第 49 卷 第 1 期：440-447 高电压技术 Vol.49, No.1: 440-447
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221569

基于可编程量子电压的量测应用及误差分析

周 峰[1]，殷小东[1]，刁赢龙[1]，李 冬[2]，段梅梅[3]，聂 琪[1]
（1. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074；2. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074；
3. 国网江苏省电力有限公司营销服务中心，南京 210019）

摘 要：为提高量子电压精密测量技术在电力系统的适用性，开展了基于可编程量子电压的量测应用及误差研究，首先，研究了基于可编程约瑟夫森量子电压的量子标准 A/D 方案，理论推导了量子标准 A/D 的误差模型，仿真分析了量子标准 A/D 的参数优化设计原则；然后，提出自适应量子差分采样控制方法，基于离散傅立叶变换(discrete Fourier transform，DFT)推导了实现最优差分采样的量子电压幅值和相位理论计算式；最后，提出基于可编程约瑟夫森量子电压的电子式互感器校验仪溯源方法，并开展了仿真及硬件试验验证。试验结果表明：量子标准 A/D 测量的不确定度达到 10^{-6} 量级，自适应差分采样控制方法能够快速实现量子电压幅值和相位的精准控制，该文提出的校验仪溯源方法的测量不确定度水平相比传统溯源方法提升了 5 倍。研究成果可为电力系统的量子化量测应用及溯源提供参考。

关键词：量子电压；量子标准 A/D；离散傅立叶变换；差分采样；误差分析；电子式互感器校验仪

Measurement Application and Error Analysis Based on Programmable Quantum Voltage

ZHOU Feng[1], YIN Xiaodong[1], DIAO Yinglong[1], LI Dong[2], DUAN Meimei[3], NIE Qi[1]
(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science &Technology, Wuhan 430074, China;
3. Marketing Service Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: In order to improve the applicability of the quantum voltage precision measurement technology in the field of power system measurement, the measurement application and error research based on programmable quantum voltage were carried out in this paper. Firstly, the quantum standard A/D scheme based on programmable Josephson quantum voltage was studied, the error model of quantum standard A/D was theoretically derived, and the parameter optimization design principle of quantum standard A/D was simulated and analyzed. Then, an adaptive quantum differential sampling control method was proposed, and the quantum voltage amplitude and phase theory calculation formula for optimal differential sampling was derived based on discrete Fourier transform (DFT). Finally, an electronic transformer calibrator traceability method based on programmable Josephson quantum voltage was proposed, and simulation and hardware tests were carried out. The test results show that the quantum standard A/D measurement uncertainty reaches 10^{-6}, and the adaptive differential sampling control method can quickly realize the precise control of quantum voltage amplitude and phase, and the measurement uncertainty level of the electronic transformer calibrator traceability method proposed in this paper is 5 times higher than that of the traditional traceability method. The research of this paper can provide a reference for the quantization measurement application and traceability of power system.

Key words: quantum voltage; quantum standard A/D; discrete Fourier transform; differential sampling; error analysis; electronic transformer calibrator

0 引言

随着约瑟夫森电压效应的推广应用，直流量子电压标准已经取代传统韦斯顿电池成为直流电压基准，并逐渐向可编程量子电压标准和脉冲驱动型量子电压标准发展[1-3]。可编程量子电压标准技术目前相对较为成熟，用于合成交流量子电压和直流电压，电压幅值高达 10 V，频率高达 1 kHz[4-5]。早期，可编程量子电压标准主要基于数字采样方法应用于热电转换器或模数转换器的交流有效值测量，但由于

基金资助项目：国家电网公司科技项目 (5700-202218217A-1-1-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5700-202218217A-1-1-ZN).

偏置电流动态过程和微波功率等影响，可编程量子电压标准在 60 Hz 及以上交流电压的测量不确定度难以优于 10^{-6}[6-7]。

德国联邦物理技术研究院(PTB)和美国国家标准与技术研究院(NIST)在 21 世纪初成功研制了 10 V 可编程量子电压标准装置和 2 V 脉冲驱动量子电压标准，并先后提出一种差分采样方法[8-9]，即利用高准确度数字多用表对量子正弦台阶电压与标准正弦交流电压的差分信号进行采样，剔除量子台阶过渡过程的动态采样点，重构出标准正弦交流电压信号，使 1 kHz 以下的交流电压测量不确定度达到 10^{-8}~10^{-7} 量级[4,10]。差分采样技术在国际上被广泛应用，促进了量子电压在交、直流电压溯源及 50 Hz 和 60 Hz 电力计量领域的应用，包括阻抗、功率、模数转换装置、标准电压源和标准数字多用表等校准[11-14]。我国量子电压研究起步相对较晚，前期主要是中国计量院在量子差分采样控制策略及测量准确度方面开展了研究，准确度最高达到 10^{-6} 量级[15-17]，基于量子精密测量技术的溯源应用尚处于研究阶段[18-20]。随着电力系统数字化量测的推广应用，传统计量标准逐渐被数字化计量标准所取代，其模拟量值溯源的核心是 A/D 转换，现有的 A/D 或精密测量仪表的测量准确度通常仅为 0.01%，限制了数字化计量标准的准确度水平提升，例如我国电力系统中互感器、合并单元、数字化电能表等数字化计量设备的校验装置及其他数字校验装置，准确度最高为 0.01%，仅能够满足现阶段 0.2 级现场计量设备的溯源需求，无法满足更高准确度的电子式互感器、新型传感器或量子传感器的溯源。近年来，我国开展了电力系统的谐波电压[21]、电压比例[22]和电子式互感器校验仪[23]等量子化溯源应用及相关研究[24-25]。量子电压具有准确度高和量值随时随地复现等特征，基于量子电压的精密测量技术有望解决现有数字化量测准确度受限的问题。

