosky 等[1]所提出的采用磁感应耦合的感应分压器(inductive voltage divider, IVD)发展起来的。通过感应分压器在交流同轴电桥中的应用使得交流阻抗单位复现精度提高了 2~3 个数量级,达到 10^{-8} 量级,并且带动了整个精密电磁计量领域的快速发展。

基于感应耦合的比例器是利用绕组中的公共磁通耦合,根据匝比关系获得高精度的交流比例。但是,基于匝比关系的感应耦合比例器件只能实现同类型阻抗的比较。为了实现任意比例的理想交流比例新技术,研究人员开始采用数字信号合成技术来构建交流比例。譬如意大利国家计量院(INRIM)利用任意相位数字信号合成构建交流比例,实现了 R-C 直角电桥[2]、芬兰计量与认可研究院(MIKES)构建了高精度数字交流比例源用于阻抗测量[3]、瑞士联邦计量局(METAS)利用数字采样技术实现交流比例的准确测量[4]。但是上述基于数字电压合成或数字采样方法实现的交流比例技术需要高精度的参考电压标准,基于传统参考电压标准实现比例准确度最高水平仅在 10^{-7} 量级。

现代计量学的发展趋势是利用量子现象复现计量单位,建立计量基准,实现由实物基准向量子计量基准的过渡。在电磁计量领域,随着约瑟夫森效应被发现和在计量中的应用,美国国家标准与技术研究院(NIST)、德国联邦物理技术研究所(PTB)、日本国家先进工业科学和技术研究所(AIST),均成功合成了可以商业应用的约瑟夫森结阵[5],在此基础上建立了可编程约瑟夫森标准(programmable Josephson quantum voltage standard, PJVS)。中国计量科学研究院(NIM)于 1993 年和 1999 年先后建立了 1 和 10 V 直流约瑟夫森量子电压基准,在 2010 年和 2015 年建立了 1 和 10 V 的可编程约瑟夫森电压标准[6-7],这使得利用交流量子电压构建更高准确度的交流量子电压比例成为可能。从 2011 年至今,PTB 开展了基于 PJVS 的交流比例技术研究[8],采用 PJVS 作为交流比例器件,实现了 10^{-8} 量级同类型阻抗比较[9]。

本文提出了一种基于量子电压的交流比例实现方法,构建了双路量子电压比例系统;为验证量子电压比例系统比差和角差测量的准确度,设计了与 IVD 自校验法对比试验;介绍了双路交流量子电压的应用前景和发展方向,并给出了未来交流功率和阻抗电桥测量方案。

1 交流量子电压比例的实现

目前,精准的交流比例标准基本是通过 IVD 来实现的。如图 1(a)所示,IVD 从本质上是通过绕在公共磁芯上的紧密耦合绕组串联起来,利用公共磁通耦合关系提供电压比例的器件,它具有分压比近乎等于匝比的特点。感应分压器传递比例误差定义为式(1)。

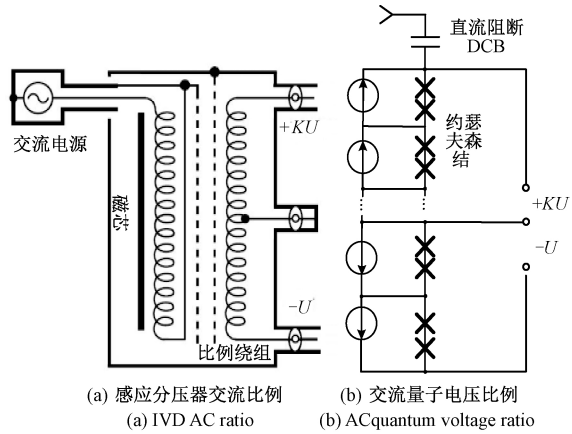


图 1 感应分压器交流比例与交流量子电压比例

Fig.1 IVD AC ratio and AC quantum voltage ratio

$$e = \frac{U_0 - U_2}{U_1} = \frac{\Delta U}{U_1} \tag{1}$$

式中:U_0 为感应分压器开路输出电压的标称值;ΔU 为 IVD 开路输出电压的误差;U_1 为 IVD 输入电压;U_2 为 IVD 输出电压测量值。

IVD 具有较高的工作稳定性与准确性、对各种环境条件的适应性、高输入阻抗、低输出阻抗的特点,具有较低的输出噪声和较强的抗干扰能力,通过自校验能够得到高准确度高精度的比例值[1]。然而,在交流激励下由于分布参数、杂散耦合、容性泄露等因素影响,需要设计"双级"或者"多级"等复杂结构来克服这些缺点。

