第 49 卷 第 2 期：618-635 高电压技术 Vol.49, No.2: 618-635
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230054

电力量子计量技术的进展与趋势

周 峰[1]，殷小东[1]，葛得辉[2]，白静芬[1]，聂 琪[1]，李小飞[1]
（1. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074；2. 国家电网有限公司市场营销部，北京 100031）

摘 要：现有的电力基标准均是基于电磁原理，受限于原理和测量技术，继续提升准确度水平已接近物理极限。相较于传统电力基标准，量子计量与传感将物理量溯源至基本物理常数，具有准确度高、复现不受客观条件制约等显著优点，近年来得到了很快的发展。因此，围绕电力计量主要的参量，包括电流、电压、电能及时间 4 个方面，比较了基于单电子隧道效应和粒子加速器的两种量子电流技术的发展趋势，介绍了基于量子精密磁测量的新型电流传感技术以及电流量子比例技术；总结了交直流量子电压装置的发展，以及在电压比例溯源和电能的溯源应用，可有效提升现有的电压/电能的溯源水平；总结了时间频率计量技术的整体进展和趋势，以国家电网计量中心建立的国家电网时间频率体系架构和应用为例，介绍了量子时间的应用形态。目前电力量子计量技术取得了突破性的发展，电力与量子的融合研究刚刚起步，研究潜力很大，值得重点关注和深入研究。
关键词：电力计量；量子电力基准；量子传感；量子电流；量子电能

Progress and Trend of Power Quantum Metrology Technology

ZHOU Feng[1], YIN Xiaodong[1], GE Dehui[2], BAI Jingfen[1], NIE Qi[1], LI Xiaofei[1]
(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
2. Department of Marketing, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: The existing power-based standards are based on electromagnetic principles. Limited by principles and measurement techniques, continuing to improve the accuracy level is close to the physical limit. Compared with the traditional power-based standard, quantum metrology and sensing trace the physical quantity to the basic physical constant, which has the advantages of high accuracy and no restriction of objective conditions, has been developed rapidly in recent years. Therefore, this paper focuses on the main parameters of power metering, including current, voltage, electric energy and time, compares the development trend of two quantum current technologies based on single electron tunneling effect and particle accelerator, and introduces new current sensing technology based on quantum precision magnetic measurement and current quantum ratio technology. The development of AC/DC quantum voltage devices and their application in voltage proportional traceability and power traceability are summarized, which can effectively improve the existing voltage / power traceability level. The overall progress and trend of time and frequency measurement technology are summarized. Taking the time and frequency architecture and application of the State Grid established by the State Grid Measurement Center as an example, the application form of quantum time is introduced. At present, the power quantum metrology technology has made a breakthrough development. The research on the integration of power and quantum has just started, and the research potential is great, which is worthy of attention and in-depth study.
Key words: power metering; quantum power benchmark; quantum sensing; quantum current; quantum electric energy

0 引言

电力计量是指对消耗的电能进行准确测量，是电力生产、营销及电网安全运行的重要环节。电力计量的准确与否将影响电能贸易结算的公平公正和准确，关系到电力企业、广大电力客户和老百姓的经济利益。

在电力系统的各个环节，为了生产安全、电能质量以及做好电能经济贸易核算工作，在各个环节安装了多类测量器具，以随时测量所需的各种参数，例如电能表。在高电压和大电流系统中，由于应用场景的特殊，一般测量器具不直接接入被测回路，而是通过比例器具，比如电压互感器或者电流互感器，先将大电压/大电流信号，比例变化为低电压/小电流信号，再进行测量。本文将电能表、互感器

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目 (5700-202155197A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of the SGCC (5700-202155197A-0-0-00).

以及二次回路的接线统称为电能计量装置。

电能计量装置采集的数据涉及到“发、输、变、调、配、用”的整个周期，每个环节都会产生海量的计量数据。电力作为国家关键的基础设置，通过电力大数据的分析，可以分析出关键区域或者设备的用电分布、位置信息等，通过篡改电力关键节点的监测信息、操作指令等数据，给电力系统带来故障或者重大的安全事故。同时，电网企业服务于社会大众，若客户的隐私信息因保护不当而被攻击，如用电信息、电话号码、家庭住址等敏感信息，会对社会公众安全产生及其负面的影响。因此电力计量不仅要保证采集的基础数据的准确可靠，同时还要保证数据传输和安全质量。

国务院发布的《计量发展规划(2021—2035)》以及市场监管总局联合科技部、工业和信息化部、国务院国资委、知识产权局共同出台了《关于加强国家现代先进测量体系建设的指导意见》，均提出构建以量子技术为核心的现代先进测量体系。同时，随着“碳达峰、碳中和”目标和新型电力系统建设的提出，大规模风电、光伏等新能源将快速接入电网，电动汽车、电力市场化交易也将规模化应用，电网形态呈现时频域宽动态、多参量等新特征，给电力用户的高准确度计量、电压电流精准感知等带来挑战。

在这个背景下，本文分析了电力量子计量技术的进展与趋势，围绕电力领域的关键参量，包括电流、电压、电能、时间等方面的量子技术的发展做了介绍，并讨论了在本领域今后发展的方向。

1　量子电流

SI 单位制中有 7 个基本单位，其中电流的单位安培是与电磁计量直接有关的基本单位，符号 A。在建立电流的量子基准之前，电流安培的定义是 1948 年在第九届国际计量大会确定的，基于安培定律，电流由两个两条平行导线之间的电磁力定义。这种定义把电流单位安培和力学单位牛顿、质量单位千克、长度单位米、时间单位秒结合在一起。因此，所有的电学单位都依赖于力学单位。基于此定义的电流计量基准装置为安培天平，其不确定度约为 10^{-6} 量级。此时国际上保存复现电流基准是依据安培天平，各国计量单位不断提升安培天平的精度并进行比对。在实际应用中，也基于欧姆定律用标准电池和标准电阻导出电流基准单位安培。