本文针对基于可编程量子电压的通用量子标准 A/D 方案进行研究，理论推导及仿真分析了主要误差来源及参数设计原则，提出了一种基于离散傅立叶变换(discrete Fourier transform，DFT)的自适应量子差分采样控制方法，可适用于电力系统中无锁相条件下的交流正弦信号的量子精密测量。基于上述研究，本文提出电子式互感器校验仪的量子化溯源方案，通过试验验证，幅值测量不确定度相比现有水平降低 5 倍。

1　量子标准 A/D 方案

约瑟夫森量子电压效应[2]是指当频率为 f 的微波辐射在“超导–绝缘(金属)–超导”结构的约瑟夫森结上，在约瑟夫森结中注入直流偏置电流时会产生 Shapiro 量子电压台阶，当注入 0 mA 或$\pm I_0$的偏置电流时，使约瑟夫森结工作在零台阶或第 1 级 Shapiro 量子电压台阶，结两端会产生 0 V 或$\pm u_0$的量子电压，其中 u_0 为微伏级的单个约瑟夫森结电压，该量子电压仅与微波频率和约瑟夫森常数相关。可编程量子电压标准采用 x 段二进制排列的约瑟夫森结串联，采用多通道偏置电流驱动，通过控制各通道偏置电流为 0 mA 或$\pm I_0$，合成近似正弦交流波形的交流量子电压台阶波形[3,26]，如图 1 所示。

在恒定的微波和交变的多通道偏置电流的激励下，可实现交流量子电压台阶波形的频率、幅值和相位调节。目前，国内外普遍基于差分采样技术实现量子电压精密测量及溯源应用。基于差分采样的量子电压精密测量原理如图 2 所示。从工作原理上，该装置可看作一种具有量子电压准确度的标准 A/D 模块，能够实现“模拟量–量子电压–数字量”的高准确度量值传递，从而实现模拟信号的量子精密测量。

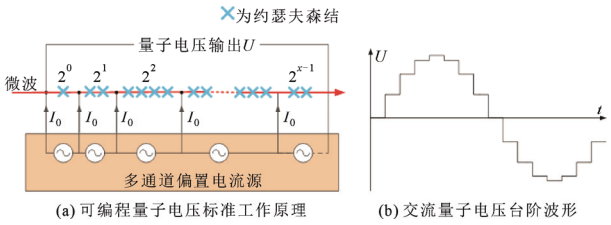


图 1　可编程量子电压原理及交流量子电压台阶波形

Fig.1　Principles of programmable quantum voltage and AC quantum voltage step waveform

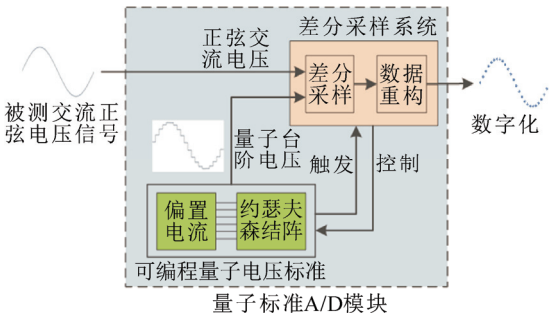


图 2　基于差分采样的量子电压精密测量原理框图

Fig.2　Principle block diagram of quantum voltage precision measurement based on differential sampling

为了提升量子电压精密测量的准确度，需要确保交流量子电压波形与被测交流电压波形的幅值相近，且两者在交流量子电压台阶的中间位置相交使差分信号幅值最小化[16]，达到理想的差分采样，如图 3 所示。在可编程量子电压标准输出的过零触发脉冲参考下，依次在量子电压的台阶中间时刻对差分信号进行采样，再将每个差分采样数据与对应采样时刻的交流量子电压台阶值叠加，重构出被测交流正弦电压的标准离散采样值。

差分信号 ΔU 和重构的被测交流正弦离散采样值 U'函数如式(1)所示[10,16]。

$$\begin{cases} U_{\mathrm{pj}} = u_0 \times \mathrm{Int}[\sqrt{2}U/u_0 \times \sin(2\pi n/N)] \times (1+\varepsilon_{\mathrm{pj}}) \\ U_{\mathrm{ac}} = \sqrt{2}U\sin(2\pi n/N + \Delta\varphi) \times (1+\varepsilon_{\mathrm{ref}}) \\ \Delta U = U_{\mathrm{ac}} - U_{\mathrm{pj}} \\ U' = \Delta U \times (1+\varepsilon_{\mathrm{ds}}) + u_0 \times \mathrm{Int}[\sqrt{2}U/u_0 \times \sin(2\pi n/N)] \end{cases} \tag{1}$$

式中：U_{pj} 为交流量子电压；$\varepsilon_{\mathrm{pj}}$ 为量子电压误差；U_{ac} 为被测的交流正弦电压；$\varepsilon_{\mathrm{ref}}$ 为被测交流正弦电压误差，同时也是被测交流正弦电压与交流量子电压的相对误差；U 为交流量子电压和交流正弦电压的有效值；U'为差分采样后重构的被测交流正弦电压采样值；$\varepsilon_{\mathrm{ds}}$ 为差分采样误差；Int[*]为取整函数；$\Delta\varphi$ 为交流正弦电压偏离交流量子电压台阶中间位置的相位差；N 为每周期差分采样点数或交流量子电压的台阶数，可表示为采样频率；n 为差分采样点的序号，n=0，1，2，…，N。

为便于离散傅立叶分析，对式(1)取整函数 Int[*]进行近似处理，假设 $\varepsilon_{\mathrm{Int}}$、$\varphi_{\mathrm{Int}}$ 为取整函数对交流量子电压的幅值和相位的影响，其主要取决于最小量子电压分辨率 u_0、被测交流正弦电压幅值 U 和差分采样频率 N。对 U'进行离散傅立叶变换，得到被测交流正弦的基波信号 U'_{b}、基波信号有效值 U'_{br}，量子标准 A/D 的幅值误差 ε 和相位误差 φ 如式(2)所示。

