

量子电压标准综述：研究现状、应用及发展趋势

王保帅¹, 麻滨麒², 肖勇³, 胡珊珊¹, 宋宏天¹, 刘小虎², 赵伟², 李世松²

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东省广州市 510663; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市海淀区 100084; 3. 广东省电网智能量测与先进计量企业重点实验室, 广东省广州市 510663)

Review on Quantum Voltage Standards: Status, Applications and Trends

WANG Baoshuai¹, MA Binqi², XIAO Yong³, HU Shanshan¹, SONG Hongtian¹,
LIU Xiaohu², ZHAO Wei², LI Shisong²

(1. China Southern Power Grid Research Institute, Guangzhou 510663, Guangdong Province, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Measurement and Advanced Metering of Power Grid, Guangzhou 510663, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Unlike traditional artifact voltage standards, quantum voltage standards are linked to fundamental physical constants and thus have advantages for voltage metrology, such as high accuracy and stability. This paper reviews the discovery of the Josephson effect and the process of establishing DC quantum voltage standards, focuses on combining the basic principles, issues, as well as applications of AC quantum voltage standards, including both the programmable Josephson voltage standard and the pulse-driven Josephson voltage standard, and compares the performance and applications of these two AC quantum voltage standards. In particular, in view of the importance of accurate electric energy measurement, two AC power standards based on quantum voltage are introduced. Finally, the future development trends and application prospects of quantum voltage standards are prospected.

KEY WORDS: quantum voltage standard; programmable Josephson voltage standard; Josephson effect; AC voltage standard

摘要: 不同于传统的实物电压标准, 量子电压标准与基本物理常数直接关联, 因此具有准确度高、稳定性好等优势。该文回顾发现约瑟夫森效应以及直流量子电压标准建立的过程, 重点梳理可编程约瑟夫森交流电压标准和脉冲驱动型约瑟夫森交流电压标准的基本原理、存在的问题和应用现状, 并对这两种交流量子电压标准的性能和适用范围进行比较。鉴于准确计量电能的重要性, 特别介绍目前国际上基于交流量子电压标准构建的两种交流功率标准。最后, 对量子电压标准的未来发展方向和应用前景进行展望。

基金项目: 广东省科技计划项目(2021B1212050014); 南方电网公司科技项目(SEPRI-K22B088)。

Guangdong Provincial Science and Technology Plan Project (2021B1212050014); Science and Technology Project of CSG (SEPRI-K22B088)。

关键词: 量子电压标准; 可编程约瑟夫森电压标准; 约瑟夫森效应; 交流电压标准

0 引言

电压的单位伏特, 是使用最为广泛的电磁学单位之一^[1]。在国际单位制(international system of units, SI)下, 电压单位伏特的定义是: 在载有 1 安培(A)恒定电流导线的两点间消耗 1 瓦特(W)的功率, 这两点间的电位差就是 1 伏特(V)^[2]。其中, 电流的单位安培(A), 最初是在 1948 年召开的第九届国际计量大会上被定义的, 具体为: 真空中, 在两条无限长、截面积可忽略、相距 1 m 的平行导线中通以相同大小的电流, 当每米导线的受力为 2×10^{-7} 牛顿(N)时, 导线中电流的大小即为 1 安培(A)。而功率的单位 W, 则是由千克(kg)、米(m)和秒(s)直接导出的。

为了便捷地进行直流电压的量值传递, 20 世纪 70 年代前, 各国的国家级电学实验室均采用一组经过严格挑选的饱和标准电池的电动势的平均值来保存本国的电压单位^[3]。但这种用实物基准保存直流电压标准量值的方法存在诸多局限性, 其中最大的一个问题是其量值与温度、湿度等环境因素存在关联性, 这些因素长期作用, 会使标准电池的电压量值发生难以预测的变化^[4-5]。在当时, 不同国家的电压实物基准之间的国际比对结果的一致性约为 10^{-6} , 明显落后于基本单位 kg、m、s 的 10^{-8} 的复现一致性^[6]。

在交流电压标准方面, 各国计量机构均采用热

电转换器实现交流电压向直流电压的溯源^[7], 其原理是向热电转换器分别施加被校准的交流电压和标准的直流电压, 使其在其发热丝上产生的热量相同, 从而建立标准直流电压与被测交流电压有效值之间的等价关系, 继而实现直流标准电压对交流电压的校准。采用热电转换法, 可在 10 Hz~1 MHz 频率范围内对交流电压进行校准。然而, 在热电效应、趋肤效应和低频热脉动效应等影响下^[8], 热电转换器在交流、直流两种情况下的输出电压值会存在偏差, 继而影响电压量值的溯源和校准水平。

20 世纪下半叶, 约瑟夫森效应(Josephson effect)的发现, 打开了量子电磁测量的大门, 也为交直流电压准确溯源提供了新的思路。基于约瑟夫森效应研制的约瑟夫森电压标准, 输出电压仅与约瑟夫森常数($K_J=2e/h$, e 和 h 分别为电子电荷量和普朗克常数)和施加微波的频率相关, 相比于原来的实物电压基准, 测量不确定度减小了至少 3 个量级, 即从 10^{-6} 减小至 10^{-9} 量级^[9-10]。但在当时, 由普朗克常数 h 和电子电荷量 e 所决定的约瑟夫森常数 K_J 的准确性仅为 10^{-7} 量级^[11], 这成为限制量子电压标准广泛应用的瓶颈。为解决这一问题, 国际计量委员会于 1990 年启用一套独立的电学计量单位体系, 该体系采用约定的约瑟夫森常数(取固定值为 483 597.9 GHz/V, 无测量不确定度), 它的量值是根据当时最精密的物理实验测量结果确定的。1990 电学计量单位体系的确立, 虽然解决了当时面临的约瑟夫森量子电压高稳定性和低准确性导致其难以实际应用的困境, 但也造成电磁学测量单位体系与国际单位制的脱钩。为了消除 1990 电学计量单位体系与国际单位制的不一致, 需要重新精确测量 h 、 e 的 SI 量值, 直到测量结果的不确定度满足量子计量的需求时, 就可对 1990 电学计量单位体系中采用的约定值进行替换。为此, 1990 年之后, 各国计量科学家长期进行了不懈的努力。

2017 年, 国际科学与数据委员会(The Committee on Data for Science and Technology, CODATA)对加拿大国家计量院(National Research Council Canada, NRC)、美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)、法国国家计量院(Laboratoire national de métrologie et d'essais, LNE)提供的功率天平实验测量结果以及由德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)和日本

国家计量院(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)主导的硅球法测量结果进行加权平均得到普朗克常数 h 的平均值, 再根据 h/e^2 的精密关联关系计算出了 e 的量值^[12]。

2018 年 11 月 13 日, 第 26 届国际计量大会在法国凡尔赛隆重开幕, 会议通过关于采用基本物理常数定义 SI 基本单位的 1 号决议^[13]。至此, 国际单位制 SI 的 7 个基本单位, 就全部实现由基本物理常数来定义, 包括对电压在内的一系列电学物理量的精密测量, 从此步入量子化新时代。

基于上述背景, 本文梳理约瑟夫森量子电压标准的发展历程, 从基本原理、尚未解决的问题以及实际应用等方面, 阐述交流量子电压标准和交流功率标准的构建方法, 并探讨量子电压标准的未来发展和应用前景。

1 约瑟夫森效应及直流量子电压标准

1962 年, 英国物理学家 B.D. Josephson 从理论层面研究了结构为超导体-绝缘层-超导体(superconductor-insulating barrier-superconductor, SIS)的隧道结上可能发生的物理现象, 并预言存在约瑟夫森效应^[14]。次年, 约瑟夫森效应被 P.W. Anderson 和 J.M. Rowell 的实验研究所证实^[15]。

约瑟夫森效应分为直流约瑟夫森效应和交流约瑟夫森效应。当结构为 SIS 的隧道结两端的电压为 0 时, 电子对能够穿越该隧道结, 产生直流超导电流, 保持这一现象的最大电流称为临界超导直流电流。这种允许非零的直流电流通过且保持隧道结两端电压为零的性质, 就被称为直流约瑟夫森效应, 如式(1)所示:

$$I = I_c \sin \phi \quad (1)$$

式中: ϕ 为超导电极的两个宏观波函数之间的相位差; I_c 为隧道结的临界直流电流; I 为流过隧道结的直流超导电流。

而如果在隧道结两端施加一恒定电压, 则隧道结中将被激发出高频交流超导电流, 且该高频交流超导电流的频率 f 与隧道结的绝缘层两端施加的恒定电压 U 之间存在如下关系:

$$f = \frac{2e}{h} \times U = K_J \times U \quad (2)$$

由式(2)可知, 交流超导电流的频率与加在隧道结绝缘层两端的电压成正比, 这便是交流约瑟夫森效应, 通常将具有该特性的隧道结称为约瑟夫森结。

量子电压标准的建立过程,与式(2)所描述的物理过程相反,即采用频率为 f 的微波去辐射约瑟夫森结时,其两端会产生直流电压 U 。具体地,当约瑟夫森结受到频率、功率恒定的微波辐射时,约瑟夫森结的 $I-U$ 特性曲线将呈现出电压台阶的特征,如图1所示。上述特征是被英国物理学家Shapiro首次发现的^[16]。图1中电压台阶对应的电压量值是可以精确计算出的,其计算表达式为

$$U = \frac{h}{2e} \delta f = \frac{\delta}{K_J} f \quad (3)$$

式中: f 为微波频率,可溯源至准确性极高的原子钟时间基准^[17]; δ 表示约瑟夫森结所处量子电压台阶的编号,而台阶编号的选定取决于流经约瑟夫森结的直流电流的大小和方向:设 I_0 为第一个正的量子电压台阶中心对应的偏置电流,则当流经约瑟夫森结的直流电流 $I_J = -I_0$ 时, δ 取-1;当 $I_J = 0$ 时, δ 为0; $I_J = I_0$ 时, δ 为+1。