基于 PJVS 的量子电压具有高准确性、高稳定性、易复现的特点,通过编程的方式可控制量子电压的输出,如图 1(b)所示,约瑟夫森结阵由多个三进制排列的约瑟夫森结分段组成,每个分段能够独立输出,类似于感应耦合比例器件,各段约瑟夫森结阵存在耦合关系,因此约瑟夫森电压基准不仅是直流量子电压源,还是一个近乎理想的直流电压比例器件。若采用双路约瑟夫森结阵,在同一微波的辐射下,通过编程的方式有序驱动,能够合成两路幅值与相位可调的交流量子电压信号。利用两路合成的交流量子电压信号,即可构建精准的交流量子电压比例输出。

1.1 双路交流量子电压的合成

基于超导/金属/超导(SNS)类型的约瑟夫森结阵,NIM 建立了一套单路交流量子电压的合成装置[10]。在此基础上,NIM 继续研制了双路 PJVS 系统。该系统总共由 6 个部分组成,分别是 PC 工控机、微波源、偏置电流源模块、电流放大模块、低温系统以及 SNS 型双路可编程约瑟夫森结阵,如图 2 所示。其中,工控机控制微波源以及

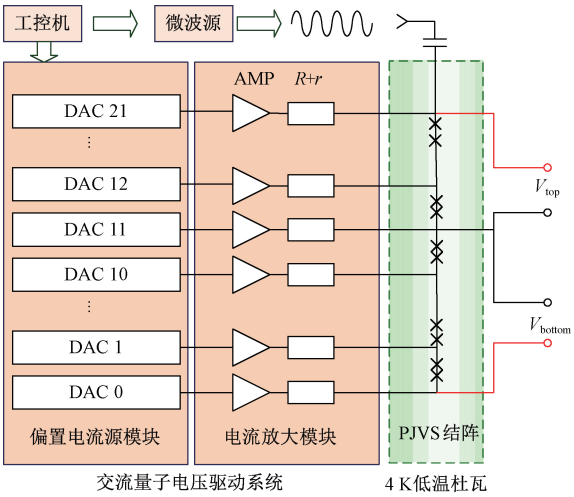


图 2　双路 PJVS 驱动装置

Fig.2　Dual PJVS driving device

式中:$n_{(i)}$ 为第 i 段约瑟夫森结阵分段的偏置状态,取值为 0 或±1;Int 为取整操作。合成的 62.5 Hz 的双路量子电压实测采样波形如图 3 所示。

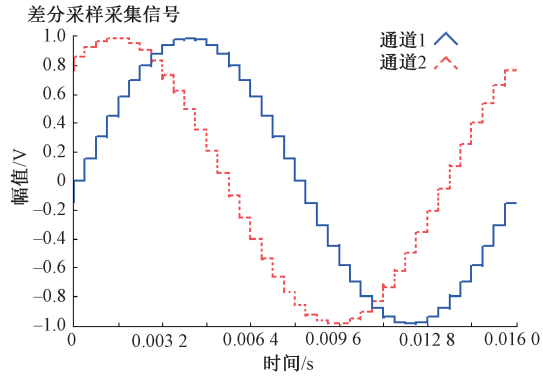


图 3　采样实测双路量子电压波形

Fig.3　Sampling measured double quantum voltage waves

偏置电流源,偏置电流源通过偏置电流放大模块对电流放大,R 为偏置电阻,r 为线阻与对地电阻之和。低温系统中存放的液氦能够为约瑟夫森结阵正常工作提供 4 K 低温环境。

根据约瑟夫森效应,当约瑟夫森结处于低温超导状态中,一定频率微波辐射在结上时,微波 n 次谐波与结辐射的电磁波发生共振,结可产生随着 n 改变而呈现台阶状的恒压电流。每个结阵分段可独立通过编程通入其对应大小为 0 或 $\pm Is$ 的台阶中心偏置电流,使结阵工作在零台阶或第 1 级 Shapiro 量子电压台阶,结阵第 i 分段输出的量子电压值 V_i 可由式(2)计算得出。

$$V_i = n\frac{h}{2e}N_{(i)} \times f_0 = n\frac{N_{(i)}}{K_{J-90}} \times f_0 \tag{2}$$