本文采用德国 PTB 的 10 V 可编程量子电压方案，量子电压最小分辨率 u_0=145 μV，由于受硬件噪声限制，小信号时差分采样误差较大，假设 $\varepsilon_{\mathrm{ds}}$=$10^{-3}$，经过仿真分析，当 u_0≤250 μV，N≥10，U≥0.05 V 时，u_0、N 和 U 变化对量子电压精密测量误差 ε 和 φ 的影响最大为 2×10^{-7} 和 0.03 μrad，即在较宽的差分采样率范围和被测交流正弦电压范围内，量子标准 A/D 的误差较小。量子电压误差 $\varepsilon_{\mathrm{pj}}$ 为 10^{-9} 量级，其对量子标准 A/D 的误差影响可忽略不计。因此，量子标准 A/D 的误差 ε 和 φ 主要取决于差分采样误差 $\varepsilon_{\mathrm{ds}}$、交流量子电压与被测交流正弦电压的相对误差 $\varepsilon_{\mathrm{ref}}$ 和相对相位 $\Delta\varphi$。

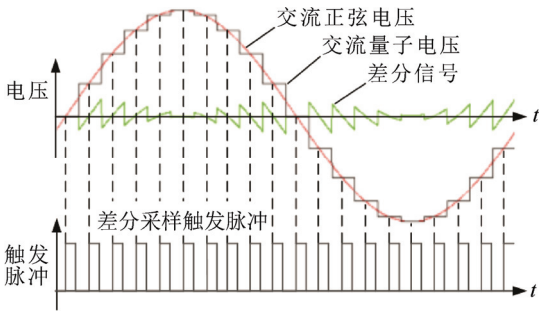
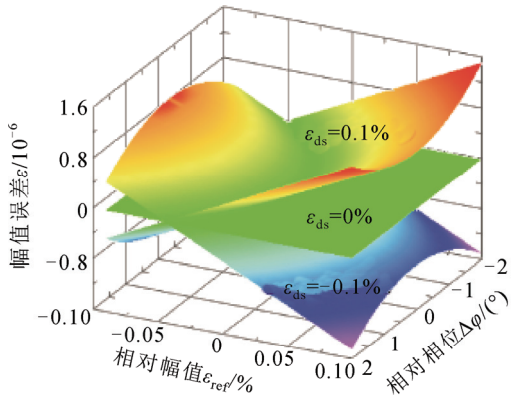


图 3 理想量子差分采样及采样触发脉冲

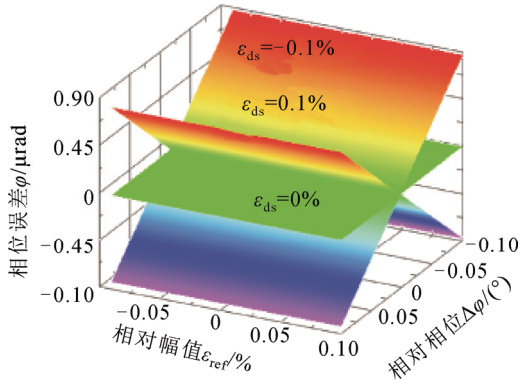
Fig.3 Ideal quantum differential sampling and sampling trigger pulse

$$\begin{cases} U'_{\mathrm{b}} = \dfrac{\sqrt{2}N}{2}U\left(\begin{array}{l}(1+\varepsilon_{\mathrm{ref}})(1+\varepsilon_{\mathrm{ds}})\sin\Delta\varphi - (1+\varepsilon_{\mathrm{Int}})(\varepsilon_{\mathrm{pj}}+\varepsilon_{\mathrm{ds}}+\varepsilon_{\mathrm{pj}}\varepsilon_{\mathrm{ds}})\sin\varphi_{\mathrm{Int}} + \\ \mathrm{j}((1+\varepsilon_{\mathrm{ref}})(1+\varepsilon_{\mathrm{ds}})\cos\Delta\varphi - (1+\varepsilon_{\mathrm{Int}})(\varepsilon_{\mathrm{pj}}+\varepsilon_{\mathrm{ds}}+\varepsilon_{\mathrm{pj}}\varepsilon_{\mathrm{ds}})\cos\varphi_{\mathrm{Int}})\end{array}\right) \\ U'_{\mathrm{br}} = U\sqrt{\begin{array}{l}(1+\varepsilon_{\mathrm{ref}})^2(1+\varepsilon_{\mathrm{ds}})^2 + (1+\varepsilon_{\mathrm{Int}})^2(\varepsilon_{\mathrm{pj}}+\varepsilon_{\mathrm{ds}}+\varepsilon_{\mathrm{pj}}\varepsilon_{\mathrm{ds}})^2 - \\ 2(1+\varepsilon_{\mathrm{ref}})(1+\varepsilon_{\mathrm{ds}})(1+\varepsilon_{\mathrm{Int}})(\varepsilon_{\mathrm{pj}}+\varepsilon_{\mathrm{ds}}+\varepsilon_{\mathrm{pj}}\varepsilon_{\mathrm{ds}})(\sin\Delta\varphi\sin\varphi_{\mathrm{Int}}+\cos\Delta\varphi\cos\varphi_{\mathrm{Int}})\end{array}} \\ \varepsilon = \dfrac{U'_{\mathrm{br}} - U(1+\varepsilon_{\mathrm{ref}})}{U(1+\varepsilon_{\mathrm{ref}})} = \dfrac{\sqrt{\begin{array}{l}(1+\varepsilon_{\mathrm{ref}})^2(1+\varepsilon_{\mathrm{ds}})^2 + (1+\varepsilon_{\mathrm{Int}})^2(\varepsilon_{\mathrm{pj}}+\varepsilon_{\mathrm{ds}}+\varepsilon_{\mathrm{pj}}\varepsilon_{\mathrm{ds}})^2 - \\ 2(1+\varepsilon_{\mathrm{ref}})(1+\varepsilon_{\mathrm{ds}})(1+\varepsilon_{\mathrm{Int}})(\varepsilon_{\mathrm{pj}}+\varepsilon_{\mathrm{ds}}+\varepsilon_{\mathrm{pj}}\varepsilon_{\mathrm{ds}})(\sin\Delta\varphi\sin\varphi_{\mathrm{Int}}+\cos\Delta\varphi\cos\varphi_{\mathrm{Int}})\end{array}}}{(1+\varepsilon_{\mathrm{ref}})} - 1 \\ \varphi = \dfrac{\pi}{2} - \arctan\dfrac{(1+\varepsilon_{\mathrm{ref}})(1+\varepsilon_{\mathrm{ds}})\cos\Delta\varphi - (1+\varepsilon_{\mathrm{Int}})(\varepsilon_{\mathrm{pj}}+\varepsilon_{\mathrm{ds}}+\varepsilon_{\mathrm{pj}}\varepsilon_{\mathrm{ds}})\cos\varphi_{\mathrm{Int}}}{(1+\varepsilon_{\mathrm{ref}})(1+\varepsilon_{\mathrm{ds}})\sin\Delta\varphi - (1+\varepsilon_{\mathrm{Int}})(\varepsilon_{\mathrm{pj}}+\varepsilon_{\mathrm{ds}}+\varepsilon_{\mathrm{pj}}\varepsilon_{\mathrm{ds}})\sin\varphi_{\mathrm{Int}}} - \Delta\varphi \end{cases} \tag{2}$$