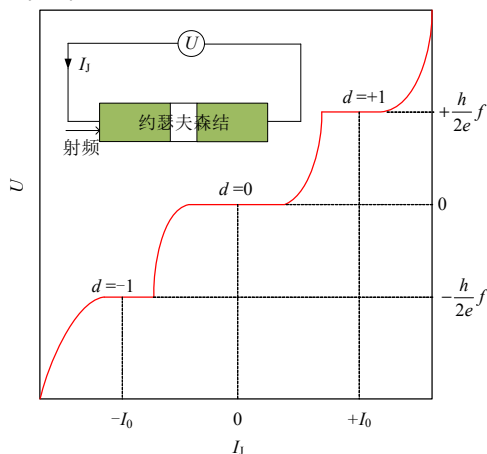


图1 约瑟夫森结的 $I-U$ 特性曲线

Fig. 1 $I-U$ characteristic curve of a Josephson junction

由式(3)可知,约瑟夫森结本质上是一个频率-电压转换器。

起初,人们使用单个约瑟夫森结来建立量子电压标准。但单个约瑟夫森结产生的量子电压量值太小,只有mV量级,难以广泛应用于对常见电压量值的溯源和校准^[18]。1977年Levinson等人发现,在小电流偏置的条件下,用微波对弱阻尼型约瑟夫森结进行辐照时,约瑟夫森结会产生横跨电压轴的零电流台阶^[19],这使得将约瑟夫森结做大规模串联以构成约瑟夫森结阵成为了可行^[20-21]。此外,计量科学家们还在电路优化设计、不同材料特性研究、微加工与薄膜沉积技术性能提升等方面做出了很多努力,为后续构建大规模约瑟夫森结阵、建立交流量子电压标准打下了坚实基础^[22]。

1984年,美国国家标准局(National Bureau of Standards, NBS,即美国国家标准和技术研究院NIST的前身)和德国联邦物理技术研究院(PTB)联合研制出世界上第一个集成串联多个SIS隧道结的约瑟夫森结阵,并成功建立1V直流量子电压标准^[19]。1987年,世界上第一个电压量值达10V的约瑟夫森直流量子电压标准成功建立^[22]。第77届国际计量委员会决定,自1990年1月1日起,采用基于约瑟夫森结阵器件构建的量子电压标准取代原来的电压实物标准,正式完成了电压单位伏特从实物标准到自然基准的过渡^[23]。

我国于1990年开始研制约瑟夫森电压标准,并根据国际计量委员会设定的约瑟夫森常数约定值来复现和保存电压的单位伏特(V);1993年,中国计量科学研究院建立了1V约瑟夫森结阵直流电压标准,其1V电压下的测量不确定度达 6×10^{-9} ^[24];1999年,中国计量科学研究院又建立了10V约瑟夫森直流量子电压标准装置,其10V电压下的测量不确定度为 5.4×10^{-9} ^[25],即我国所建立的1V和10V直流量子电压标准均达到国际先进水平。

2 交流量子电压标准

直流量子电压标准广泛应用后,计量科研人员开始着手研制交流量子电压标准^[26]。目前,交流量子电压标准的构建主要有两种技术方案,分别是可编程约瑟夫森电压标准(programmable Josephson voltage standard, PJVS)和脉冲驱动型约瑟夫森电压标准,它们均采用非回滞的约瑟夫森结^[27]。下文将对这两种交流量子电压标准从工作原理、存在的问题以及应用价值3个方面进行阐述。

2.1 可编程约瑟夫森电压标准

2.1.1 基本原理

可编程约瑟夫森电压标准PJVS是由NIST的Hamilton等学者于1995年提出并构建的。PJVS所使用的约瑟夫森结阵由多个子结阵构成,子结阵中所包含约瑟夫森结的个数服从二进制或三进制排序规律,而且每一个子结阵的输出电压均由独立的直流偏置电流源控制。由式(3)可知,PJVS首先可在不同偏置电流($-I_0$, 0或 $+I_0$)和约瑟夫森结结数组合下,产生特定数值的直流量子电压,用作直流电压标准。其次,利用PJVS按时序产生不同幅值的量子电压台阶,可以产生近似被测交流电压的阶梯波波形,继而构建出交流量子电压标准信号^[28]。

PJVS 合成交流电压的步骤和过程是：对待合成的交流电压信号进行二进制或三进制编码，所得编码决定着每个时刻各约瑟夫森子结阵的偏置状态；将上述编码传送给上位机，通过指令去执行，以控制各子结阵上的直流偏置电流源，按照编码约定的子结阵偏置状态给相应各子结阵施加偏置电流；进而，所有子结阵会在确定的时刻输出量子电压台阶，而上述量子电压台阶的串联结果，即为最终合成的约瑟夫森交流量子电压。图 2 是一种约瑟夫森子结阵个数服从二进制排序规律的 PJVS 的系统结构原理示意图^[29]。

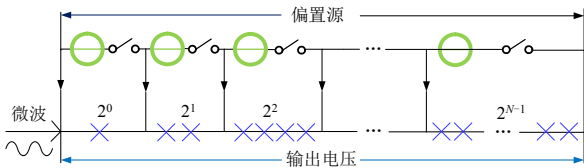


图 2 PJVS 系统的原理结构图

Fig. 2 Schematic diagram of PJVS system

假设一共有 N 个约瑟夫森子结阵，则第 k 个子结阵包含的约瑟夫森结的个数为 2^{k-1} ，PJVS 合成的总电压 U 可由下式进行计算，即：

$$U = \frac{h}{2e} f \sum_{k=1}^N 2^{k-1} \delta_k \quad (4)$$

式中 δ_k 代表第 k 个子结阵的偏置状态，其值可取 0, +1 和 -1。

制作可编程约瑟夫森电压标准的约瑟夫森结有 3 种结构^[20]：一是超导体-绝缘层-超导体结构，再并联一个电阻；二是超导体-金属-超导体结构 (superconductor-normal metal-superconductor, SNS)；三是超导体-绝缘层-金属-绝缘层-超导体结构 (superconductor-insulator-normal metal-insulator-superconductor, SINIS)。其中，第一种结构由于还需要再并联电阻，制造工艺复杂，使用很少；而 SNS 和 SINIS 结构本身就具备过阻尼条件，即相应的 $I-U$ 特性曲线是非回滞的，意味着能够快速、准确选择量子电压台阶，因此得到广泛应用。

2.1.2 存在的问题及解决办法

当前，PJVS 系统在直流标准电压产生(-10 V 至 10 V) 技术方面已相对成熟，但在通过台阶波产生交流标准量子电压信号方面仍存在一些问題，有待更深入研究并加以解决，以进一步推动 PJVS 系统的成熟化发展和扩大应用。

1) 过渡过程和吉布斯效应对电压测量结果准确性的影响。

在使用 PJVS 合成交流量子电压波形过程中，两个量子电压台阶切换时，不可避免地存在 μs 量级的过渡过程；另外，若采用带抗混叠滤波器的模数转换器测量阶梯波电压，采样数据中会存在吉布斯效应^[30]，如此，每个量子电压台阶两端处受到过渡过程和吉布斯效应影响的采样数据已不具备量子电压的准确性，而只有靠近电压台阶中心平稳区的采样数据才具备量子电压的准确度。