式中:h 为普朗克常数;e 为电子电荷;$N_{(i)}$ 是第 i 段结阵所含约瑟夫森结个数;f_0 为微波频率,K_{J-90} 为约瑟夫森常数(K_{J-90} = 483 597.9 GHz/V)。

2 V SNS 结阵分为 20 段共 61 204 个约瑟夫森结,结阵分段排列方式满足三进制的序列,且结阵在 DAC 11 的位置有一个公共的电压抽头作为 V_{bottom} 与 V_{top} 的公共低端。根据 SNS 型结阵的驱动原理以及结阵的分段结构特点,通过平衡三进制驱动算法编程控制所有分段的组合方式,交流量子驱动系统输出对应分段的偏置电流,结阵可以产生两路成比例的量子电压信号,将两路交流电压的周期 T 分成 N 等份,合成的交流量子电压信号由一系列台阶电压构成,两路量子电压的输出电压由式(3)所示。

$$\begin{cases} V_{bottom}(t) = \dfrac{f_0}{K_{J-90}} \times \mathrm{Int}\left[\sum_{i=1}^{9} n_{(i)}N_{(i)}\sin\left(\dfrac{2\pi}{N}\cdot t\right)\right] \\ V_{top}(t) = -\dfrac{f_0}{K_{J-90}} \times \mathrm{Int}\left[\sum_{i=10}^{20} n_{(i)}N_{(i)}\sin\left(\dfrac{2\pi}{N}\cdot t\right)\right] \end{cases} \tag{3}$$

尽管台阶波的每个台阶的电压是可精确计算的量子电压,由于存在过渡过程的影响,计算得到的交流量子电压有效值与实际 PJVS 输出的交流量子电压有效值并不相等。因此,只有位于平滑台阶上的双路量子电压构成的交流比例才具有量子精度,采用差分采样技术能够减小过渡过程的影响。

1.2　差分采样

差分采样是精密测量中最常用的方法,该方法可以有效抑制共模干扰的影响[11]。差分采样法通过对输入两个信号的差值进行采样,利用 PJVS 系统产生的近似正弦的台阶波信号与交流源产生的被测正弦电压信号差分采样,将差分采样信号加上相应的量子电压的台阶值,同时剔除位于过渡过程的采样数据,能够重构被测的正弦信号。

调节两路信号的相位使差分信号尽可能小,当正弦信号与台阶波信号相位相同,即正弦信号与台阶波信号的中心位置相交时,此时差分信号最小,如图 4 所示,图中左下角黑色的小框代表台阶波的过渡过程。

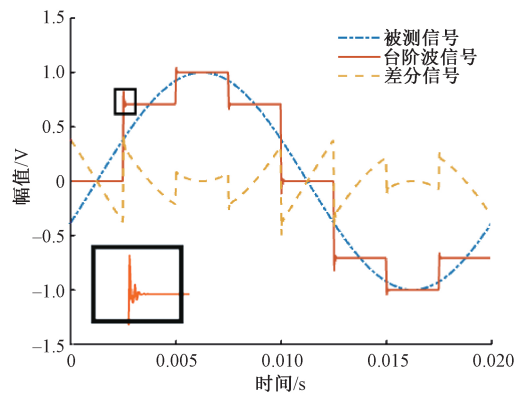


图 4　差分采样调相波形

Fig.4　Differential sampling phase modulation waveform

通过采样得到的正弦信号可以用式(4)表示。

$$y_j = \sin(h_1 \cdot j), j = [kM + s, kM + t - 1] \quad (4)$$

式中：$h_1 = 2\pi/L$；L 是一个周期的采样点数，$M = L/N$；N 为采样离散的台阶数；j 代表采样点序号，$k = 0, 1, \cdots, (N - 1)$；$s$ 与 t 代表每个台阶上去除过渡过程后的采样始终点，理想采样得到台阶波的信号可以用式(5) 表示。

$$z_j = \sin\left(h_2 \cdot \mathrm{Int}\left(\frac{j}{M}\right)\right) \quad (5)$$