假设 N=80，U=1 V，对量子标准 A/D 的误差影响量进行仿真，结果如图 4 所示。仿真结果表明，$\varepsilon_{\mathrm{ds}}$ 越小，量子标准 A/D 的误差 ε 和 φ 越小，幅值误差与 $\varepsilon_{\mathrm{ref}}$ 和 $\cos\Delta\varphi$ 呈线性关系，相位误差 φ 与 $\varepsilon_{\mathrm{ds}}$ 呈线性关系且斜率受 $\Delta\varphi$ 影响。根据仿真结果，当被测交流正弦电压与交流量子电压的相对幅值误差不超过±0.1%，相对相位不超过±0.1°，保证量子标准 A/D 的幅值误差和相位误差优于 10^{-6} 和 1 μrad。通过合



(a) 幅值误差



(b) 相位误差

图 4　量子标准 A/D 的误差仿真分析

Fig.4　Error simulation analysis of quantum standard A/D

理设计 ε_{ds}、ε_{ref} 和 $\Delta\varphi$ 参数，量子标准 A/D 的测量准确度可提升至 10^{-7} 量级，其测量准确度远超传统的 A/D 芯片。

2　自适应差分采样控制方法

为使差分信号幅值最小化，需要交流量子电压与被测交流电压的幅值和相位相近，现有差分采样控制方法依赖于标准信号源的锁相同步功能[23-28]或通过反馈调节实现同相控制[29-30]。本文提出一种基于离散傅立叶变换的自适应量子差分采样控制方法，实现幅值和相位未知的被测交流信号的自适应量子精密测量，提高量子标准 A/D 在电力系统的适用性，其原理如图 5 所示。

假设 ε_{ref} 和 $\Delta\varphi$ 为交流量子电压与被测交流信号的相对幅值和相对相位，假设忽略取整函数 Int[*] 和量子电压误差 ε_{pj} 的影响，取 10 个整周期信号进行离散傅立叶分析，则差分信号可表示为

$$\Delta U=\sqrt{2}U((1+\varepsilon_{ref})\sin(2\pi n\times 10/N+\Delta\varphi)-\sin(2\pi n\times 10/N)) \tag{3}$$

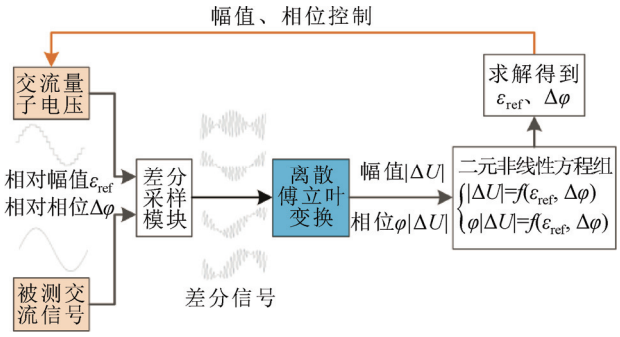


图 5　自适应差分采样控制原理

Fig.5　Adaptive differential sampling control principle

通过离散傅立叶变换理论推导差分信号的基波幅值|Δ*U*|和相位 $\varphi(\Delta U)$计算式

$$\begin{cases}|\Delta U|=\sqrt{2}U\sqrt{(1+\varepsilon_{ref})^2-2(1+\varepsilon_{ref})\cos\Delta\varphi+1}\\ \varphi(\Delta U)=\dfrac{\pi}{2}-\arctan\dfrac{(1+\varepsilon_{ref})\cos\Delta\varphi-1}{(1+\varepsilon_{ref})\sin\Delta\varphi}\end{cases} \tag{4}$$

通过对差分信号数据进行傅立叶计算得到|Δ*U*|和 $\varphi(\Delta U)$，合理设置 ε_{ref} 和 $\Delta\varphi$ 的边界限制条件，通过求解式(4)中二元非线性方程组，计算出 ε_{ref} 和 $\Delta\varphi$，再通过控制可编程量子电压波形的幅值和相位，使差分信号幅值最小化，实现图 4 中最优的量子标准 A/D 测量准确度。图 6 所示为量子差分采样过程中相对幅值和相对相位的自适应控制准确度的仿真结果，假设 *U*=1 V，*N*=80，仿真结果表明，在 ε_{ref}=±10% 和 $\Delta\varphi$=±170°的较宽范围内，相对幅值 ε_{ref} 和相对相位 $\Delta\varphi$ 的测量误差分别优于±13×10⁻⁶ 和±3.3 μrad，能够实现交流量子电压与被测交流正弦电压的幅值误差和相位误差的精准测量和调节。