图 3 展示的是 PJVS 合成输出的电压阶梯波的实测波形，从放大的子图中能看到，量子电压台阶切换时，由过渡过程和吉布斯效应造成了电压采样数据的波动。目前，为消除过渡过程和吉布斯效应对电压测量准确性的影响，一种常规的解决办法是丢弃电压台阶两端非平稳区的采样数据，而仅利用电压台阶上中间平稳区的采样数据来对被测电压信号进行重构。上述方法实施过程中，首先应解决的问题是如何准确筛选出电压台阶上属于平稳区的采样数据，因为，若将夹杂有过渡过程和吉布斯效应的采样数据归入了可用的采样数据范畴，或舍弃了部分处于平稳区段的采样数据，都可能使后续测量的准确性下降。文献[31]仅保留每个量子电压台阶中心附近的一段采样数据，以用于完成对被测正弦交流信号的重构及其有效值的计算；文献[30]提出一种基于片段采样的台阶电压采样数据筛选方法，即：首先预设台阶电压的平均值，并计算该电压台阶所有采样数据与该平均值的差值，通过观察该差值的分布确定电压平稳区间，再基于该电压平稳区间得到新的该台阶电压的平均值，如此不断迭代，直至上述的差值的波动程度近似不变为止；文献[32]提出了一种基于 3σ 准则对量子电压台阶平稳区采样数据进行筛选，从而实现了以更精准量子电压量值为标准的电压精密测量方法，其原理是：将电压台阶上的所有采样数据组成一个数组，剔除

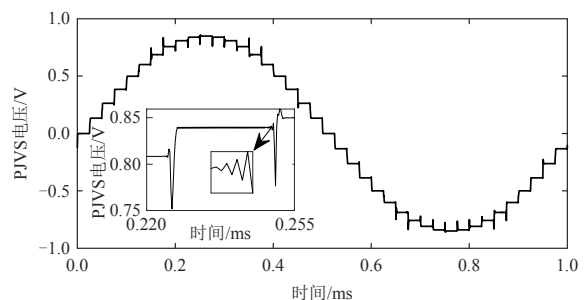


图 3 PJVS 合成输出的阶梯波电压的实测波形

Fig. 3 A measured waveform of the stepped wave voltage by PJVS

数组中偏差超过3倍标准差(σ)的数据,并不断迭代至数据长度不变为止;文献[33]提出一种由量子电压台阶中心双向延拓并最小化A类测量不确定度的平稳区与过渡区的判据,利用该判据,可自动识别量子电压台阶的平稳区与过渡区,切实提升了以PJVS合成输出的电压阶梯波复现交流电压量值的准确性。

2) PJVS合成电压频带受限。

由于PJVS是基于开关切换方式进行电压合成的,而台阶切换时必然存在过渡过程,这致使目前利用PJVS所能合成交流标准电压的频率仅能达到几kHz^[21]。随着新型电力系统的快速建设,电网中出现了大量高次谐波、间谐波干扰成分,因此,对宽频电压(高达百kHz)实施准确测量的实际需求越来越迫切。而PJVS仅限于合成低频量子电压,直接利用它,不足以支撑对宽频电压的精密测量。如何基于PJVS输出的足够稳定且准确的低频电压去实现对宽频电压的测量,已成为量子电磁测量领域前沿研究的热点问题之一。

文献[34]提出一种相关子采样方法,其原理如图4所示,其中 $V_{AC}(T_n)$ 代表被校准的高频正弦电压, $V_{PJVS}(T_s)$ 是由PJVS合成输出的正弦型阶梯波电压,而Sampled V_{AC} 代表的是与PJVS合成输出的正弦型阶梯波电压的包络同频率的正弦电压。通过建立被校准高频正弦电压信号的频率与PJVS合成输出的正弦型阶梯波电压信号频率之间的关系式,就可实现以PJVS合成输出的较低频率正弦型阶梯波电压对被测高频正弦电压的校准。文献[34]的作者以物理实验测试证实,该方法在100kHz频率范围内是可行的;文献[35]同样基于相关子采样的思想,将以交流量子电压表精密测量交流电压的频带扩展到100kHz。

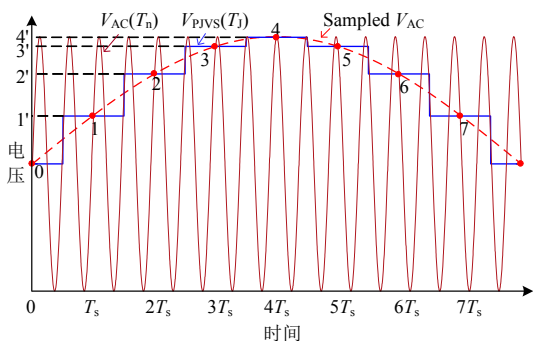


图4 基于相关子采样的扩频技术

Fig. 4 Schematic diagram of extending the frequency range of PJVS by coherent subsampling

3) 频谱复杂。

由于PJVS合成输出的是正弦型阶梯波电压,其与期望合成的正弦电压信号波形之间不可避免地存在差异,这便导致PJVS输出的电压信号频谱中含有较多高次谐波成分,这也是导致其合成的量子电压信号难以直接应用的主要原因。增加构成PJVS系统输出电压波形中的台阶数,可在一定程度上减小PJVS输出电压中的谐波成分,但这也可能会使PJVS输出信号的频带进一步减小。

2.1.3 实际应用

目前,PJVS技术已趋于成熟,凭借其高稳定性和易用性,已在多个领域发挥重要作用,如热电转换器性能评估,交流量子电压表构建,交流量子电压比例实现,以及变压器校验仪和电子式互感器校验仪性能评估等多种电学计量标准的量子化溯源。

1) 热电转换器性能评估。

当前,基于热电转换器将交流电压溯源至直流电压,是各国国家级计量机构建立交流电压标准的主要手段。然而,利用热电转换器对交流电压进行溯源时,存在“交直流差”现象:分别输入直流电压和有效值与之相等的交流电压时,热电转换器的输出电压值就出现了偏差。热电效应是其中的影响因素之一。热电效应指的是给热电转换器施加直流电压时,在其发热丝上会产生非焦耳热的温升或温降。由于它与所施加直流电压的极性有关^[36],因此,可通过快速施加反向直流电压(fast reversed DC, FRDC),将热电效应带来的影响抵消^[37]。如果能够测得一个热电转换器的FRDC-DC的传输差异,便可以评估该器件热电效应带来的影响。

凭借PJVS输出电压具有的高稳定性和高准确性优势,利用其作为FRDC电压源和DC电压源,可以完成对不同热电转换器热电效应影响的准确评估^[38]。

2) 交流量子电压表构建。

为了利用PJVS合成输出的正弦型阶梯波电压实现对正弦电压信号的精密测量,可将差分采样技术应用于基于PJVS的电压测量中^[39]。差分采样技术的基本原理如图5所示,其中,灰色矩形部分为选用的有效采样数据。差分采样技术的实施步骤和过程大致为:采用PJVS合成输出的与被测正弦波电压接近的正弦型阶梯波电压,利用采样系统对被测正弦波与PJVS输出电压的差值进行采样,基于差值信号的测量结果和已知的量子电压波形得到

被测信号的采样值。在差分采样过程中，仅选用 PJVS 合成输出的阶梯波电压中每个电压台阶上平稳部分的采样数据与被测正弦电压采样数据的差值作为有效的差值采样数据，如此，能够显著降低数字采样器的增益误差与偏置误差^[40-41]。这种采样电压表与 PJVS 组合起来使用，便可视作交流量子电压表，能够实现对 kHz 频率范围内正弦电压的精密测量。文献[42]通过使用交流量子电压表测量已知电阻两端的电压，继而实现了对精密电流源的量子化校准。

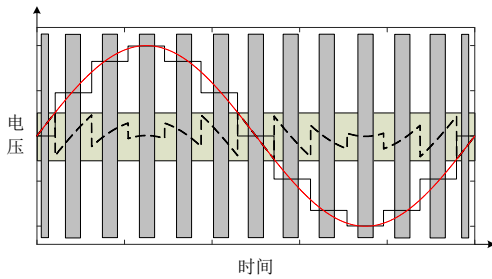


图 5 PJVS 的差分采样测量原理图

Fig. 5 Schematic diagram of PJVS differential sampling measurement

3) 交流量子电压比例。

电磁学单位量值的传递，是电磁计量中的重要一环。传统的交流电压比例标准，是利用感应分压器(inductive voltage divider, IVD)实现的，其本质上，是通过公共磁通耦合关系来实现一定比例的电压变换^[43]。IVD 可通过自校验使其比例值保持较高的准确度，但在交流激励源下，需要将其设计为更复杂的结构，如“双级”、“多级”等。交流量子电压的出现，为交流电压比例实现提供了新的思路。文献[44]通过输出两路交流量子电压信号，构建交流量子电压比例，并基于所构建的双路 PJVS 系统，计算 IVD 的比差和角差，方案的原理图如图 6 所示，并可通过与传统 IVD 比较，验证交流量子电压比例的准确性。

同时，高精度电压比例器往往会与阻抗桥结合起来，从而实现基于量子电压标准对阻抗比的标定，实现的原理示意图如图 7 所示。其中， V_1 与 V_2 代表两路可编程约瑟夫森量子电压标准； Z_1 与 Z_2 共同决定待校准的阻抗比； V_D 代表电位计的示值，通过调节两路可编程量子电压的幅值和相位，以实现电位计调零，继而可依据交流量子电压标准计算出阻抗桥的比差和角差。