在建立电压和电阻的量子基准后，基于欧姆定律可以很容易地导出电流单位，从而建立电流的间接基准，但是量子电流直接基准的探索一直未停止。2018 年 11 月 16 日，第 26 届国际计量大会通过了“修订国际单位制”决议，将 1 安培定义为“1 s 内$(1/1.602\ 176\ 634)\times10^{19}$ 个电子移动所产生的电流强度”，并在 2019 年 5 月 20 日世界计量日起正式生效。为单位时间内通过截面的电荷量，由于构成电荷量的最小单位是电子电荷 e，所以电荷量也是量子化的(一份一份的)[1-2]。电流强度的定义可表达为

$$I=n\times e/t=n\times e\times f(A) \tag{1}$$

式中 n 为考察时间 t 内通过某导体截面的电子个数，而 f 可理解为收集到载流子的频率。当 $f=1/ne$ 时，即定义了 1 A。安培的最新定义是基于基本电荷，而基本电荷是一个自然常数，其测量相对不确定已高达 10^{-9}。时间量是目前基于量子技术不确定度做的最好的物理量，铯原子喷泉时间频率基准的不确定度好于 2×10^{-15}，实验室中的锶光钟其长期稳定度首次达到 10^{-18} 量级[3-4]。因此，理论上电流强度的量子复现准确度应该与电子电荷量一致，远高于现有的所有电流标准。国际计量局(BIPM)终身荣誉局长泰瑞·奎恩这样评价安培的最新定义：“我们终于可以摆脱那个无限长导线了！”可以看到，要想实现电流的量子化，必须解决两个问题：一是如何准确的控制发射的电子个数；二是如何对电子个数进行精准探测。

1.1　基于单电子隧道效应的量子电流

单电子隧道效应(single electron tunneling effect，SETE)[5-6]，如图 1 所示，简单解释为一个包含极少量电子，具有极小电容值的粒子称为库仑岛，其能量由电势能及电子间互作用库仑能组成。当库仑岛上增加或减少一个电子时，其能量增加 E_0。单个电子进入或离开库仑岛需要 E_0 的激活能。在极低温和小偏压下，导体内的电子不具备 E_0 的能量，故电子不能穿越库仑岛，此现象称为库仑阻塞。通过给库仑岛加栅压可以改变其电势能及总能量，在某个特定的栅压下，库仑岛总电荷和最小能量是简并的，即态密度间隙消失。此时，即发生单个电子隧穿库仑岛的现象，称为单电子隧穿效应[5]。通过控制栅压，一般采用射频的方式施加，则可控制穿过隧道结的电子通断，以达到控制电子数目的目的，其原理与安培的最新定义完全一致。

在基于单电子隧道效应的量子电流装置的研

发方面，德国联邦物理技术研究院(Physikalisch Technische Bundesanstalt，PTB)已经在基于 GaAs 异质结构中动态量子点的单电子泵(single electron pump，SEP)中得到 100 pA 量级的电流[7]，不确定性优于 0.2×10^{-6}。但是，实验测量中的准确性验证仍然依赖于特殊的低电流放大器，该放大器需溯源至 Von-Klitzing 常数 R_K 和 Josephson 常数 K_J，也就说测量方法依赖于量子电压和电阻基准。而对于真正 SEP 量子电流源，需要以“自溯源”方式提供独立的方法来确定源电流的精度，最准确的方法是在 SEP 芯片上增加一个能直接统计误差的电路。这种直接统计误差的方案已经被计量界和学术界所重视，该方案包括一个电荷检测器，该电荷检测器能够探测 SEP 芯片上电荷岛的电荷状态。探测器至少需要满足两点：能以单电子分辨率感测该岛电荷以及带宽足够大，几乎可以检测到所有传输错误(也就是说检测速率比随机错误事件的平均速率大得多，而在合理的操作方式下，该平均速率又远小于泵浦频率 fSEP)，从而可以完整统计错误事件，以校正 SEP 产生的实际电流[8]。

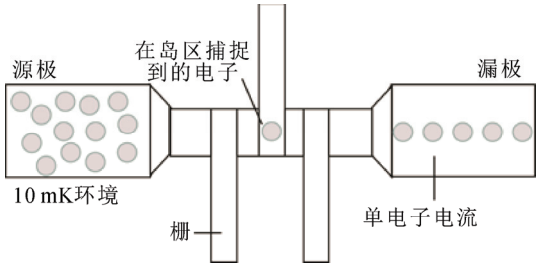


图 1 单电子隧道效应示意图

Fig.1 Single electron tunneling effect diagram

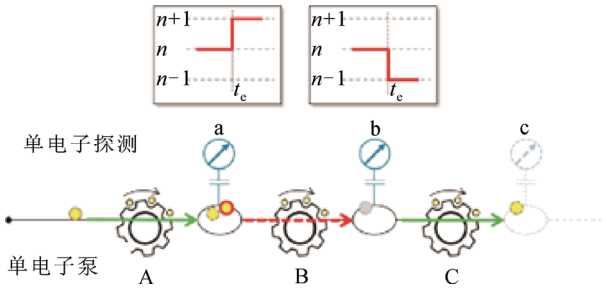


图 2 用于误差计数的探测原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of detection principle for error counting

PTB 正在研究基于 GaAs 的 SEP 中原位误差计数的“自溯源”设备，这些设备包括几个与单电子检测器串联的泵，用于检测电荷岛的电荷状态。如图 2 所示。经过理论和第一性原理实验证明，在有三个串联的 SEP 比单个单电子泵，电流不确定性降低了约 50 倍，实验中电流强度在 aA 量级。

从计量实用的角度考虑，增大 SEP 的电流强度，也就是要将泵浦频率增加到 100 MHz 量级，与此同时需要更快的单电子探测器。假设泵浦频率为 100 MHz，SEP 的错误率 10^{-6} 数量级，则单电子输运的失误率则为 1 kHz，则宽高达约 100 kHz 的单电子探测器进行可靠的误差计数。这种检测器可采用目前正在研究的一些技术，比如基于金属单电子晶体管或半导体量子点或量子点触点的射频单电子静电计。这些探测或者设计方案旨在实现基于 SEP “自溯源”的量子电流标准，其相对不确定度低于 0.1×10^{-6}。但是，在首次实现大电流“自溯源”基于 SEP 的量子电流基准之前，仍然需要解决几个具有挑战性的实验问题。

比如，在电子探测方面，英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)开发了基于 GaAs 量子点接触电荷传感器的新型的误差计数方案[9]，该方案证明了 SEP 传递误差约为 1×10^{-6}。在用于计量的硅基纳米电子设备领域，电子计数技术在可调谐势垒 SEP 中也得到了应用。