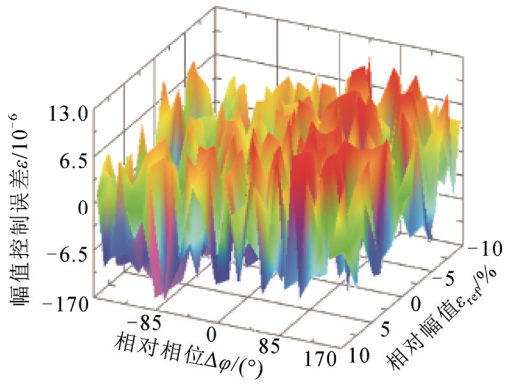
实际测量应用中，由于受差分采样误差、仪器分辨率及系统分辨率的影响，难以保证 ε_{ref} 和 $\Delta\varphi$ 同时达到最小化，因此，需要合理设计 ε_{ref} 和 $\Delta\varphi$，使差分信号幅值|Δ*U*|达到最小。对式(4)中的|Δ*U*|函数求导，令 $\mathrm{d}|\Delta U|/\mathrm{d}\varepsilon_{ref}=0$，可得|Δ*U*|极小值下 ε_{ref} 和 $\Delta\varphi$ 的关系。

$$\varepsilon_{ref}=\cos\Delta\varphi-1 \tag{5}$$

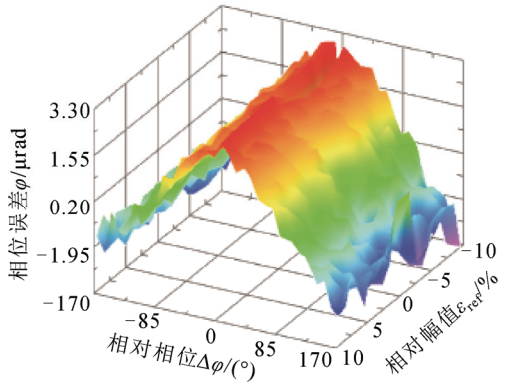
由式(5)可以看出，ε_{ref} 和 $\cos\Delta\varphi$ 呈现线性关系，该关系也体现在图 4 所示的幅值误差仿真结果中，如图 7 所示。因此，在实际测量应用中，通过适当调节交流量子电压与被测交流信号的相对幅值 ε_{ref} 和相对相位 $\Delta\varphi$，使其满足式(5)，获得最佳的量子标准 A/D 准确度。

3　基于量子电压的溯源应用及试验验证

为解决互感器和合并单元校验设备的准确度



(a) 幅值控制误差



(b) 相位误差

图 6 自适应采样控制误差分析

Fig.6 Error analysis of adaptive sampling control

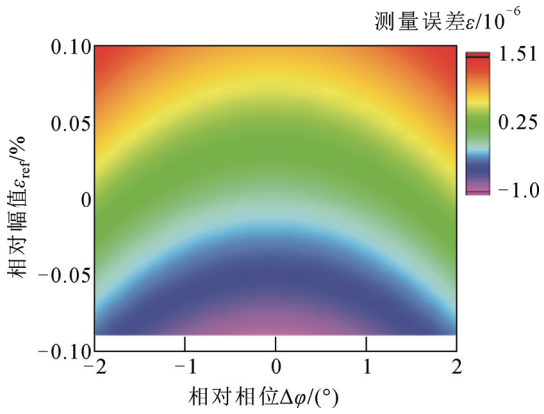


图 7 同一量子标准 A/D 误差下 ε_{ref} 和 $\Delta\varphi$ 的关系

Fig.7 Relationship between ε_{ref} and $\Delta\varphi$ under the same quantum standard A/D error

受限于 A/D 采样准确度的问题，本文提出基于量子电压的电子式互感器校验仪溯源方法，如图 8 所示。标准信号源、感应分压器和量子标准 A/D 组成电子式互感器校验仪的校准装置(以下简称“校准装置”)，其中量子标准 A/D 取代了现有溯源方案中的 8 位半数字多用表，用于实现高准确度的 A/D 转换。校准装置提供具有标准幅值误差 ε_0 和标准相位误差 φ_0 的标准模拟电压和标准数字电压。电子式互

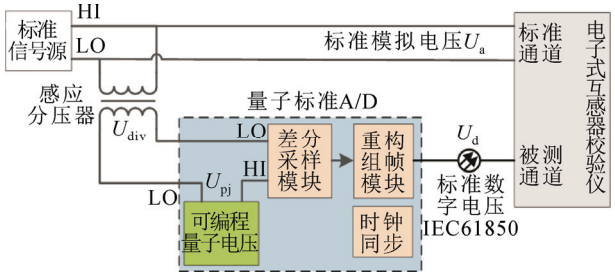


图 8 基于量子电压的电子式互感器校验仪溯源方法

Fig.8 Traceability method of electronic transformer calibrator based on quantum voltage

感器校验仪测量校准装置输出的两路标准电压并计算出两者的相对幅值误差和相位误差，其与标准幅值误差和标准相位误差的偏差即为电子式互感器校验仪的测量误差。

对电子式互感器校验仪溯源过程进行理论分析，推导校准装置的幅值误差 ε_{cd} 和相位误差 φ_{cd}

$$\begin{cases}\varepsilon_{cd}=1+\varepsilon_0-((1+\varepsilon_{dv})(1+\varepsilon_{ds})-\\ \qquad\dfrac{\varepsilon_{ds}(1+\varepsilon_{pj})(1+\varepsilon_{Int})}{(1+\varepsilon_{vref})})(1+\varepsilon_0+\varepsilon_{da})\\ \varphi_{cd}\approx 1.08t_1+\varphi_{dv}+\varphi_{da}\end{cases}\tag{6}$$