在上述基本原理上，许多学者做了此方面的实验研究。文献[45]设计约瑟夫森两端对阻抗电桥，

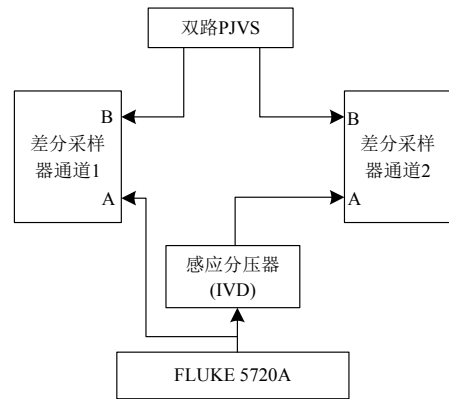


图 6 基于双路 PJVS 系统的 IVD 测量方案

Fig. 6 IVD measurement scheme based on double PJVS systems

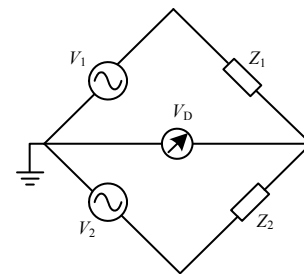


图 7 约瑟夫森阻抗桥原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of a Josephson impedance bridge

在 25 Hz~10 kHz 频率范围实现了 1:1 阻抗比测量，并证明了其测量结果的不确定度可达 10^{-8} 量级；文献[46]设计基于可编程约瑟夫森电压标准的约瑟夫森阻抗桥，并将其用于 100 pF 和 10 pF(10:1)以及 100 pF 和 100 pF(1:1)的电容标准的测量，在 500 Hz 至 10 kHz 的频带范围内，测量结果的不确定度在 $0.9 \times 10^{-8} \sim 8.1 \times 10^{-7}$ 之间。

4) 变压器校验仪和电子式互感器校验仪的量子化溯源。

电力变压器是数字化变电站的关键设备之一，对其一般使用变压器校验仪进行校准。文献[47]针对电力变压器校验仪检定装置中数字通道采样精度有限的问题，提出一种基于量子电压差分采样的检定方案，以提高检定装置的采样精度，并实验验证基于该方案的检定装置的标定准确度可达 0.05%。

还有学者针对电子式互感器校验仪的校准提出一种量子化溯源方案^[48]，其工作原理如图 8 所示。

图 8 中，标准信号源、感应分压器和量子标准 A/D 组成了电子式互感器校验仪的校准装置。电子式互感器校验仪测量该校准装置输出的标准模拟电压和标准数字电压，并计算出两者的幅值和相位

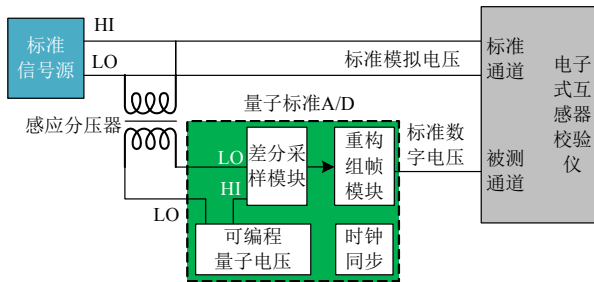


图8 电子式互感器校验仪的量子化溯源方案

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

误差,即为电子式互感器校验仪的测量误差。

2.2 脉冲驱动型交流约瑟夫森电压标准

2.2.1 基本原理

1996年,美国NIST的Hamilton等学者研制出了脉冲驱动型约瑟夫森电压标准^[49],也称约瑟夫森任意波形合成器(Josephson arbitrary waveform synthesizer, JAWS)。JAWS是基于磁通量子原理,用一系列高速电流脉冲去驱动约瑟夫森结阵产生电压信号的。当电流脉冲的幅值在约瑟夫森结的第一个Shapiro台阶范围内时,约瑟夫森结将输出量子电压脉冲,其量值与时间轴构成的面积为定值,即量子电压脉冲是量子化的,基于此原理,JAWS最终可合成频谱十分纯净的交流量子电压^[50],其无杂散动态范围理论上可达到180 dBc。

JAWS合成量子电压波形的过程,可以分为4个步骤:第一步,利用 $\Delta-\Sigma$ 调制工具将待合成的电压波形调制成一列数字码型;第二步,将数字码型存储到脉冲码型发生器(pulse pattern generator, PPG)内,由PPG将数字码型转换成相应的高速电流脉冲;第三步,利用高速电流脉冲驱动约瑟夫森结阵产生电压脉冲;第四步,对电压脉冲序列进行低通滤波,以滤除所携带的高频量化噪声,即可得到期望合成的量子电压波形^[51]。JAWS合成电压的实现原理,如图9所示。

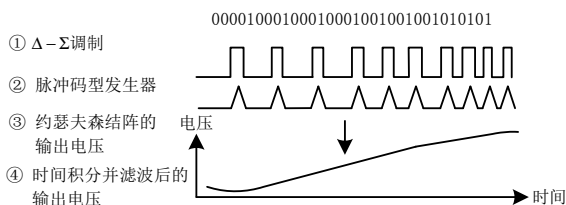


图9 JAWS合成标准电压波形的过程示意图

Fig. 9 Schematic diagram of processes using JAWS to synthesize standard voltage waveform

2.2.2 存在的问题及解决方法

JAWS虽然可以合成频谱十分纯净的交流电压

波形,但仍存在一些技术问题限制了它的进一步发展与应用。

1) 合成信号幅值有限。

PJVS是采用恒定频率的微波来驱动约瑟夫森结阵的,由于整个约瑟夫森结阵所处的电磁环境相对纯净,故大大降低了微波电路设计的复杂度和难度,因此,可以通过大规模构建约瑟夫森结阵的方式来提高合成电压的幅值。而JAWS则采用的是电流脉冲驱动约瑟夫森结阵,但电流脉冲具有的宽频特性,给宽频微波电路的设计带来极大挑战。因此,在JAWS制造上,为保证其中每个约瑟夫森结都能被驱动到量子态,只能采用较少的约瑟夫森结串联来形成约瑟夫森结阵,而这就制约了合成量子电压幅值的提升。2014年,德国PTB基于JAWS原理,采用单个约瑟夫森结阵实现了1V有效值量子交流电压波形的合成^[52]。要产生更高的电压幅值,就需要串联更多的约瑟夫森结,这无疑会使得JAWS系统的构成更为复杂。为使JAWS能合成更高幅值的交流量子电压,美国NIST与德国PTB又通过将多个约瑟夫森结阵串联并分别采用高速电流脉冲驱动的方式,实现4V有效值的交流量子电压输出^[53]。

2) 低频电流分量。

利用JAWS合成电压信号时,驱动约瑟夫森结阵的高速电流脉冲序列中含有一个低频电流分量,此低频电流分量与待合成正弦电压波形的频率一致;由于在约瑟夫森结阵末端存在一个终端电阻,低频电流流经它,会在电压输出端子 $V+$ 与 $V-$ 之间产生一个低频共模电压,其会影响合成量子电压波形的准确性;另外,约瑟夫森结与约瑟夫森结之间存在杂散电感,该低频电流分量流过约瑟夫森结阵时,由此会产生低频感应电压,继而会影响所合成电压波形的准确性。因此,如何尽量降低驱动电流脉冲中的低频电流分量,是能否进一步提升JAWS合成电压准确度的关键所在。

为便于后续的分析,图10给出JAWS所用的单个约瑟夫森结阵的原理电路^[51]。图10中,一个约瑟夫森结阵的全部约瑟夫森结同处于一条超导共面波导,该波导的末端集成有一个终端电阻 R_T ;该约瑟夫森结阵有两对扼流线圈 L_T ,其中一对用于注入补偿电流,另一对用于输出量子电压; L_P 则是2个约瑟夫森结之间的杂散电感; $D+$ 是PPG的正输出通道。