式中：$h_2 = 2\pi/N$；通过快速傅里叶变换对 Z_j 计算，能够恢复基波的幅值与相位。

当被测电压在为 1 V 有效值内时，通常能够把差值信号调节到几十个 mV 以内，这种差分采样的优点是，数字表仅对差值电压进行采样，使得数字表自身噪声、量程误差和读数误差对被测信号的影响普遍降低了 2～3 个数量级，提高了恢复信号的可靠性与准确性。NIM 所设计的差分采样系统，在 1 V 60 Hz 情况下，两个通道电压幅值测量标准不确定度均为 0.3 μV/V，相位测量标准不确定度为 0.2 μrad[12]。

2 交流量子电压比例的验证

2.1 实验方案

采用商用 FLUKE 5 720 A 作为电压信号源输入至 IVD，通过双路 PJVS 系统产生两路交流量子电压信号，两路信号的比例与 IVD 标称比例对应。两路信号分别与 IVD 的前端输入与后端输出信号进行差分采样，通过测量得到 IVD 输出端与输入端的幅值与相位，计算 IVD 的比差与角差。具体测量方案如图 5 所示。

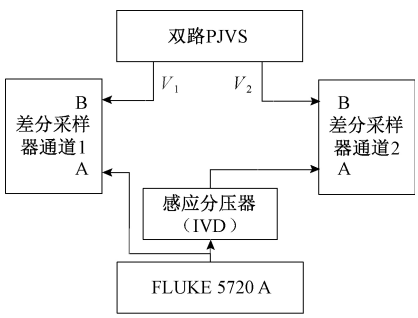


图 5 基于交流量子电压比例的 IVD 测量方案

Fig.5 IVD measurement scheme based on ac quantum voltage ratio

实验步骤分为两步：1) 使 FLUKE 5 720 A 输出特定幅值、相位与频率的电压源信号，通过其中一路 PJVS 产生与电压源信号对应的交流量子台阶波信号，两路信号同步于同一个时间基准，输入至差分采样通道 1，得到 IVD 输入端 V_I 的幅值与相位；同时，根据 IVD 标称比例，通过另一路 PJVS 输出对应的比例倍数的交流量子台阶信号，与 IVD 输出端信号接入差分采样通道 2，得到 IVD 输出端电压的 V_O 幅值与相位，分别计算 IVD 输出端与输入端的幅值之比和相位之差，测得 IVD 的比差与角差。2) 为了消除两块采样表的通道误差，交换两路差分信号输入至两个通道，得到交换后的比差与角差，取两次测量结果平均值作为当前频率点以及比例点的最终测量结果。为了验证 IVD 自校验法与基于交流量子电压比例测量法的一致性，采用计算 En 值来作为评估标准，如式(6) 所示。

$$E_n = \frac{|e_1 - e_2|}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} \quad (6)$$

式中：e_1 与 e_2 为两种方法测量误差；U_1 与 U_2 为两种测量方法的合成不确定度。

2.2 关键系统误差的分析与改进

双路 PJVS 所构建的量子电压比例标准，在信号检测和传输过程中，仍存在系统误差，例如引线负载参数的影响、PJVS 的过渡过程所引入的高次谐波影响、两个差分采样通道匹配不完全一致造成的影响。

1) 传输线路参数匹配

为了保证两路量子电压信号传输的一致性，需确保两路量子电压线路引线参数一致。双路量子电压比例采用并行走线的方式，通过同轴线路分布参数的匹配，可提高传输线的匹配程度；同时，为了满足测量线路的无定向特性，需在同轴交流测量线路中每个独立网孔中加入扼流圈。基于上述传输线匹配设计手段，可使得传输引线在交流比例测量中引入的标准不确定度不大于 5×10^{-8}。

2) PJVS 过渡过程

PJVS 过渡过程所引入的高次谐波成份，会造成交流比例误差，只有位于平滑台阶上的交流量子电压比例准确。因此，需尽可能降低 PJVS 台阶之间的过渡过程。

利用差分采样技术，理论上可选取理想台阶上的采样数据，通过快速傅里叶变换无偏地恢复信号幅值与相位。实验中由于过渡过程和采样通道噪声的影响，量子电压台阶采样数据存在一定的分散性。利用 3σ 准则对台阶上多组采样数据进行判定，剔除处于过渡过程的采样点，可实现更准确的测量。实际通过差分采样技术得到的测量结果，电压幅值绝对测量标准不确定度达到 0.3 μV/V[12]。