SEP 和单电子探测器电路的实现和制造工艺非常复杂，不仅涉及纳米电子电路本身，还涉及用于实时分析探测器信号的高速信号和数据处理方案。因此，需要寻求更简单的“非微观”方式来进行 SEP 准确性的验证。比如，目前正在欧洲开展的联合研究中，尝试通过检查 SEP 的电流与控制参数特性来判断 SEP 的误差率。这要求 SEP 产生的电流对其控制参数和环境不敏感(可以实际控制)，并且局部不敏感(“稳健”)。相关参数通常是栅极电压、射频驱动信号的幅度、源极–漏极偏置电压、温度或磁场等。在调整和调整这些参数后，在 SEP 上测得的电流与控制参数曲线呈现出平坦区域，通常称为“平稳电流”。换句话说，如果 SEP 对于所有这些参数的微小变化都是“稳健的”，则可以认为源电流的精度是不变的。但是，由 n 反映的 SEP 传输保真度不仅是恒定的，而且在 n 足够接近 1 的意义上也是准确的，这是一个必须证明的附加假设。实验结果表明，调整好的电流平稳状态出现在偏离标称值超过 20×10^{-6} 的值时，说明该方法是有效的，这也证明了该假设的一般合理性。但该实验也证明这种方法在 10^{-6} 级的电学量子计量基础实验中可能存在问题。

最终，这些技术探索和尝试是希望最终能够为计量学中的 SEP 准确性验证提供通用的实用“指南”，类似于在电阻计量学中成功建立的基于量子霍尔效应的量子电阻(quantum Hall resistance，QHR)标准技术指南。这些 QHR 指南描述了通过独立方式(例如，通过纵向和接触电阻的标准)来验证 QHR 器件的霍尔电阻可以用作 R_K 参考的实验测试程序。但是，考虑到 SEP 设备中电子传输过程的脆弱性，特别是与 QHR 设备的“参数鲁棒性”相比，高准确度的 SEP 尚无法实现。如上所述，对于 SEP 准确性的验证，严格的“全计数”方法仍然是不可替代的。

在电流强度方面，目前即使是最先进的 SEP 器件也只能够产生最大为几 nA 的电流。使用上述 GaAs 可调势垒泵方式在可接受的精度情况下，最高电流约为 100 pA。对于硅基可调势垒的 SEP，当电流为 160 pA 时，精度优于 0.3×10^{-6}。2014 年，使用硅基泵浦器件实现了低精度下的高电流，但产生的电流接近 500 pA，但是只有 0.1%的精度水平。随后，该设备被证明可以在高达 7.5 GHz 的频率下工作，对应 1.2 nA 的电流强度，与标称值的偏差约为 20×10^{-6}[10]。

关于基于 GaAs 和硅基的 SEP 的区别，有研究表明，对于泵浦频率超过 1 GHz(约等于 160 pA)，GaAs 器件产生的电流的精度会急剧下降，在硅基器件中，这样的频率限制不太明显，除非使用更高的泵浦频率。基于 GaAs 的 SEP 中这种频率限制的可能物理原因尚不完全清楚，仍在研究中。

尽管过去几十年来SEP的输出电流水平取得了令人瞩目的进步[11-12]，但如果不采用并联结构，即使在接下来的十年内，也不大可能产生超过 1 nA 的电流强度。目前为止，能够获得的最高水平的电流强度为 100 pA。这种强度的电流，在计量领域，可能用在最新的小电流放大器和静电计的性能验证。此外，通过实验也证明了通过调制泵浦频率来产生量化的任意电流波形的SEP器件可能对交流低电流校准很有用。与此同时，SEP 设备在实验室层面，提供用于 fA 和 μA 之间的小电流直流校准替代设备，也有显著的优势。

1.2　基于电子加速器电子流计数的量子电流

在 20 世纪 50 年代，基于电子加速器中的电子束流进行计数的电流量子化方案已被提出，但是由于当时加速器的电子发射、电子探测等技术的限制，该方案并未能得到实现。随着加速器技术的飞速发展，该方案有可能实现，并在量子电流的强度、稳定性及探测手段方面突破单电子隧道效应。

电子加速器是使电子在高真空场中受磁场力控制、电场力加速而达到特定能量的特种电磁、高真空装置，其输出电子束流的强度和稳定性对应量子电流的电子强度和稳定性。电流量子化需要从加速器出口开始，对束流中的电子分离调束，计数最终得到的电子，在此过程中束流参数如流强等的变化会对计数过程造成误差，因此需要稳定性非常好的束流。虽然目前少有基于电子加速器开展量子电流研究的成果，但本文对目前世界上的加速器的流强和稳定性开展了调研，有利于梳理该技术路线的可行性[13]。

日本的 SACLA 开发和建造了 c 波段（5.712 GHz）加速器系统，它包含 64 个加速器单元，出口束流能量为 8.5 GeV，能散为 0.1%，流强在 300 A 附近，射频场的相位稳定性和幅值稳定性分别为均方根 0.03 度和 0.01%[14]。

美国的 SLAC 国家加速器实验室对直线型加速器相干光源(LCLS)x 射线自由电子激光器(FEL)进行调试和运行，多年来，研究了各种不同的束流稳定性和抖动处理方法，从 LCLS 操作之前的容差计算开始，到研究和识别抖动源并改善 LCLS 操作期间电子束的稳定性，一些抖动源已被识别并修复，目前 LCLS 将关注点从电子抖动转移到光子抖动。LCLS-II 稳定度方面有很大的提高，能量抖动为 0.009%，能散抖动为 0.0011%，束团长度抖动为 3.8%，时间抖动为 20 fs[15]。

瑞士 Paul Scherrer 研究所的 X-ray FEL 机器 SwissFEL 已投入使用，FEL 的运行对 linac 输出的束流稳定性有严格要求，如电子束到达时间、峰值电流和能量等,稳定目标为出口处束流能量抖动为 0.05%，峰值电流抖动为 5%，束团到达时间抖动为 20 fs[16]。

瑞士的 CTF3 直线型加速器出口束流能量为 150 MeV，能散小于 0.6%，流强在 3.5 A 附近，驱动束流的稳定性在过去几年内得到显著提高，目前为 5×10^{-4}[17]。