为消除低频共模电压对合成电压波形准确性

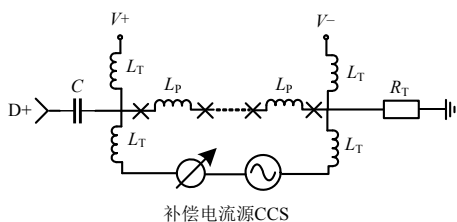


图 10 JAWS 所用约瑟夫森结阵芯片的原理电路

Fig. 10 Circuit diagram of the Josephson junction chip used in JAWS

的影响,采用一个直流阻断模块(本质上是一个高通滤波器),由图 10 中的电容 \$C\$ 来表征,以滤除在 JAWS 合成电压波形过程中,由脉冲码型发生器产生的电流脉冲里的低频电流分量。如此,图 10 中终端电阻 \$R_T\$ 上将无低频电流流过,从而不会有共模电压产生;但是,当待合成电压的幅值较大时,还需使用一个补偿电流源,以将滤除的低频电流分量重新注入流经约瑟夫森结阵的高速电流脉冲中,以恢复驱动电流脉冲的形状,保证其能够将约瑟夫森结驱动到量子态^[54]。但引入补偿电流源后,低频电流会流过约瑟夫森结之间的杂散电感(但不会流过匹配电阻 \$R_T\$),继而会产生低频感应电压。为消除该低频感应电压对合成量子电压波形准确性的影响,在 JAWS 合成波形的第二步,即高速电流脉冲产生阶段,另行做法是采用一种基于双脉冲抵消的新型电流脉冲合成策略,如此,可使所合成的电流脉冲中的低频电流分量极少,当其流经直流阻断模块后,形状并不会发生较大变化,因此,无需补偿电流源用以恢复电流脉冲形状,故前述的在杂散电感上产生的低频感应电压便得到极大削弱。如此,脉冲抵消法规避了使用补偿电流源,可明显降低 JAWS 系统构建的复杂度和操作难度^[55-56]。但由于脉冲抵消法中仅使用了约瑟夫森结阵中台阶编号为 0 或 +1 的量子电压台阶,故所能合成电压的幅值会因此降低。

如何有效削弱低频电流分量对合成电压准确度的影响,同时还能降低 JAWS 系统的构建复杂度并保证合成的量子电压波形有较高幅值,这是今后有关 JAWS 研究需重点攻克的问题之一。

2.2.3 实际应用

由于以 JAWS 合成的量子电压波形具有低幅值、频谱十分纯净的特点,其已被应用于精密物理测量和阻抗测量等多个领域,其中的两种典型应用,分别是对玻尔兹曼常数及温度的精密测量(在玻尔兹曼常数被确定为定值后,又应用于对温度的精

密测量)和量子阻抗测量。

1) 玻尔兹曼常数及温度的精密测量。

2005 年, CIPM 提出要基于基本物理常数重新定义国际单位制的基本单位,其中玻尔兹曼常数 \$k\$ 与温度的单位开尔文紧密关联,因此对 \$k\$ 的准确测量便极为关键^[57]。在已有的测量玻尔兹曼常数的方法中,噪声温度计是纯电学的温度测量方法,它的基本原理是基于 Nyquist 方程,通过测量电阻因电子热运动产生的噪声功率来确定 \$k\$,即:

$$k = \frac{V_R^2}{4TR\Delta f} \quad (5)$$

式中: \$V_R\$ 为电阻 \$R\$ 两端的噪声电压; \$T\$ 为热力学温度; \$\Delta f\$ 为噪声频率的带宽。

以该方法测量 \$k\$ 时,实际有效的噪声信号很小,仅有微伏量级,故若要实现稳定、准确的测量,就需利用 JAWS 产生一路量子电压标准信号^[58-59]。

基于噪声温度计法确定玻尔兹曼常数值的工作,主要是由中国计量科学研究院与美国 NIST 合作开展的。2017 年,中美联合发表的玻尔兹曼常数测量结果的不确定度为 \$2.7 \times 10^{-6}\$^[60],该结果被 CODATA 所采用,并为玻尔兹曼常数量值的最终确定做出了贡献。

自 2019 年 5 月新修订的 SI 单位制正式实施后,全世界范围内已开始采用玻尔兹曼常数复现热力学温度的单位开尔文。未来,利用量子电压构建噪声温度计,实现对温度的精准测量,无疑将是 JAWS 型量子电压标准的重要应用方向之一。

2) 量子阻抗桥。

上文已提及基于 PJVS 的阻抗桥,但由于 PJVS 合成电压波形中含有较多谐波成分,因此它在用于不同类型阻抗的比较上明显存在劣势。而相比于 PJVS, JAWS 有着频谱干净、调控灵活的优势,基于 JAWS 构成的量子阻抗桥的原理,与图 6 所描述原理类似,只需用 JAWS 输出的电压标准波形替代 PJVS。

2016 年,德国 PTB 将 JAWS 阻抗桥和 PJVS 阻抗桥与商用电桥 AH2700A 进行了 \$10 \text{ k}\Omega\$ 电阻与 \$10 \text{ nF}\$ 电容构成阻抗比的测量结果的比对,结果表明,3 个不同交流电桥的测量结果的一致性在 \$10^{-8}\$ 量级^[61];2017 年,德国 PTB 分析得到基于 JAWS 的阻抗桥不确定度为 \$8 \times 10^{-9}\$ (频率 \$1233 \text{ Hz}\$,幅度 \$20 \text{ mV}\$),并利用该阻抗桥将 \$10 \text{ nF}\$ 电容标准溯源至量子霍尔电阻标准,相对不确定度为 \$13.9 \text{ nF/F}\$^[62];

2018年,该院利用基于JAWS的阻抗桥在246 Hz~40 kHz的频带范围内测量2个10 nF的电容标准的阻抗比,并将测量结果与AH2700A电容电桥的测量结果进行比较,结果发现一致性良好,20 kHz内一致性优于 10^{-6} [63]。

2.3 2种交流量子电压标准的比较

PJVS与JAWS在微波频率、结阵类型以及合成电压信号最大幅值等方面的比较,如表1所示。

表1 2种交流量子电压标准的比较

Table 1 Comparison of two AC quantum voltage standards

类型	微波频率	结阵类型	合成信号最大值	频带范围	存在的问题
PJVS	20 GHz	SNS	10 V	DC~1 kHz	过渡过程
	70 GHz	SINIS	(幅值)		频带受限 频谱复杂
JAWS	20 GHz	SNS	4 V	DC (有效值) 10 Hz~4 MHz	合成信号的幅值有限 低频电流分量

现今, PJVS合成电压的幅值最大可达到10 V,且其性能稳定、可编程能力强,不仅可作为直流电压标准,还可以作为1 kHz频率范围内的交流电压标准。当频率再高后,因为电压台阶切换出现的过渡过程和存在吉布斯效应等,限制了PJVS合成电压的准确度;但PJVS的频带适用范围,可借助相关子采样技术拓展至百kHz。JAWS具有频带宽、任意波形合成能力强等优点,为合成更高频率的量子电压信号, JAWS是更佳选择。JAWS合成正弦交流电压的最大有效值为4 V。目前, PJVS系统在计量领域的应用已较为成熟,而JAWS仍在发展中。

由于两种交流量子电压标准的构建原理完全不同,因此对两种方法所合成电压的准确性的比较是十分必要的。2011年,美国NIST的Blaise Jeanneret等学者在有效值电压104 mV、频率500 Hz条件下,对PJVS与JAWS进行比对,其实验原理接线如图11所示[64]。测量系统包括开关单元、PJVS、JAWS、高性能数字采样表以及10 MHz铯频率基准,最终所得到的相对偏差为 $(-18 \pm 26) \mu\text{V}/\text{V}$ 。2015年,德国PTB对JAWS与基于差分采样方法的交流量子电压表进行了测量结果比较,其比较实验原理接线如图12所示,该测量系统由JAWS、交流量子电压表、低通滤波器(图12中的“F”)、波形发生器(Keithley 3350 A)组成,在电压信号有效值1 V、频率250 Hz条件下, JAWS与PJVS测得电压有效值的差值为 $(+3.5 \pm 11.7) \text{nV}/\text{V}$ [65]。

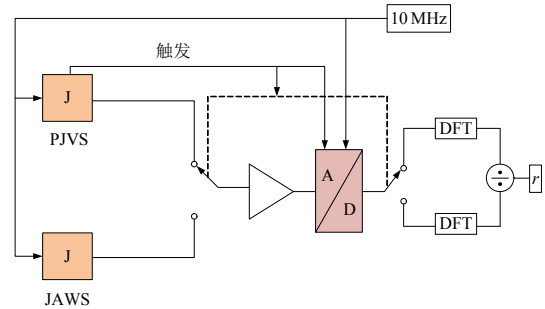


图11 PJVS与JAWS的交流比对实验示意图

Fig. 11 Schematic of the measurement set up for PJVS-JAWS comparison

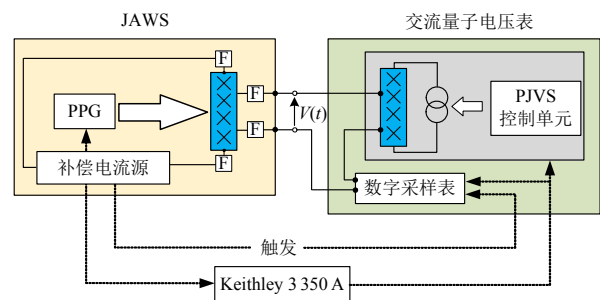


图12 JAWS与交流量子电压表的比对实验示意图

Fig. 12 Measurement setup for the direct comparison between the JAWS and the AC quantum voltmeter

2.4 国内研究现状

2006—2009年,中国计量科学研究院承担了国家科技支撑计划项目课题“可编程约瑟夫森电压量子基准研究”工作,结果,建立了我国的新一代量子电压基准,使基于SINIS结构的直流电压基准的不确定度小于 3×10^{-9} ;研制的交流量子电压合成装置能够合成频率200 Hz以下、峰值为1 V的交流量子电压,合成电压有效值的不确定度优于 5×10^{-6} [66]。