差分采样技术应用于交流量子电压比例技术，需进一步解决通道不一致性的影响。可通过通道换臂技术来提高交流比例电压测量精度。

3) 差分采样系统通道一致性

实验发现差分采样系统两个通道不一致性在 10^{-7} 量级。在测量与计算时，两个通道存在固定的零位差，通过

换臂后平均的方法可消除两个通道间的误差。采用不换臂单次测量的比例误差如式(7)所示。

$$e_s = \frac{V_O + \varepsilon_{2,O}}{V_I + \varepsilon_{1,I}} - \frac{V_O}{V_I} = \varepsilon_{2,O} - k\varepsilon_{1,I} \tag{7}$$

式中,V_I 与 V_O 代表接入差分系统的 IVD 的输入端与输出端信号;k 为标称比例值;$\varepsilon_{1,I}$ 与 $\varepsilon_{2,O}$ 分别代表通道 1 接 IVD 输入端差分的误差与通道 2 接 IVD 输出端差分的误差。

采用换臂法测量 IVD 输入与输出信号,得到的误差如式(8)所示。

$$e_d = \frac{1}{2}\left(\frac{V_O + \varepsilon_{2,O}}{V_I + \varepsilon_{1,I}} + \frac{V_O + \varepsilon_{1,O}}{V_I + \varepsilon_{2,I}}\right) - \frac{V_O}{V_I} = \frac{1}{V_I + 2\varepsilon_{1,I} + \Delta\varepsilon}(\varepsilon_{2,O} - k \cdot \varepsilon_{1,I} + \Delta\varepsilon) \tag{8}$$

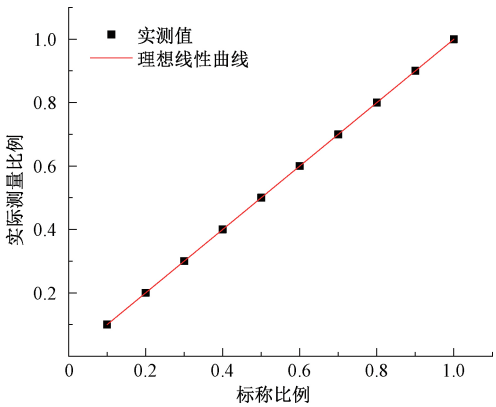
式中:$\Delta\varepsilon$ 为两个通道的通道差,即 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$;相较于单次不换臂测量,换臂后平均的误差得到了衰减。通过差分采样通道换臂的方法,采样通道不一致性在交流量子电压比例测量中引入的标准不确定度不大于 3×10^{-8}。

2.3　量子电压比例验证实验

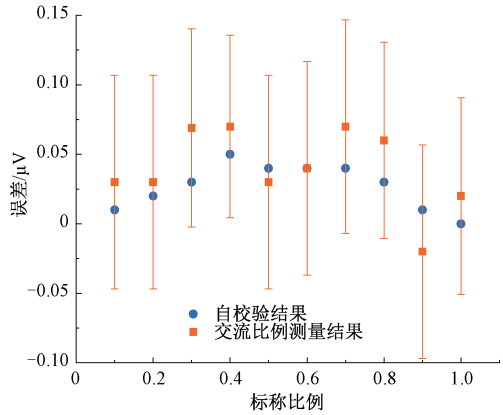
1)交流量子电压比例线性性验证

十进制 IVD 能够实现精准的 0.1~1.0 间十进位比例,通过 IVD 自校验修正后,具有极好的线性度,感应分压器比例校验精度优于 0.02 μV/V[13]。为避开工频干扰,选取在 62.5 Hz 下输出交流量子电压比例与 IVD 分压输出比例结果进行对比,实验结果如图 6 所示。受限于交流差分采样系统性能,所得结果中,比例输出点测量结果的 A 类测量不确定度不大于 0.06 μV/V,标准不确定度不大于 0.09 μV/V。