中国上海软 x 射线 FEL (SXFEL)是一种基于小型直线加速器产生高亮度束流的 FEL 装置,平均束能量 0.1%，束流强度 10%，横向束流抖动 10%[18]。

中国台湾光源储存环(SR)早已开始运作，维持电子束的最佳稳定性正成为主要挑战，Hung-Chiao

Chen 等人研究如何提高 SR 的电子束稳定性和注入效率。通过确定影响存储环的电子感应加速器的主要因素，以最大程度地提高电子束的稳定性和注入效率。当 SR 调频为 753.48 kHz 和 437.05 kHz 时电子束稳定性为 0.0428%[19]。

韩国浦项加速器实验室(PAL)制造了基于自放大自发辐射(SASE)的太赫兹自由电子激光[20-21]，其初始电子由光阴极 RF 枪产生，Eun-San Kim 等人研究了在 PAL 的自放大自发发射(SASE)自由电子激光(FEL)的 10 GeV 直线加速器中的束流动力学。峰值电流 3.4 kA 左右，沿束团的薄片发射度在水平和垂直方向上均为 0.8 μm，束流的预计能量分散为 0.037%，而束流核心部分的薄片能量分散均方根小于 0.0025%。

FERMI 自由电子激光器(FEL)是基于 S 波段直线加速器的外部 FEL[22]，可在 4~80 nm 基本输出波长范围内实现高增益谐波的产生。保证这种 FEL 设备成功运行的关键要求之一是电子束和激光器之间的时间重叠的稳定性。目前 FERMI 激光器的均方根时间抖动约为 50 fs。相反，电子束到达时间的抖动基本上由光电注入器驱动激光器相对于电子枪射频相位的到达时间来确定，束流稳定性参数为：幅值 0.018%，相位 0.056°。

国际直线对撞机(ILC)阻尼环注入和抽取踢腿具有非常特殊的作用：将束间距 189~480 ns 注入阻尼环时压缩为 3~9 ns，然后在注入时解压缩为 189~480 ns。在 KEK 加速器测试设施(ATF)上进行了带有原型带状线喷射器的束流提取实验，踢脚由两个 60 cm 长的带状线电极单元组成，成功提取了阻尼环中存储的多束光束(30 束，间隔为 5.6 ns)，束间距为 308 ns，测得的踢角稳定度为 3.5×10^{-4}，ILC 束流参数为：能量 5 GeV，束团长度 3~9 ns，峰值踢稳定度 0.07%[23-25]。

现阶段日本的 SACLA 加速器、瑞士 Paul Scherrer 研究所的 SwissFEL 加速器、瑞士 CTF3 加速器、美国 LCLS-II 加速器的束流稳定性较好，它们大多进行了稳定性方面的改进，稳定度可达 10^{-4} 量级，且输出的电流强度覆盖 mA 到百安培范围，这是单电子隧道效应所无法比的[26]。此外，由于上述装置输出的均是强流高能的束流，在稳定性控制方面不如弱流电子束，因此若能降低电子流强，适当减小能量，重点关注束流稳定性方面，可以预见束流的稳定性可得到进一步的提高，这也意味着，基于电子加速器的量子电流发生装置在量子电流的核心指标方面有望超越现有的单电子隧道效应[27-28]。

1.3 电流量子传感

互感器作为电力系统中基本电气量的量测设备，广泛地应用于电力系统的计量、线路保护监测等重要环节[29]。电网的智能化和自动化的发展，对互感器产品也提出了更高要求，互感器的安全性、环保性、智能化等也是互感器的发展趋势。传统的电磁式互感器由于测量频带窄、动态范围小、输出为模拟量等局限性，难以适应智能电网的发展要求。随着电压等级的不断提高，由于绝缘的需要，互感器的体积与重量几何增加。电子式互感器具有绝缘结构简单、无磁饱和与铁磁谐振、暂态响应范围大、重量轻、体积小、输出信号数字化等优点，能够适应智能电网的发展方向，已经越来越多的应用于各种自动化变电站中，将电子式电流互感器应用于电气成套设备中，全面提升了产品的智能化水平，极大地加快了智能化建设的脚步。然而，在国家电网公司智能变电站试点阶段，电子式电流互感器却存在如电子式器件和光学器件抗干扰问题、温度问题、积分漂移等问题。准确度与稳定性问题已成为电子式电流互感器在电网中正常使用的最大瓶颈与障碍。因此，如何提高电子式互感器的准确度与稳定性，是亟待解决的技术难题。

电流量子传感技术是指基于量子精密测量技术，例如原子气体、玻色–爱因斯坦凝聚体、超导量子干涉仪(SQUID)、力探测磁共振、巨磁电阻(GMR)和金刚石氮空位(NV)色心体系等量子体系对磁场进行测量，再通过空间磁测量或者零磁通原理对电流实现测量。由于量子精密测量构建的是一个相对测量系统，能够很好地消除环境产生的共模信号影响，具有良好的温度适应性和稳定性，因此有助于在电力系统内实现超越经典方法的电流测量性能。

图 3 展示的是各个技术的测磁灵敏度和空间分辨率，相比于其他量子磁测量方法，金刚石探针量子传感器具有超高的磁场测量灵敏度和稳定性，对磁场探测的灵敏度达到 9×10^{-13} T/Hz$^{1/2}$，最高工作温度可达 600 K，且体积小、可靠性高，更加适合应用于电力系统复杂的应用环境。

基于金刚石 NV 色心的精密测磁方法，随着近十年来的发展，已经取得了长足的进步。该项技术从 2008 年提出以来，迅速成为固态量子材料测量领域的一项“颠覆性”技术。美国 DARPA、欧盟“地

平线 2020”计划等重大科研经费均将该技术列为重要研究路线之一。目前，国际上已有哈佛大学、麻省理工学院、斯图加特大学、苏黎世联邦理工(ETHZ)、IBM 实验室等几十个著名高校和研究机构开展了相关研究。近年来，基于该技术，量子纠错算法、量子隐形传态、单分子自旋探测等量子技术领域重要“里程碑式”的工作相继出现，共有三十余篇文章发表在国际顶级期刊《自然》和《科学》上，上百篇 SCI 一区论文发表，成为一大重要的科研领域，高端市场潜力巨大。