在JAWS方面,2011年,中国计量科学研究院采用JAWS首次合成微伏量级的量子电压信号;2018年,中国计量科学研究院将合成电压的幅值提升至100 mV,并实现对Fluke 792A的校准[67];2020年,该院通过4通道联合低频电流补偿,实现对约瑟夫森结阵芯片的驱动,成功合成出1 V有效值的脉冲驱动型交流量子电压[8]。

3 基于量子电压的交流功率标准

电能计量在电能的发、输、配、用各环节均不可或缺,在电力系统中有着举足轻重的地位[68],而交流功率标准是精准计量电能的基石。传统的交流功率标准是基于热电转换器建立的,其测量不确定度为 10^{-6} 量级。量子电压出现后,如何基于它建立更准确的功率标准已成为电磁计量领域的研究热点之一。

目前，国际上有 2 种量子功率标准构建方案：一种是间接法，具体是将交流电压、电流信号经过热电转换溯源至直流量子电压，继而实现对交流功率量值的溯源，该方案能达到的测量准确度约为 10^{-6} ；另一种是以直接法构建量子功率标准，其具体是以交流量子电压标准为基础，通过采用“标准表”或“标准源”法，使得电压、电流信号与量子电压相关联，继而实现对功率的精密测量。

美国 NIST 以量子标准源法构建量子功率标准。其基于可编程约瑟夫森电压标准研制的 120 V、5 A、50~400 Hz 交流量子功率标准装置的原理线路，如图 13 所示^[69]；具体实现上，由得到的功率标准再对时间积分，便可形成电能标准。

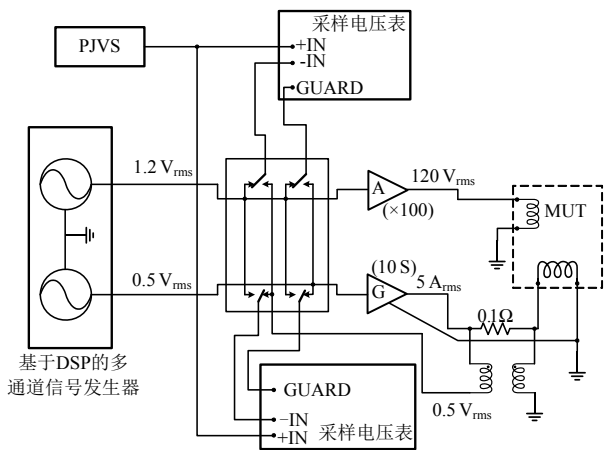


图 13 NIST 交流量子功率标准的原理线路

Fig. 13 Construction of

NIST AC quantum power standard

图 13 中，两通道数字信号发生器产生的有效值 1.2 V 的标准测试电压信号和有效值 0.5 V、反映标准测试电流的电压信号，各自被交流量子电压标准信号校准，之后，分别经电压放大器和跨导放大器放大，所产生的标准功率量值与被测功率表

(meter under test, MUT)的示值进行比较；其测量不确定度为 10^{-6} 量级^[70]。

德国 PTB 则是采用“标准表”法来构建量子交流功率标准，其实现原理线路如图 14 所示^[71]。按照该方案，首先产生两路相角可调的交流电压信号，它们分别经电压放大器和跨导放大器放大后形成功率信号。功率信号一方面流经待检功率表，同时功率源中的电压信号、电流信号经过精密电压比例和精密电流比例形成采样信号；采用 PJVS 实时校准的电压表对采样信号进行测量。如此，后端的比例环节、采样电压表和量子电压标准信号共同构建一块“标准功率表”，通过将标准功率表的测量结果与被检功率表的示值进行比较，完成对被检功率表的校准。目前，以功率表法构建的量子功率标准的准确性也在 10^{-6} 量级。

近年来，我国以及英、法、日本等国的国家级计量院，都在进行基于量子电压的交流功率标准构建的研究工作，所采取的技术方案，与上述介绍的美、德两国采用的两个技术方案相似。其中，中国计量科学研究院构建的基于 PJVS 的交流功率差分测量系统，采用分时差分采样技术，实现了对电压和电流信号的精密测量^[72]；功率因数为 1 时，该系统的测量不确定度为 $9.4 \mu\text{W}/\text{VA}(k=2)$ ；功率因数为 0.5L 和 0.5C 条件下，其功率的测量不确定度为 $9.8 \mu\text{W}/\text{VA}(k=2)$ 。

相比于传统的基于热电转换器的交流功率标准，基于量子电压的交流功率标准无需借助于热电转换器，更无需逐级溯源至直流电压，但目前，其幅值、频率范围等仍然还不能满足以“双高”为特征的新型电力系统功率测量的新需求，因此，基于量子电压的交流功率标准如何适用于新型电力系

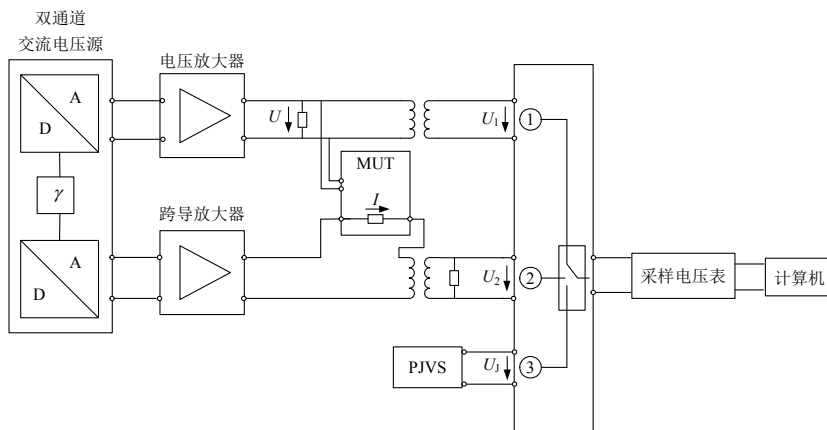


图 14 PTB 建立的交流量子功率标准原理图

Fig. 14 Construction of PTB AC quantum power standard

统发展建设需要, 仍然是未来的研究热点之一。

4 展望

本文在梳理国际单位制 SI 中电压单位伏特所对应的电压标准技术进步、发展历史基础上, 重点讨论交、直流量子电压合成的原理及特点。2018 年国际单位制的重新修订, 深刻影响着原有的电磁学量值溯源体系, 主要表现为开放性和扁平化。开放性指的是允许任何有能力且致力于计量基准实现的组织或个人, 都可在任何地点和时间建立最高准确度的计量基准; 而扁平化, 则是指突破传统计量必须自上而下逐级溯源的定式, 可有效提高溯源的效率和准确性。

而从不断出现的新需求看, 量子电压在技术实现以及应用范围拓展上, 仍有进一步提升的空间。

截至目前, 基于量子电压的宽频电压标准仍未建立。随着“碳达峰”、“碳中和”目标的确立以及新型电力系统的加速建设, 高比例可再生能源发电并入电网, 越来越多电力电子化电器设备在电网中得到应用^[73-74], 这使得电网中的谐波, 包括整数次谐波、间谐波和超高次谐波干扰不断增多, 且表现出动态、随机及间歇特征, 并由以中低压配电网为主在向着高电压系统扩展, 对电力系统的安全、可靠、稳定运行构成危害, 对功率、电能足够准确的计量提出全新挑战, 因此, 对谐波等的精准测量就变得日益重要。在国内, 目前基于热电转换原理形成的谐波电压标准的准确度已达到“天花板”。而依托量子电压技术建立宽频电压标准, 相对于热电变换在波形畸变情况下只能测量其整体有效值而言, 具有波形精准可测、高稳定和高准确等显著优势。

在电力系统电压测量方面, 基于量子电压的高电压比例技术有待拓展。目前, 工频高电压量值溯源的依据是国家工频高电压计量标准装置, 而其量值溯源准确度水平的进一步提升, 还受限于现有的标准源及标准数字多用表的测量不确定度。未来, 将量子电压应用于高电压量值传递中, 实现量子电压在不同电压等级中应用的突破, 对提升现有电压比例标准以及全链路电压溯源能力具有重要价值。对高压计量做出“量子贡献”, 可为新型电力系统建设、实现“双碳”目标提供基础性保障^[75]。