式中：ε_{vref} 为标准信号源的幅值误差；ε_{dv} 和 φ_{dv} 为感应分压器的幅值误差和相位误差；ε_0 为校准装置设定的标准幅值误差；ε_{da} 和 φ_{da} 为重构组帧模块的幅值误差和相位误差，其主要包括 IEC61850 组帧引入的量化误差，对于 IEC61850−9−2LE 协议，假设一次电流值为 2500 A 时，其量化误差分别为 5×10^{-6} 和 0.017′，可忽略不计；t_1 为时钟同步和差分采样延时引入的误差。

校准装置的相位误差主要取决于 t_1 和 φ_{dv}。对校准装置幅值误差中各单变量影响进行仿真，校准装置幅值误差对差分采样误差、量子电压误差和标准信号源幅值误差不敏感，影响量最大约 4×10^{-8}，可忽略不计。因此，校准装置幅值误差主要对重构组帧模块和感应分压器的幅值误差较为敏感且呈现接近 1:1 的反比例关系。在高准确度溯源应用中，重构组帧的量化误差将是溯源准确度提升的主要限制因素。通过合理选取时钟同步装置和感应分压器，使校准装置误差提升至 10^{-6} 量级，满足电子式互感器校验仪的量值溯源需求。为验证量子标准 A/D 方案和溯源方法的可行性，在实验室搭建了硬件验证平台，采用 Fluke 5730A 作为标准信号源，8 位半数字多用表 3458A 作为差分采样模块，交流电压标准

Guildline 7410 作为可编程量子电压模拟装置，可根据设定输出交流台阶波形，利用 FPGA 硬件实现重构组帧模块和时钟同步模块，同步误差为 100 ns，选取某厂家 0.05 级电子式互感器校验仪作为试品。设置交流正弦电压和量子电压峰值为 1 V，信号频率 f 为 50 Hz，每个台阶波形周期台阶数为 N=64。为验证自适应差分采样控制准确度，设定交流量子电压与被测交流信号的相对幅值分别为 0.1%、1%、±10%、±50%和 100%，相对相位分别为 0、±1°、±10°、±100°、±150°，测量结果如图 9 所示。自适应差分采样控制方法能够满足较宽范围内的幅值和相位调节，幅值误差优于±0.5%，相位误差优于±0.2°。由于受信号源波动、非同步及算法边界条件影响，实测数据与仿真结果存在一定差异，在相对幅值和相对相位较小时，误差相对较大。

量子标准 A/D 测量交流信号结果如图 10 所示。

量子标准 A/D 与 3458A 的测量结果相差 40 μV，两者测量的标准偏差分别为 3×10^{-6} 和 1.5×10^{-5}。量子标准 A/D 的测量准确度和稳定性相对较好。

根据标准设备及被测校验仪的测量示值引入的标准不确定度分量对溯源过程中的不确定度进行评定。被测校验仪的幅值误差和相位误差模型如式(7)所示。

$$\begin{cases}\varepsilon_{\mathrm{q}}=\varepsilon_{\mathrm{i}}-(\varepsilon_0+\varepsilon_{\mathrm{cd}})\\ \varphi_{\mathrm{q}}=\varphi_{\mathrm{i}}-(\varphi_0+\varphi_{\mathrm{cd}})\end{cases}\tag{7}$$

式中：ε_{i} 和 φ_{i} 为被测校验仪的幅值误差和相位误差测量示值。根据式(8)计算幅值误差和相位误差的合成标准不确定度 u_{c} 和测量不确定度 $U(k=2)$。

$$\begin{cases}u_{\mathrm{c}}=\sqrt{\sum_{\mathrm{i}=1}^{N}[\dfrac{\partial f}{\partial x_{\mathrm{i}}}]^2u_{\mathrm{i}}{}^2}\\ U=ku_{\mathrm{c}},\ \ k=2\end{cases}\tag{8}$$

式中：$\partial f/\partial x_{\mathrm{i}}$ 为式(7)中幅值误差和相位误差函数对各误差变量的偏导；$u(x_{\mathrm{i}})$ 为各误差来源的标准不确定度分量；k 为包含因子。电子式互感器校验仪溯源的不确定度主要来源于被测校验仪测量示值、感应分压器、重构组帧模块、同步时钟等引入的标准不确定度，各不确定度分量见表 1。

根据式(8)计算电子式互感器校验仪溯源的幅值误差测量不确定度为 1.27×10^{-5}(k=2)，相位误差测量不确定度为 0.11′(k=2)，本文提出的溯源方法与现有溯源方法的比较见表 2。