2010 年，美国伯克利大学的 Budker 教授通过红外光探测的方法实现了基于系综氮–空位色心的低频磁场测量其探测频率范围为直流到交流 100 Hz，探测灵敏度达到 7×10^{-9} T/Hz$^{1/2}$[30]。2012 年，美国哈佛大学的 Walsworth 教授通过光波导边带收集的方法提高了荧光收集效率使得其在 20 kHz 频率处的磁测量灵敏度达到 10^{-10} T/Hz$^{1/2}$[31]。2013 年德国斯图加特大学的 Wmchtrup 教授通过采用序列方式、利用抛物面透镜收集实现了 20 kHz 频率处 0.9×10^{-12} T/Hz$^{1/2}$ 的灵敏度[32]。2016 年，Budker 教授利用 NV 色心的基态能级免交叉点实现了不使用微波的磁测量技术[33]。2017 年，美国哈佛大学的 Walsworth 教授采用了相消方法来抑制激光的噪声，还同时利用了两个 NV 主轴和三个 14N 核自旋造成的超精细结构来实现了 15×10^{-12} T/Hz$^{1/2}$ 的高灵敏度[34]。2020 年，Acosta 教授将磁通聚集方法结合系综氮－空位色心来发展系综氮－空位色心磁测量方法，该方法实现了 0.9×10^{-12} T/Hz$^{1/2}$ 的灵敏度[35]。在 2020 年 MIT 的 Bany 教授提出了介质腔微波读出方法，在 5 kHz 附近频点处也实现了接近 3×10^{-12} T/Hz$^{1/2}$ 的灵敏度[36]。

国内在系综 NV 色心磁测量领域的研究相对起步稍晚，自 2016 年国内开始有团队开展该领域的研究，包括中科大团队、北航团队以及中北大学团队等。到 2020 年为止，国内团队对该领域开展的相关工作包括：结合磁通聚集方法将系综氮–空位色心磁测量灵敏度提升 0.2×10^{-12} T/Hz$^{1/2}$[37]、面向低频磁测量应用发展高频率分辨率以及高带宽的稳态磁测量方法[30]、发展异形荧光收集透镜提高荧光收集效率[31]、发展能够产生高均匀性微波场的辐射结构用于系综氮–空位色心的操控[38]、发展边带棱镜反射式光波导荧光收集方法提高荧光收集效率等[39]。

尽管国内在诸多领域开展了量子精密测量技术的应用研究，但在电力系统的应用研究方面还非常少。只有在国家电网公司科技项目的支持下，安徽省电力科学研究院与中国电科院联合开展了基于金刚石 NV 色心的电流互感器的研究，基于磁传感器的空间分布实现对一次电流的测量，设计指标为 0.1 级，完成了世界首台量子电流互感器的研制，并在安徽 110 kV 潜水变挂网，见图 4[40]。但是该样机依然存在如下几个问题：微波源需要同轴电缆引入到传感端，即高压端，会带来绝缘的问题；传感结构的空间布局，容易受到振动等环境因素的影响；传感头与光纤分离，不易于激光信号和荧光信号的采集；样机体积过大。因此尚存在较大的优化和改进的空间。

1.4　电力电流量子比例

为了解决我国高电压大电流计量领域的量值溯源问题，填补了我国工频大电流比例标准空白，1977 年，国家标准计量局组织在国家高电压计量站筹建工频电流比例国家基准，并于 1985 年通过了国家计量局和水利部组织召开的鉴定会验收。工频电流比例基准成为我国电力行业唯一保存的电磁国家

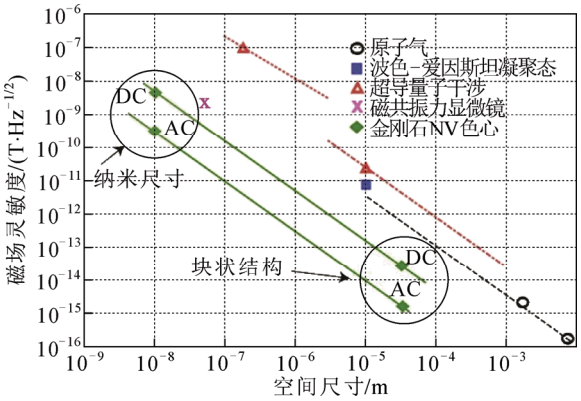


图 3　量子传感器测磁灵敏度对比[41]

Fig.3　Comparison of magnetic sensitivity of quantum sensors[41]



图 4　世界首台量子电流互感器挂网于潜水变

Fig.4　The quantum current transformer hanging on Qianshui transformer station

计量基准。2017 年国家质检总局依法对原有的 183 项国家计量基准进行了全面系统复核，发布了现行有效的 177 项法定国家计量基准，将国家高电压计量站建立和保存的“工频大电流比例基准”收录在最新的《中华人民共和国国家计量基准名录》中。

现阶段我国高电压大电流比例标准技术水平已经达到 10^{-6} 量级[42-44]，电流覆盖 5 A~60 kA，电压等级覆盖 1~1000 kV。目前高准确度标准器，采用优化电磁结构、提高测量精度等传统技术手段所能提升的准确度水平已接近物理极限。标准器误差在突破 10^{-6} 级别的超高准确度时易受电场、磁场、温度等多参量混叠影响。传统技术手段瓶颈限制了高准确度标准器计量性能继续提升。

1972 年澳大利亚的 Harvey 提出了低温电流比较仪的概念。运用迈斯纳效应，直接在超导屏蔽外皮上得到比例线圈电流的安匝数和，消除了磁调制式直流电流比较仪铁芯磁导率的限制；用超导量子干涉器(SQUID)取代磁通门作为对不平衡量产生的磁通的探测器，大幅度提高了探测灵敏度。低温电流比较仪测量不确定度的理论值可以达到 10^{-12} 量级。

低温电流比较仪（见图 5）是现代电测量技术中最为准确的比例量具之一，其发展之初并不是为了作为电流比例器具，而是为传递量子化霍尔电阻。量子霍尔电阻作为电阻量子基准启用后，低温电流比较仪受到各发达国家的充分重视，成为了电学精密测量的重要发展方向之一。从 1972 年澳大利亚的 Harvey 提出超导低温电流比较仪的概念后，各国科学家都在不断地完善和修改国际计量局方案。在科技研究的进程中，日本 ETL 研制了基于自平衡式的低温电流比较仪电桥，用于电桥中不平衡电流的测量，美国 NIST 和英国 NPL 研制了低温电流比较仪电桥，应用于高值阻抗和大工作电流的测量，此外，英国 NPL 相继研制了基于高温超导的低温电流比较仪电桥，BIPM 研制了适用于 1 Hz 以下频率的交流低温电流比较仪电桥，上述低温电流比较仪电桥均满足 10^{-9} 量级的电磁计量基准复现性。