由图 6(a)可知,实测结果落在理想的交流比例输出曲线上;由图 6(b)可知,与感应分压器交流比例校验结果比对,两种方法在各个比例输出点的误差均优于 0.05 μV/V。根据式(6),采用 0.1 μV/V 作为十进制 IVD 自校验的标准不确定度,0.09 μV/V 作为交流量子比例测量的标准不确定度,通过计算得到 E_n 值的最大值为 0.09,远小于 1,从而证明交流量子电压比例测量方法的准确性。



(a) IVD比例线性度结果
(a) IVD ratio linearity result



(b) IVD自校验与交流比例测量结果
(b) IVD self-calibration and ac ratiomeasurement results

图 6　IVD 比例测量结果

Fig.6　IVD ratio measurement results

2)交流量子电压比例频率特性的验证

二进制分压器(binary IVD, BIVD)具有良好的宽频特性与比差稳定性[14],因此采用一个宽频二进制感分与交流量子电压比例系统在不同频率点进行交流比例进行比对。选取了 62.5、125、400 Hz 3 个频率点,测量与计算的结果如表 1、2 所示。

表 1　比差测量结果

Table 1　The measurement result of the ratio difference

频率/Hz	PJVS 比例测量比差/(μV/V)	A 类标准差/(μV/V)	BIVD 自校验结果/(μV/V)	E_n
62.5	−0.07	0.03	−0.07	0.00
125	−0.09	0.03	−0.08	0.00
400	−0.08	0.05	−0.05	0.01

表 2　角差测量结果

Table 2　The measurement result of the angle difference

频率/Hz	PJVS 比例测量角差/μrad	A 类标准差/μrad	BIVD 自校验结果/μrad	E_n
62.5	1.03	0.08	1.17	0.02
125	0.74	0.21	0.40	0.17
400	0.11	0.24	−0.11	0.11

由表 1 和 2 测量结果可知,采用 1 μV/V 作为 BIVD 自校验的标准不确定度,0.09 μV/V 作为交流量子比例测量的标准不确定度。比差测量中 E_n 值的最大值为 0.01,角差测量中 E_n 值的最大值为 0.17,均小于 1,说明在不同频率下两种方法校准的比差与角差具有良好的一致性,证明交流量子电压比例在 400 Hz 内具有较高的准确度;受线路分布参数的影响,400 Hz 下角差测量结果的

标准不确定度增大到最大 0.24 μrad,基于交流差分采样的交流比例测量技术仍保持良好的稳定性。

利用两路理想交流量子电压实现了精准的交流量子电压比例,通过实验比较验证,达到了传统基于感应耦合的比例器件 IVD 的精度。受限于目前基于差分采样技术的交流量子电压比例的测量手段,交流量子电压比例精度受到一定限制。但是相较于基于感应耦合的比例器件只能实现十进制或二进制特定的比例,交流量子电压比例可以构建任意比例和相位并且具有量子精度的交流比例输出,在未来电磁计量领域中具有重要应用价值。

3 交流量子电压比例的应用

国际上许多国家已经开展相应的研究工作,特别是德国 PTB 和美国 NIST,他们将交流量子电压应用于电学计量、热力学计量。PJVS 主要应用于测量仪器的校准和电压、功率基准的建立。德国、美国、加拿大和日本等国家均建立了量子电压与功率基准[15],AIST 将其应用于齐纳以及数字采样表的校准[16],PTB 将交流量子电压应用于交流阻抗电桥进行阻抗测量[9]、热电偶测量和 DAC 的校准[17-18]。2012 年,欧洲区域计量组织(EURAMET)启动了欧洲计量联合研究计划(EMRP),计划推行交流电桥数字化技术,特别是基于 PJVS 交流比例技术在阻抗电桥中的应用,共有 18 个国际计量组织参加了此项目。

基于所研制的 PJVS 的双路交流量子电压比例技术,NIM 未来计划开展功率测量以及交流阻抗电桥溯源相关应用研究。

3.1 功率测量

基于交流量子电压比例技术的功率测量与溯源,可增加功率测量系统的灵活性,并进一步提高功率参量的溯源精度。

2016 年,NIM 成功研制了单路 PJVS 系统[10],提出了电压、电流分时差分采样的方案,解决单路 PJVS 测量功率的问题。然而电压、电流分时测量无法保证电压、电流信号测量的同时性,时钟信号的抖动会对电压电流信号相位测量准确度产生影响。