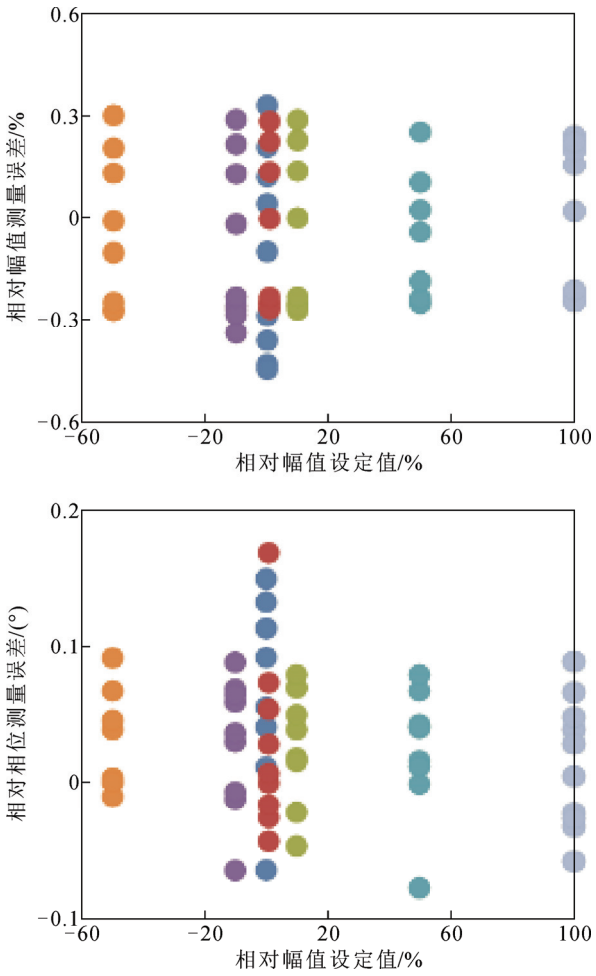


图 9　自适应差分采样控制误差测量结果

Fig.9　Measurement results of adaptive differential sampling control error

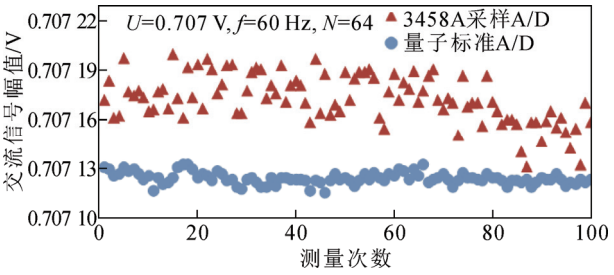


图 10　量子标准 A/D 与 3458A 的测量性能对比试验结果

Fig. 10　Measurement Performance Comparison Test Results of Quantum Standard A/D and 3458A

量子电压溯源方法的主要误差影响量由现有方案的 A/D 转换为感应分压器，提升了其准确度上限，量子溯源方法的幅值误差测量不确定水平提高了 5 倍。量子电压溯源方法的相位误差测量不确定度水平提高不显著，主要是同步时钟波动导致不能完全保证在量子电压台阶中间差分采样，从而引起相位的波动，可采用铷钟基准来保证系统同步性能。

表 1 校验仪溯源的不确定度来源及标准不确定度分量

Table 1 Uncertainty source and standard uncertainty component of calibrator traceability

标准不确定度	不确定度来源	概率分布	不确定度分量	
			幅值误差/10^{-6}	相位误差/(′)
u_1	被测校验仪	均匀	3	0.003
u_2	感应分压器	正态	5	0.017
u_3	重构组帧模块	正态	2.5	0.054
u_4	同步时钟	正态		0.009

表 2 两种溯源方法的比较

Table 2 Comparison of two traceability methods

技术指标/特性	A/D 直接采样方法	量子溯源方法
标准误差类型	模拟微差	数字微差
主要误差影响量	A/D 感应分压器	感应分压器 时钟同步
数字量溯源方式	A/D 采样	量子差分采样 数据重构
幅值误差测量不确定度(k=2)/10^{-5}	6.8	1.26
相位误差测量不确定度(k=2)/(′)	0.26	0.11

4 结论

1）理论推导了量子标准 A/D 的交流测量误差模型，其主要误差来源于差分采样误差 ε_{ds}、量子电压与被测电压的相对幅值 ε_{ref} 和相对相位 $\Delta\varphi$。ε_{ds} 越小，量子标准 A/D 的误差越小，其幅值误差与 ε_{ref} 和 $\cos\Delta\varphi$ 呈线性关系，相位误差与 ε_{ds} 呈线性关系且斜率受 $\Delta\varphi$ 影响。合理设计 ε_{ds}、ε_{ref} 和 $\Delta\varphi$ 参数，量子标准 A/D 的误差可达到 10^{-7} 量级。

2）提出自适应差分采样控制方法，基于 DFT 推导了差分信号的幅值$|\Delta U|$和相位 $\varphi(\Delta U)$与量子电压与被测电压的相对幅值 ε_{ref} 和相对相位 $\Delta\varphi$ 的理论公式，可理论计算量子电压与待测交流电压的相对幅值和相位，理论计算误差分别优于$\pm(13\times10^{-6})$和 ±3.3 μrad，适用于电力系统中无锁相条件下的交流正弦信号的量子精密测量。

3）提出基于量子电压的电子式互感器校验仪溯源方法并搭建硬件验证平台，量子标准 A/D 测量交流电压的标准偏差为 3×10^{-6}，测量不确定度为 1.27×10^{-5} 和 0.11′(k=2)，测量不确定度相比现有溯源方法有较大的提升。

参考文献 References

[1] HAMILTON C A. Josephson voltage standards-a review[C] // Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Conference Digest. CPEM 2000. Sydney, Australia: IEEE, 2000: 335-336.

[2] BENZ S P, HAMILTON C A. Application of the Josephson effect to voltage metrology[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(10): 1617-1629.

[3] 朱 珠，康 焱，王 路，等. 量子电压的发展及应用[J]. 宇航计测技术，2018，38(1)：12-17.
ZHU Zhu, KANG Yan, WANG Lu, et al. Development and application of quantum voltage[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2018, 38(1): 12-17.

[4] BENZ S. Synthesizing accurate voltages with superconducting quantum-based standards[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2010, 13(3): 8-13.

[5] KOHLMANN J, SCHULZE H, BEHR R, et al. 10 V SINIS Josephson junction series arrays for programmable voltage standards[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(2): 192-194.

[6] BURROUGHS C J, RUFENACHT A, BENZ S P, et al. Error and transient analysis of stepwise-approximated sine waves generated by programmable Josephson voltage standards[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(7): 1322-1329.

[7] BURROUGHS C J, RUFENACHT A, BENZ S P, et al. Systematic error analysis of stepwise-approximated AC waveforms generated by programmable Josephson voltage standards[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 761-767.

[8] BEHR R, PALAFOX L, RAMM G, et al. Direct comparison of Josephson waveforms using an AC quantum voltmeter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(2): 235-238.

[9] RUFENACHT A, BURROUGHS C J, BENZ S P, et al. Precision differential sampling measurements of low-frequency synthesized sine waves with an AC programmable Josephson voltage standard[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 809-815.

[10] RUFENACHT A, BURROUGHS C J, DRESSELHAUS P D, et al. Differential sampling measurement of a 7 V RMS sine wave with a programmable Josephson voltage standard[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(6): 1587-1593.