1988 年我国建立量子化霍尔电阻标准的研究课题，2000 年中国计量科学研究院完成了在低温电流比较仪的基础上对量子化霍尔电阻量值传递实验，在 CIPM 组织的 100 Ω 国际量值比对 CCEMK-10 的国际比对实验中，我国的不确定度最小。中国计量科学研究院张钟华院士采用低温电流比较仪传递量子化霍尔电阻量值，并于 2004 研制成功并进行验收，该低温电流比较仪电阻电桥系统的电阻测量不确定度达到 10^{-10}，至此，我国在不确定度指标方面达到较为领先的水平。

表 1 国家工频电流比例基准技术参数

Table 1 Technical parameters of national power frequency current proportional reference

基准序号	测量范围	不确定度 最大允许误差
81001、81002	(5~30)A/5A	0.2×10^{-6}
81003	(5~100)A/5A	0.3×10^{-6}
81004	(5~200)A/5A	0.4×10^{-6}
81005	(50~2000)A/5A	0.4×10^{-6}
81006	(1000~10 000)A/5A	1×10^{-6}
81007	(5000~60 000)A/5A	1×10^{-6}

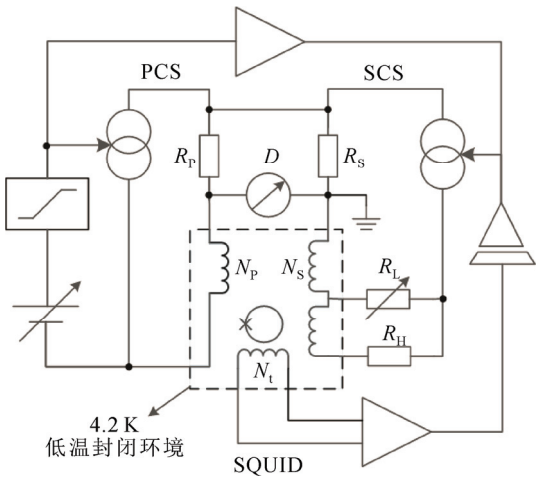


图 5 低温电流比较仪

Fig.5 Cryogenic current comparator

就目前低温电流比较仪的进一步发展来说，在低温电流比较仪法的基础上，尽量消除测量过程中超导量子干涉器件(DC-SQUID)的 1/*f* 噪声、非线性特性和电流跳跃以及低温系统氦气气压波动和冻结磁通引起的附加噪声，提高系统信噪比，突破超导泄露磁通、磁平衡监测方面是研究更高不确定度水平与稳定性的低温电流比较仪必须要解决的问题。

目前国外所研制的低温电流比较仪均是基于 SQUID 作为磁通探测器对不平衡磁通进行测量，但由于检测线圈分布参数使反馈调节产生暂态过程，导致 SQUID 输出信号存在“跳跃”聚焦于采用新型磁探测器(金刚石 NV 色心)来作为低温电流比较仪磁探测器，进而避免 SQUID 在磁测过程中遇到

的磁通跳跃问题。

低温超导电流比较仪工作时超导材料与SQUID都要在低温液氦环境下。由于氦气的昂贵，挥发排出的氦气要经过回收管道回收利用。实验中发现，每当对回收气柜进行压气操作时，会对液氦杜瓦瓶中的气压造成冲击波动，此时会对测量过程产生影响，回收柜进行压气操作时减弱其对杜瓦瓶中气压的影响是削弱液氦气压波动噪声的关键。

低温超导电流比较仪具有超高电流比例准确度，就目前的研究主要围绕量子霍尔电阻开展，其工作电流往往在mA以下。随着电力、铁路、核工业等关键领域的发展，对极端大动态电流精密测量提出更高要求电力，这些领域电流一般在kA量级，此时会带来发热、超导气压不稳等一些列问题，此外磁通信号跳跃、动态范围小等因素对超导量子干涉仪磁探测灵敏度与量程存在制约，限制了其在大电流领域的应用。

低温电流比较仪理论上可通过不断增加原副线圈的匝数比来提高电流分辨率，但当匝数比过大时，需要考虑线圈自身产生的磁场影响以及实际测量过程中采样电阻校准不确定度的影响。因此突破大变比电流比率自校准的难题是使得低温电流比较仪测量范围增大，拓宽应用领域不可忽视的一项技术。

随着半导体和数字处理技术的不断进步，微处理芯片的功能和计算能力的不断提高，利用微处理芯片设计控制电路使仪器仪表的智能化和自动化成为一种设计趋势和发展潮流。利用数字化工程设计更新低温电流比较仪作为一种先进的仪器改进模式，近几年才正式提上日程。

2　量子电压及比例标准

2.1　量子电压标准

2.1.1　直流量子电压

随着20世纪后半叶量子物理理论的不断完善，在为电压计量领域的相关研究提供参考的同时，精密电磁测量技术不断发展，计量科学呈现出利用量子标准代替传统实物标准的进步发展趋势。

20世纪80年代，美国国家标准与技术研究院(NIST)和德国联邦物理技术研究院(PTB)联合研制出世界上首只集成串联的SIS型约瑟夫森结阵，并用SIS型串联结阵建立了1 V直流约瑟夫森电压基准。约瑟夫森量子电压的建立实现了电压伏特从实物基准到自然基准的过渡，将直流1 V电压量值传递的不确定度指标从 1×10^{-7} 量级提高到 2×10^{-8} 量级[45]。我国于分别1993年和1999年先后建立1 V和10 V直流约瑟夫森量子电压基准[45]。中国航天机电二院203所也建立约瑟夫森电压基准装置[46]。量子电压标准技术基础研究是精密电压测量的一种不可替代的技术手段，不仅可以完善现有的计量标准，提高我国计量能力和水平，而且对于交直流电压的高端测试开拓了很好的应用前景。