对约瑟夫森结阵的鲁棒性运行条件仍需探索。基于约瑟夫森效应建立量子电压标准, 已是国内外公认的可行技术路线。然而, 使约瑟夫森结阵产生

超导量子态的运行条件十分苛刻, 一般需要液氮提供低至 4.2 K 的低温环境。而液氮成本很高, 且对实验室环境有严苛要求。目前, 国内外均已在开展以制冷机代替液氮提供低温环境的相关研究, 旨在满足实用化需求。2014 年, 美国 NIST 已成功研制出基于制冷机的小型无液氮 10 V 可编程量子电压标准装置, 并实现了商品化^[76]。随后, 德国 PTB 也成功研制出无液氮的 10 V 可编程量子电压标准装置^[77]。但需要指出的是, 由于约瑟夫森结阵对环境温度和电磁干扰等较为敏感, 用制冷机代替液氮后, 制冷环境的变化以及相关电磁干扰的引入, 均会对约瑟夫森结阵的运行鲁棒性造成影响。针对于此, 为提高并确保免液氮环境下量子电压标准的准确度, 多国学者已着手对不同影响因素下约瑟夫森结阵的量子效应特性如何变化展开深入研究。

此外, 从已有研究成果看, 量子电压技术很可能对电磁学甚至其他领域带来更多的发展机会与应用可能。因为目前对自然界中的光、声、温度、压力等信号的测量, 都是采用传感器转换为电信号, 并以电压的形式进行量化, 量化信息再交由计算机进行分析处理。因此, 量子电压技术的不断发展, 很可能会为以电压为测量对象的非电量测量技术的进步和发展带来更加光明的前景。

参考文献

- [1] HAMILTON C A, BURROUGHS C J, BENZ S P. Josephson voltage standard-a review[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1997, 7(2): 3756-3761.
- [2] HAMILTON C A. Josephson voltage standards[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(10): 3611-3623.
- [3] 钟国林, 张朝军, 尧冬梅, 等. 直流电压自然基准装置的研究及量值复现[J]. 中国测试技术, 2008, 34(3): 9-13.
ZHONG Guolin, ZHANG Chaojun, YAO Dongmei, et al. Research on natural standard equipment and its value repetition for direct current voltage[J]. China Measurement & Testing Technology, 2008, 34(3): 9-13(in Chinese).
- [4] 张钟华. 量子计量基准概况及研究进展[J]. 中国测试, 2009, 35(1): 1-8.
ZHANG Zhonghua. Research development and summary of quantum measurements standards[J]. China Measurement & Test, 2009, 35(1): 1-8.
- [5] 沈平子, 贺青, 张钟华, 等. 电磁计量单位制沿革[J]. 计量技术, 2019(5): 36-42, 80.

- SHEN Pingzi, HE Qing, ZHANG Zhonghua, et al. The revolution of the SI units of electromagnetism [J]. *Measurement Technique*, 2019(5): 36-42, 80.
- [6] 李世松, 赵伟, 黄松岭, 等. 国际单位制变革与电磁测量发展互促共赢[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(S1): 261-274.
- LI Shisong, ZHAO Wei, HUANG Songling, et al. Electrical measurements and revision of international system of units: a win-win outcome[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(S1): 261-274(in Chinese).
- [7] BENZ S. Synthesizing accurate voltages with superconducting quantum-based standards[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2010, 13(3): 8-13.
- [8] 周琨荔, 韩琪娜, 赵建亭, 等. 1V 脉冲驱动型交流量子电压源研究[J]. *计量学报*, 2020, 41(12): 1529-1535.
- ZHOU Kunli, HAN Qina, ZHAO Jianting, et al. Pulse-driven AC Josephson voltage standard with an output voltage of one volt[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(12): 1529-1535(in Chinese).
- [9] 张钟华. 量子计量基准的现状[J]. *仪器仪表学报*, 2011 32(1): 1-5.
- ZHANG Zhonghua. Development of quantum measurement standards[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(1): 1-5(in Chinese).
- [10] 薛寿清, 李红晖, 刘瑞珉, 等. 1V 及 10V 约瑟夫森结阵电压标准[J]. *现代测量与实验室管理*, 1993(5): 23-26.
- XUE Shouqing, LI Honghui, LIU Ruimin, et al. 1-V and 10-V Josephson junction array voltage standard [J]. *Modern Measurement and Test*, 1993(5): 23-26(in Chinese).
- [11] COHEN E R, TAYLOR B N. The 1986 CODATA recommended values of the fundamental physical constants[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1988, 17(4): 1795-1803.
- [12] NEWELL D B, CABIATI F, FISCHER J, et al. The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI[J]. *Metrologia*, 2018, 55(1): L13-L16.
- [13] 马爱文, 王琦, 张佳楠. 浅谈国际单位量子化变革对我国计量体系的影响[J]. *中国测试*, 2020, 46(11): 1-4.
- MA Aiwen, WANG Qi, ZHANG Jianan. Discussion on the influence of quantization reform of international units on China metrology system[J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(11): 1-4(in Chinese).
- [14] JOSEPHSON B D. Possible new effects in superconductive tunnelling[J]. *Physics Letters*, 1962, 1(7): 251-253.
- [15] ANDERSON P W, ROWELL J M. Probable observation of the Josephson superconducting tunneling effect[J]. *Physical Review Letters*, 1963, 10(6): 230-232.
- [16] SHAPIRO S. Josephson currents in superconducting tunneling: the effect of microwaves and other observations [J]. *Physical Review Letters*, 1963, 11(2): 80-82.
- [17] 周琨荔, 屈继峰, 张钟华, 等. 交流量子电压标准研究综述[J]. *计量学报*, 2017, 38(4): 486-491.
- ZHOU Kunli, QU Jifeng, ZHANG Zhonghua, et al. The status of AC quantum voltage standards[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017, 38(4): 486-491(in Chinese).
- [18] Sosso A, Durandetto P, Trinchera B, et al. Characterization of a Josephson array for pulse-driven voltage standard in a cryocooler[J]. *Measurement*, 2017, 95: 77-81.
- [19] LEVINSEN M T, CHIAO R Y, FELDMAN M J, et al. An inverse ac Josephson effect voltage standard[J]. *Applied Physics Letters*, 1977, 31(11): 776-778.
- [20] 郭小玮. SNS 约瑟夫森结的制备及其特性研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2013.
- GUO Xiaowei. Preparation and characteristics study of SNS Josephson knot[D]. Qingdao: Qingdao University, 2013(in Chinese).
- [21] BEHR R, KIELER O, KOHLMANN J, et al. Development and metrological applications of Josephson arrays at PTB[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(12): 124002.
- [22] RÜFENACHT A, FLOWERS-JACOBS N E, BENZ S P. Impact of the latest generation of Josephson voltage standards in ac and dc electric metrology[J]. *Metrologia*, 2018, 55(5): S152-S173.
- [23] 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(in Chinese).
- [24] 高原, 李红晖, 沈雪槎, 等. 10V 约瑟夫森结阵电压基准[J]. *现代计量测试*, 2000(3): 12-16.
- GAO Yuan, LI Honghui, SHEN Xuecha, et al. 10V Josephson junction array voltage primary standard [J]. *Modern Measurement and Test*, 2000(3): 12-16(in Chinese).
- [25] 高原, 李红晖, 沈雪槎. 我国的 1V 及 10V 约瑟夫森量子电压基准装置[J]. *现代测量与实验室管理*, 2005, 13(3): 3-6.
- GAO Yuan, LI Honghui, SHEN Xuecha. 1V and 10V

- Josephson voltage standard in NIM[J]. *Modern Measurement and Test*, 2005, 13(3): 3-6(in Chinese).
- [26] 周峰, 殷小东, 葛得辉, 等. 电力量子计量技术的进展与趋势[J]. *高电压技术*, 2023, 49(2): 618-635.
ZHOU Feng, YIN Xiaodong, GE Dehui, et al. Progress and trend of power quantum metrology technology [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(2): 618-635(in Chinese).
- [27] BAUER S, BEHR R, HERICK J, et al. Josephson voltage standards as toolkit for precision metrological applications at PTB[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(3): 032001.
- [28] 陆祖良, 杨雁, 黄璐, 等. 阶梯波性质的进一步探讨——阶梯波研究之一[J]. *计量学报*, 2018, 39(6): 759-767.
LU Zuliang, YANG Yan, HUANG Lu, et al. Further discussion on characteristics of staircase waveform [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(6): 759-767(in Chinese).
- [29] HAMILTON C A, BURROUGHS C J, KAUTZ R L. Josephson D/A converter with fundamental accuracy [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, 44(2): 223-225.
- [30] 陆祖良, 杨雁, 黄璐, 等. 片段采样与阶梯波测量——阶梯波研究之二[J]. *计量学报*, 2019, 40(1): 31-39.
LU Zuliang, YANG Yan, HUANG Lu, et al. Piecewise sampling and measurement of staircase waveform[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(1): 31-39(in Chinese).
- [31] WANG Zengmin, GAO Yuan, LI Honghui, 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: IEEE, 2015: 703-707.
- [32] 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(in Chinese).
- [33] 麻滨麒, 徐晴, 陈铭明, 等. 一种鲁棒区分 PJVS 交流量子电压台阶平稳区与过渡区的判据[J/OL]. *高电压技术*, 2023[2023-09-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230258>.
MA Binqi, XU Qing, CHEN Mingming, et al. A robust criterion for distinguishing stationary and transition regions of AC PJVS voltage steps[J/OL]. *High Voltage Engineering*, 2023[2023-09-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230258>(in Chinese).
- [34] IHLENFELD W G K, LANDIM R P. Investigations on extending the frequency range of PJVS based AC voltage calibrations by coherent subsampling[C]//2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Ottawa: IEEE, 2016.
- [35] BEHR R, KATKOV A, LEE J, et al. Frequency range extension of the AC quantum voltmeter[C]//2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Paris: IEEE, 2018: 1-2.
- [36] INGLIS B D. Standards for AC-DC transfer [J]. *Metrologia*, 1992, 29(2): 191-199.
- [37] KLONZ M, SPIEGEL T, ZIRPEL R, et al. Measuring thermoelectric effects in thermal converters with a fast reversed DC[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, 44(2): 379-382.
- [38] BURROUGHS C J, BENZ S P, HAMILTON C A, et al. Thermoelectric transfer difference of thermal converters measured with a Josephson source[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1999, 48(2): 282-284.
- [39] 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.
- [40] Lee J, Behr R, Palafox L, et al. An ac quantum voltmeter based on a 10 V programmable Josephson array [J]. *Metrologia*, 2013, 50(6): 612.
- [41] 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.
- [42] STARKLOFF M, BAUER M, SCHUBERT M, et al. The AC quantum voltmeter used for AC current calibrations [C]//2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Paris: IEEE, 2018: 1-2.
- [43] Cutkosky R D, Shields J Q. The precision measurement of transformer ratios[J]. *IRE Transactions on Instrumentation*, 1960, 1(2): 243-250.
- [44] 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(in Chinese).