[11] BENZ S P, BURROUGHS C J, DRESSELHAUS P D, et al. An AC Josephson voltage standard for AC–DC transfer-standard measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(2): 239-243.

[12] BURROUGHS C J, BENZ S P, DRESSELHAUS P D, et al. Development of a 60 Hz power standard using SNS programmable Josephson voltage standards[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(2): 289-294.

[13] PALAFOX L, BEHR R, IHLENFELD W G K, et al. The Josephson-effect-based primary ac power standard at the PTB: progress report[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 1049-1053.

[14] GEORGAKOPOULOS D. Uncertainties in the measurement of AC voltage using a programmable Josephson voltage standard and a phase-sensitive null detector[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(7): 2178-2183.

[15] WANG Z M, GAO Y, LI H H, et al. Research on differential sampling method with 10 Volt programmable Josephson voltage standard at NIM[C] // 2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Qingdao, China: IEEE, 2015: 703-707.

[16] 陆祖良，杨 雁，黄 璐，等. 正弦波电压差分测量与多周期策略——阶梯波研究之三[J]. 计量学报，2019，40(2)：319-328.
LU Zuliang, YANG Yan, HUANG Lu, et al. Differential measurement of sine wave voltage and multi-period strategy[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(2): 319-328.

[17] 贾正森，王　磊，刘志尧，等. 基于量子技术的交流电压幅值测量准确度研究[J]. 电测与仪表，2018，55(1)：98-101，108.
JIA Zhengsen, WANG Lei, LIU Zhiyao, et al. The accuracy research of AC voltage amplitude measurement based on quantum technologies[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(1): 98-101, 108.

[18] 贾正森，王　磊，张江涛，等. 交流约瑟夫森量子电压在电磁计量中的应用[J]. 计量科学与技术，2020(8)：44-50，60.
JIA Zhengsen, WANG Lei, ZHANG Jiangtao, et al. Application of AC Josephson quantum voltage in electromagnetic measurement[J]. Metrology Science and Technology, 2020(8): 44-50, 60.

[19] 贾正森，王　磊，徐熙彤，等. 基于约瑟夫森量子电压的交流功率测量系统及方法研究[J]. 计量学报，2020，41(4)：469-474.
JIA Zhengsen, WANG Lei, XU Xitong, et al. Research on AC power measurement system and method based on Josephson quantum voltage[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(4): 469-474.

[20] 段梅梅，赵双双，徐　晴，等. 基于量子电压的数字化电能量值传递应用技术研究[J]. 电测与仪表，2022，59(2)：100-104.
DUAN Meimei, ZHAO Shuangshuang, XU Qing, et al. Research on digital electrical energy value transmission application technology based on quantum voltage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 100-104.

[21] 徐熙彤，贾正森，王　磊，等. 基于约瑟夫森量子电压的谐波电压测量方法研究[J]. 计量学报，2020，41(3)：311-316.
XU Xitong, JIA Zhengsen, WANG Lei, et al. Research on harmonic voltage measurement method based on Josephson quantum voltage[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(3): 311-316.

[22] 周天地，贾正森，杨　雁，等. 基于 PJVS 的交流量子电压比例研究[J]. 仪器仪表学报，2020，41(2)：85-92.
ZHOU Tiandi, JIA Zhengsen, YANG Yan, et al. Research on AC quantum voltage ratio based on PJVS[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 85-92.

[23] WU R Y, HU H L, LI D, et al. Research on the scheme and experiment of quantum-voltage-based verification device for the transformer calibrator[C]// The proceedings of the 16th Annual Conference of China Electrotechnical Society. Singapore: Springer, 2022: 1106-1118.

[24] 李　进，赵仁勇，杜伯学，等. 量子化学计算在高压直流绝缘领域中的应用进展[J]. 高电压技术，2020，46(3)：772-781.
LI Jin, ZHAO Renyong, DU Boxue, et al. Application progress of quantum chemical calculation in the field of HVDC insulation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 772-781.

[25] 高锋阳，李昭君，袁　成，等. 量子计算和免疫优化算法相结合的有源配电网故障定位[J]. 高电压技术，2021，47(2)：396-405.
GAO Fengyang, LI Zhaojun, YUAN Cheng, et al. Fault location for active distribution network based on quantum computing and immune optimization algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 396-405.

[26] HAMILTON C A, BENZ S P, BURROUGHS C J, et al. SNS programmable voltage standard[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1997, 7(2): 2472-2475.

[27] GAO Y, LI H H, WANG Z M, et al. 1 V programmable Josephson voltage standard and its applications at NIM[C]// 2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). Qingdao, China: IEEE, 2015: 708-712.

[28] SCHUBERT M, STARKLOFF M, LEE J, et al. An AC Josephson voltage standard up to the kilohertz range tested in a calibration laboratory[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(6): 1620-1626.

[29] 贾正森，王　磊，刘志尧，等. 一种基于量子技术的交流功率差分测量系统及方法：106771556B[P]. 2019-02-22.
JIA Zhengsen, WANG Lei, LIU Zhiyao, et al. A system and method for differential measurement of AC power based on quantum technology: 106771556B[P]. 2019-02-22.

[30] REUVEKAMP P G, MALMBEKK H, IRELAND J, et al. Software-assisted phase locking technique for programmable Josephson voltage standard[C]// 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM). Denver, USA: IEEE, 2020: 1-2.



周　峰
1980—，男，博士，教授级高工
主要从事高电压比例标准、数字化计量和量子量测技术方面的研究工作
E-mail: zhoufeng@epri.sgcc.com.cn

ZHOU Feng
Ph.D., Professor



聂　琪(通信作者)
1991—，男，硕士，工程师
主要从事高电压大电流计量技术、数字化计量技术、直流互感器校验和量子电压溯源应用方面的研究工作
E-mail: 1196541453@qq.com

NIE Qi
Corresponding author

收稿日期　2022-09-20　修回日期　2022-12-01　　编辑　卫李静