采用双路 PJVS 系统,能够合成具有较高的幅值准确度和更优的相位同步性的双路交流量子电压比例,为功率的测量提供了有效的交流量子参考信号,拟采用的功率测量如图 7 所示。

3.2 交流阻抗电桥

通过将交流量子电压比例应用在四端对电容电桥中,能够实现任意阻抗精密量值传递,进一步提高交流阻抗的溯源能力。拟采用的基于四端对电桥的阻抗测量如图 8 所示。

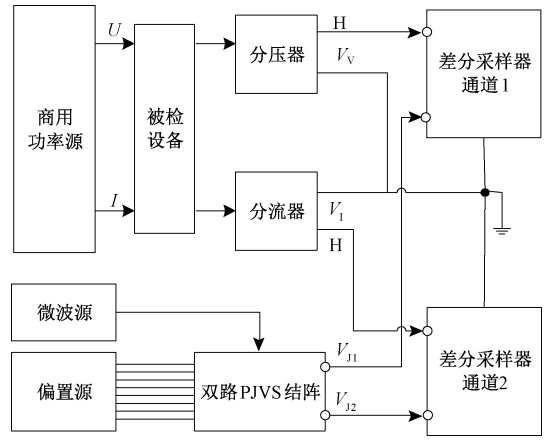


图 7 功率测量框

Fig.7 Power measurement

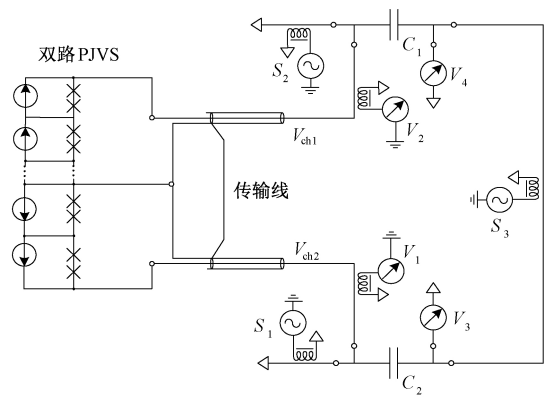


图 8 交流阻抗电桥测量

Fig.8 The ac impedance bridge measurement

采用交流量子电压比例技术,可降低传统阻抗电桥复杂度。并且利用交流量子电压比例特点,可实现任意阻抗(包括不同类型阻抗)的精密测量与比较,从而突破传统交流阻抗电桥只能实现固定比例、同类型阻抗比较的缺点。

4 结 论

本文基于双路量子电压合成与差分采样技术,实现了量子电压的交流比例的构建;设计了交流量子电压比例在不同比例点以及频率点测量 IVD 的比差与角差实验。采用双通道差分采样技术减小了台阶间过渡过程对量子电压幅值恢复的影响,结合通道换臂技术,实现量子电压比例的高精度测量,交流量子电压比例测量标准不确定度为 0.09 μV/V,交流量子电压比例输出精度优于 0.05 μV/V。通过与传统 IVD 比较,验证了交流量子电压比例的准确性。

最后本文讨论了交流量子电压比例技术在电磁计量领域中的应用。未来,基于 PJVS 的交流量子电压比例技术将向更高精度和频率发展,并且拓展了其在功率测量与阻抗比较等精密电磁计量领域中应用。

参考文献

[1] CUTKOSKY R D, SHIELDS J Q. The precision measurement of transformer ratios[J]. IRE Transactions on Instrumentation, 1960, 1-9(2): 243-250.

[2] CALLEGARO L, D′ ELIA V, TRINCHERA B. Realization of the farad from the dc quantum Hall effect with digitally-assisted impedance bridges[J]. Metrologia, 2010, 47(4): 464-472.

[3] NISSILÄ J, OJASALO K, KAMPIK M, et al. A precise two-channel digitally synthesized AC voltage source for impedance metrology [C]. Precision Electromagnetic Measurements, 2014, doi: 10.1109/CPEM.2014.6898612.

[4] OVERNEY F, JEANNERET B. RLC Bridge based on an automated synchronous sampling system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(7): 2393-2398.