- Chinese).
- [45] LEE J, SCHURR J, NISSILÄ J, et al. The Josephson two-terminal-pair impedance bridge[J]. *Metrologia*, 2010, 47(4): 453-459.
- [46] HAGEN T, PALAFOX L, BEHR R. A Josephson impedance bridge based on programmable Josephson voltage standards[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(6): 1539-1545.
- [47] WU Ruoyu, HU Haoliang, LI Dong, 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.
- [48] 周峰, 殷小东, 刁赢龙, 等. 基于可编程量子电压的测量应用及误差分析[J]. *高电压技术*, 2023, 49(1): 440-447.
- ZHOU Feng, YIN Xiaodong, DIAO Yinglong, et al. Measurement application and error analysis based on programmable quantum voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(1): 440-447(in Chinese).
- [49] BENZ S P, HAMILTON C A. A pulse - driven programmable Josephson voltage standard[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(22): 3171-3173.
- [50] 张建强. 量子电压标定的噪声温度计系统完善[D]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
- ZHANG Jianqiang. Development of a quantum voltage calibrated Johnson noise thermometer[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2012(in Chinese).
- [51] 周琨荔. 脉冲驱动的交流约瑟夫森电压标准研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- ZHOU Kunli. Research on the pulse-driven AC Josephson voltage standard[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017(in Chinese).
- [52] KIELER O F, BEHR R, WENDISCH R, et al. Towards a 1 V Josephson arbitrary waveform synthesizer[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, 25(3): 1400305.
- [53] FLOWERS-JACOBS N E, RÜFENACHT A, FOX A E, et al. Calibration of an AC voltage source using a Josephson arbitrary waveform synthesizer at 4 V[C]//2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Denver: IEEE, 2020: 1-2.
- [54] BENZ S P, BURROUGHS C J, DRESSELHAUS P D. AC coupling technique for Josephson waveform synthesis[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2001, 11(1): 612-616.
- [55] BENZ S P, WALTMAN S B. Pulse-bias electronics and techniques for a Josephson arbitrary waveform synthesizer [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, 24(6): 1400107.
- [56] ZHOU Kunli, QU Jifeng, BENZ S P. Zero-compensation method and reduced inductive voltage error for the AC Josephson voltage standard[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, 25(5): 1400806.
- [57] 周琨荔, 韩琪娜, 屈继峰, 等. 噪声法测量玻尔兹曼常数研究综述[J]. *计量技术*, 2019(5): 47-51.
- ZHOU Kunli, HAN Qina, QU Jifeng, et al. A review of the Boltzmann constant measurement by Johnson noise thermometry[J]. *Metrology Technique*, 2019(5): 47-51(in Chinese).
- [58] NAM S W, BENZ S P, DRESSELHAUS P D, et al. Johnson noise thermometry measurements using a quantized voltage noise source for calibration[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003, 52(2): 550-554.
- [59] BENZ S P, POLLAROLO A, QU Jifeng, et al. An electronic measurement of the Boltzmann constant [J]. *Metrologia*, 2011, 48(3): 142-153.
- [60] QU Jifeng, BENZ S P, COAKLEY K, et al. An improved electronic determination of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry[J]. *Metrologia*, 2017, 54(4): 549-558.
- [61] BAUER S, BEHR R, HAGEN T, et al. Implementation of an impedance bridge based on pulse-driven Josephson arrays for arbitrary impedance ratios and phase angles[C]//2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Ottawa: IEEE, 2016: 1-2.
- [62] BAUER S, BEHR R, HAGEN T, et al. A novel two-terminal-pair pulse-driven Josephson impedance bridge linking a 10 nF capacitance standard to the quantized Hall resistance[J]. *Metrologia*, 2017, 54(2): 152-160.
- [63] BAUER S, BEHR R, KIELER O, et al. Progress on PTB's pulse-driven Josephson impedance bridge combined with an AC quantum hall resistance[C]//2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Paris: IEEE, 2018: 1-2.
- [64] JEANNERET B, RÜFENACHT A, OVERNEY F, et al. High precision comparison between a programmable and a pulse-driven Josephson voltage standard [J]. *Metrologia*, 2011, 48(5): 311-316.
- [65] BEHR R, KIELER O, LEE J, et al. Direct comparison of a 1V Josephson arbitrary waveform synthesizer and an ac quantum voltmeter[J]. *Metrologia*, 2015, 52(4):

- 528-537.
- [66] 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 Zengmin, GAO Yuan, LI Honghui. 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(in Chinese).
- [67] ZHOU Kunli, QU Jifeng, XU Xun, et al. Thermal transfer standard calibrations using a pulse-driven AC Josephson voltage standard[C]//2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Paris: IEEE, 2018: 1-2.
- [68] 白静芬, 孟静, 赵东芳, 等. 交流功率标准构建原理及发展趋势综述[J]. 计量学报, 2022, 43(12): 1533-1537.
BAI Jingfen, MENG Jing, ZHAO Dongfang, et al. The principle and prospect of AC power standards[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(12): 1533-1537(in Chinese).
- [69] WALTRIP B C, GONG Bo, NELSON T L, et al. AC power standard using a programmable Josephson voltage standard[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 1041-1048.
- [70] DJOKIC B. Development of a low-frequency quantum-based AC power standard at NRC Canada[C]// 2008 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest. Broomfield: IEEE, 2008: 194-195.
- [71] PALAFOX L, BEHR R, IHLENFELD W G K Ü, 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.
- [72] 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(in Chinese).
- [73] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [74] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in Chinese).
- [75] 谢海鹏, 钱雨琦, 付炜, 等. 电力系统中量子信息学的应用现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4485-4507.
XIE Haipeng, QIAN Yuqi, FU Wei, et al. Status and prospect of quantum informatics in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4485-4507(in Chinese).
- [76] HOWE L, FOX A E, RÜFENACHT A, et al. NIST 10 V programmable Josephson voltage standard system using a low-capacity cryocooler[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 1400404.
- [77] SCHUBERT M, STARKLOFF M, PEISELT K, et al. A dry-cooled AC quantum voltmeter[J]. Superconductor Science and Technology, 2016, 29(10): 105014.



王保帅

在线出版日期: 2023-12-18.

收稿日期: 2023-10-31.

作者简介:

王保帅(1994), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为量子精密测量技术、电气信息测量技术与互感器测量技术等, wangbs@csg.cn;

麻滨麒(1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为现代电磁测量技术和方法, mbq21@mails.tsinghua.edu.cn;

肖勇(1978), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为智能量测技术、智能用电技术等, xiaoyong@csg.cn;

胡珊珊(1981), 女, 硕士, 副高级工程师, 主要研究方向为电能计量技术、量子精密测量技术等, hushanshan@csg.cn;

宋宏天(1996), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电测量技术、量子精密测量技术等, songht@csg.cn;

刘小虎(1991), 男, 博士后, 主要研究方向为电磁传感、量子精密测量等, cqliuxiaohu@mail.tsinghua.edu.cn;

赵伟(1956), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代电磁测量方向的教学和研究, zhaowei@mail.tsinghua.edu.cn;

李世松(1987), 男, 博士, 助理教授, 主要从事现代电磁计量和电磁测量理论和方法研究, shisongli@tsinghua.edu.cn.

(编辑 乔宝榆, 李新洁)