2.1.2　交流量子电压

20世纪90年代，美国和德国国家计量院率先开展了基于约瑟夫森效应的交流量子电压标准研制[46]。

目前，国际上交流量子电压标准分为可编程约瑟夫森交流量子电压标准和脉冲驱动型交流量子电压标准两种方案，其中可编程约瑟夫森电压标准(PJVS)的工作原理是通过改变处于工作状态的约瑟夫森结数量来合成电压台阶近似的交流波形。该方案发展较为成熟，能输出较高有效值的量子电压，但是由于过渡过程其波形中包含谐波成分[47]。90年代中期，美国NIST和德国PTB分别开发了SNS和SINIS结构的新型可编程约瑟夫森结阵，可用于合成交流约瑟夫森量子电压，SNS和SINIS结构的交流量子电压标准装置合成工频范围交流电压的不确定度均优于 1×10^{-6} 量级[48]。2006年至2009年，中国计量科学研究承担了国家科技支撑计划项目“可编程约瑟夫森电压量子电压基准(PJVS)研究”课题，以新型SINIS约瑟夫森量子电压器件为基础，旨在建立新一代量子电压基准。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}[49-51]。

另一种是脉冲驱动型交流约瑟夫森电压标准(JAWS)，它通过改变微波的频率或者说驱动脉冲的疏密，来合成所需要的电压波形。与PJVS合成电压的方式不同，JAWS巧妙地利用磁通量子原理，采用一系列高速电流脉冲来驱动约瑟夫森结阵。该技术方案仍处于发展当中，相比于可编程型合成的阶梯波，其具有免台阶切换、频谱纯净、频带宽等优点，但输出幅值较低[52]。目前，美国国家标准与技术研究院(NIST)和德国联邦物理技术研究院(PTB)通过多阵列联合驱动的方式分别实现了4 V和1 V的脉冲驱动型交流量子电压合成[53-55]。2012年，中国计量科学研究院研制了微伏量级的量子电压噪声源装置和mV量级的ACJVS交流量子电压

装置，分别用于玻尔兹曼常数测量和交流电压量值溯源，同时，提出了一种新型的脉冲驱动型任意量子电压合成方法，使感应分压器的溯源不确定度下降了近 3 个数量级。2020 年通过驱动包含 4 个子阵列，每个子阵列含 12 810 个约瑟夫森结的结阵芯片，并结合 4 通道联合低频补偿的方式，成功产生了 1 V 有效值的脉冲驱动型交流量子电压[56]。

2.1.3 量子电压比对

2011 年美国 NIST 采用采样和多路复用方法，直接比较 JAWS 和 PJVS 输出幅值为 100 mV，频率为 500 Hz 的信号差值，得到(−0.18±0.26) μV/V 的相对一致性[57]。2015 年德国 PTB 采用差分采样方法，在测量信号幅值为 1 V，频率为 250 Hz 的条件下，JAWS 和 PJVS 之间交流量子电压的差值为 (+3.5±11.7) nV/V[58]。然而，由于输出电压幅值和信号频带范围的限制，即 JAWS 输出电压幅值最高 4 V(有效值)，PJVS 可靠输出波形频率范围小于 1 kHz。因此，两种原理的量子电压系统并未开展在宽频带范围内的比对。

2.1.4 存在的问题

1）目前合成交流量子电压的技术方案有 2 种，可编程型和脉冲驱动型约瑟夫森交流量子电压，其合成方法、驱动原理、计量特性各不相同。虽然约瑟夫森效应是具有永恒不变性的量子物理现象，但是目前没有成熟的试验方法验证不同材料、技术方案、生产厂商制造的交流量子电压系统之间，在宽频带范围内的一致性和可靠性。

2）脉冲型约瑟夫森量子电压合成方法还处于发展阶段，其在宽频带交流领域具有巨大的应用潜力，但其系统性误差有待验证。通过研究可编程型和脉冲型约瑟夫森量子电压的比对方案，分析不同原理量子电压系统间可能存在的系统误差，可以帮助量子技术和量子计量标准准确度进一步提高。

3）通过比对不同原理生成的交流量子电压信号，验证其量子电压的等效性，比较不同原理交流量子电压在不同频率下的计量特性，研究其在交流领域的应用特性，寻找不同原理的适用范围和适用场景，可以为实现约瑟夫森芯片在电压量传中的最优技术指标，以及量子化发展提供技术支撑。

2.1.5 未来发展

为了实现芯片级的计量标准器，以美国 NIST 为代表的发达国家计量院已布局研究新一代量子计量标准，期望基于微加工技术实现量子效应的小型化和芯片化，以实现多场景下的标准级原位测量。与此同时，中国计量院也开展了量子标准装置小型化、集成化、便携式方向的研究，正在研究基于制冷机的可用于现场校准的免液氦量子电压标准系统。

国家电网计量中心将通过分析可编程型和脉冲型约瑟夫森量子电压的工作原理、驱动方法、合成方法，研究可编程型和脉冲型正弦波形高准确度关联的实现方法、信号发生时序与电压比对信号控制策略，形成脉冲型和可编程型交流电压比对方法；开展交流量子电压比对试验方案研究，分析可编程型和脉冲型量子电压比对误差产生来源，形成比对结果不确定度评估方法，分析可编程型和脉冲型量子电压标准的计量特性和适用场景，为后续其他电参量的研究提供参考。将结合国际和国内对量子化计量技术的研究现状、工作路径、未来发展方向，分析国家电网公司应对量子化变革中的发展站位，综合考虑投入经济性和技术发展态势，探索公司近期及中远期量传体系改革方向，提出公司量子化计量工作实施路径，保证公司在量子化变革中的技术先进性水平。

2.2 量子电压比例

目前，电力系统中常见的高电压信号类型主要为工频和直流信号，通常采用高压测量设备进行测量，为保证高电压信号测量的准确可靠，需要利用高压计量标准装置对高压测量设备进行量值溯源，溯源方式一般包括检定和校准。比例测量原理的高压计量标准装置具有较高的测量准确度，在国际上作为国家的最高计量标准被广泛采用。目前，工频和直流电压比例标准装置的电压等级达到 1000 kV，准确度分别优于 0.02%和 0.005%。

随着约瑟夫森电压效应的推广应用，美国、德国、日本及中国等国家计量技术机构对量子电压标准开展了大量研究，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[50-60]，促进了量子电压标准在交、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。在溯源应用方面，我国也开展了电力系统的谐波电压[61]、电压比例[62]和电子式互感器校验仪[63]等计量标准的量子化溯源应用研究。目前，可编程量子电压标准作为高准确度交直流电压量值溯