[5] 曹文会, 李劲劲, 钟青,等. 用于电压基准的 Nb/Nb_xSi_(1-x)/Nb 约瑟夫森单结的研制[J]. 物理学报, 2012, 61(17): 28-32.
CAO W H, LI J J, ZHONG Q, et al. Development of Nb/Nb_xSi_(1-x)/Nb Josephson single junction for voltage reference [J]. Journal of Physics, 2012, 61(17): 28-32.

[6] 王曾敏, 高原, 李红晖. 建立新一代约瑟夫森电压基准——正弦量子电压信号的合成[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1965-1971.
WANG Z M, GAO Y, LI H H. Establishment of new type Josephson voltage standard in China-synthesis of AC quantum voltage [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 1965-1971.

[7] 王曾敏, 高原, 李红晖. 交流约瑟夫森电压合成装置的研究[J]. 计量学报, 2012, 33(2): 154-157.
WANG Z M, GAO Y, LI H H. Research of Josephson arbitrary waveform synthesizer[J]. Journal of Metrology, 2012, 33(2): 154-157.

[8] LEE J, SCHURR J, NISSILÄ J, et al. The Josephson two-terminal-pair impedance bridge [J]. Metrologia, 2010, 47(4): 453.

[9] HAGEN T, PALAFOX L, BEHR R. A Josephson impedance bridge based on programmable josephson voltage standards [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2017(99): 1-7.

[10] 刘志尧, 贾正森, 王磊, 等. 基于可编程 SNS 型约瑟夫森结阵的驱动系统研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(8):125-130.
LIU ZH Y, JIA ZH S, WANG L, et al. Research of driven system based on programmable SNS Josephson junction array [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(8):125-130.

[11] 刘长胜, 刘鹏, 曾新森, 等. 电磁法勘探中梯度场测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 886-894.
LIU CH SH, LIU P, ZENG X S, et al. Study on gradient measurement in electromagnetic exploration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 886-894.

[12] JIA ZH S, LIU ZH Y, WANG L, et al. Design and implementation of differential AC voltage sampling system based on PJVS[J]. Measurement, 125: 606-611.

[13] WANG W, YANG Y, HUANG L, et al. Establishing of a 1 000 V multi-decade inductive voltage divider standard at NIM[J]. IEEE Access, 2018, 99(6): 1-1.

[14] SHI ZH M, ZHANG J T, PAN X L, et al. Self-calibration and verification in phase angle errors of two voltage dividers at high frequencies [J]. IEEE Transsactions on Instrumentation & Measurement, 2019, 68(6): 2053-2059.

[15] DJOKIĆ B V. Low-frequency quantum-based ac power standard at NRC Canada [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62 (6): 1699-1703.

[16] MARUYAMA M, IWASA A, YAMAMORI H, et al. Calibration system for zener voltage standards using a 10 V programmable josephson voltage standard at NMIJ[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(6): 1-1.

[17] KIELER O F O, LANDIM R P, BENZ S P, et al. AC-DC Transfer standard measurements and generalized compensation with the AC Josephson voltage standard[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(4): 791-796.

[18] KURTEN W G, MOHNS E, BEHR R, et al. Characterization of a high-resolution analog-to-digital converter with a Josephson AC voltage source[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(2): 649-652.

作者简介

周天地,2013 年于中国计量大学获得学士学位,现为中国计量科学研究院硕士研究生,主要研究方向为约瑟夫森量子电压驱动系统及交流量子电压比例技术研究。

E-mail: 531201908@qq.com

Zhou Tiandi received his B.Sc. degree from China Metrology University in 2017. He is currently a master candidate at National Institute of Metrology, China. His main research interests include Josephson quantum voltage driving system and ac quantum voltage ratio technology.

贾正森(通信作者),分别在 2010 年和 2015 年于吉林大学获得学士学位和博士学位,现为中国计量科学研究院副研究员,主要研究方向为可编程约瑟夫森量子电压和基于量子电压的交流电压和功率测量。

E-mail: jiazs@nim.ac.cn

Jia Zhengsen (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Jilin University in 2010 and 2015, respectively. Now, he is an associate research fellow in National Institute of Metrology, China. His main research interests include programmable Josephson voltage standard and quantum-based ac voltage and power measurement.