源的基标准装置，促进了其在电压比例溯源方面的应用。

在直流量子电压比例方面，中国计量院参加1999年国际组织的“直流电压比率比对”项目，采用约瑟夫森电压基准对作为传递标准的直流电压分压器的1000 V/100 V和1000 V/1 V比率值进行测量[64]，如图6所示。

约瑟夫森电压基准采用20 208个约瑟夫森结串联而成的10 V约瑟夫森结阵，直流电压可在0.1~10 V范围内连续可调。采用固态电压标准732B作为直流电压源，采用低热电势多路转换开关连接结阵与被测电压，并用一台高内阻的精密数字电压表HP3458来测量串联结阵电压与被测电压的差值。量子电压标准测量1 V和10 V时具有很高的准确性，由于分压器内阻负载影响，测量直流电压分压器的1000 V/100 V和1000 V/1 V比率值时，量子电压标准在小电压下的测量不确定度水平会有所降低，因此，需要增加100 V/1 V比率测量结果进行旁证。试验过程中忽略温度和湿度的不规则变化影响，测量不确定度优于2.4×10^{-7}。

北京东方计量测试研究所采用同样方案对直流电阻分压箱4902的比例进行了测量，获得了直流电阻分压箱4902的10:1和100:1的分压比结果，测量的不确定度可达到0.9×10^{-7}和3×10^{-7}。

PTB提出一种基于双路可编程量子电压标准的阻抗桥电压比例测量方案[65]，如图7所示。

两个量子电压标准产生频率相同，极性相反的方波，施加到Z_1和Z_2组成的阻抗桥两端，利用放大电路及锁相放大器对阻抗桥中间电位进行测量，通过微调两路可编程量子电压的幅值和相位实现阻抗桥的调零，读取锁相放大器测量示值，结合两路可编程量子电压的幅值和相位，计算阻抗桥在的比差和角差。当Z_1和Z_2为100 pF电容，频率为800 Hz时，测量1:1比例的最小测量不确定度为0.9×10^{-8}，当Z_1和Z_2为10 pF电容，频率为800 Hz时，测量的1:1的测量不确定度为$(2\sim3)\times10^{-8}$。测量100 pF时的1:10比例的测量不确定度约为1:1时的5倍。该溯源方案在低频和高频下，由于阻抗增加和暂态影响，测量不确定度有所增加。

基于同样原理，PTB提出了基于脉冲驱动量子电压的感应分压器比例测量方案，如图8所示。量子电压1施加V_1在感应分压器一次侧，量子电压2作为参考施加在感应分压器的二次侧，两路量子电压的幅值比例与感应分压器标称比例D_N相同，调节两路量子电压的相位使锁相放大器的幅值最小化，读取锁相放大器的值，作为感应分压器的比例误差，该方法测量的比例测量不确定度可达到10^{-8}量级。

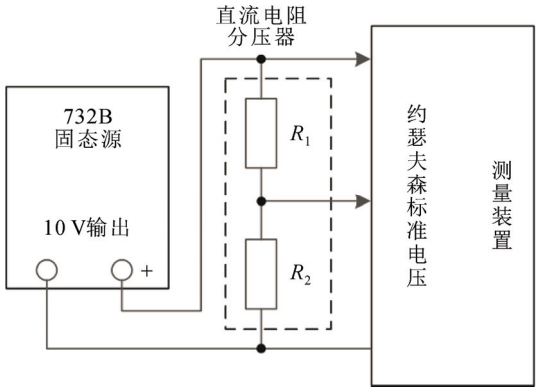


图6　量子电压标准测量直流电阻分压器比率值连线示意图

Fig.6　Quantum voltage standard measurement DC resistance divider ratio value connection diagram

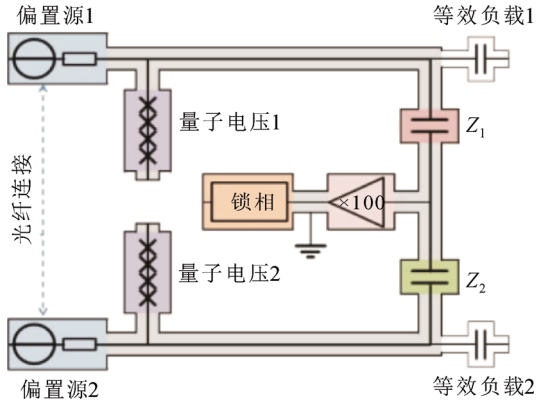


图7　基于量子电压的阻抗桥及比例测量原理

Fig.7　Impedance bridge and proportion measurement principle based on quantum voltage

中国计量院研制了双路可编程量子电压标准系统，在2 V SNS结阵的中间位置引出一个公共的电压抽头，上半部分结阵和下半部分结阵构成两路可编程量子电压结阵，通过平衡三进制驱动算法控制产生两路成比例的量子电压信号。中国计量院设计了基于交流量子电压比例的IVD测量方案[66]，如图9所示。

根据IVD标称比例，采用商用FLUKE 5720 A作为电压信号源，利用双路可编程量子电压输出两路对应IVD比例倍数的交流信号V_1和V_2，通过两路差分采样通道对IVD输入端和输出端的信号与量子电压信号进行同步差分采样，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。考虑信号检测和传输过程中的引线负载参数影响、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，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[67]。

上述基于量子电压标准的交流、直流电压比例测量方法可获得较高准确度的量子电压比例测量，测量不确定度可达到 1×10^{-7}。但由于量子电压的输出幅值限制，该方法仅适用于 10 V 及以下的电压比例测量，无法适用于高电压比例标准全量程范围的电压比例量值溯源。

中国电力科学研究提出了一种基于可编程量子电压的电压比例标准溯源方法，通过量子电压标准电压信号的引入，实现 1 kV 电压比例标准的比例量值溯源，提升比例标准装置溯源设备的准确度，从而提升电压比例标准的溯源不确定度水平[68]，如图 10 所示。

1 kV 电压比例标准采用 10 段感应分压器结构，包含励磁绕组 W_1 和比例绕组 W_2，为了匹配量子电压标准的 10 V 幅值，采用标称比例为 1000 V：10 V 的辅助标准器 A 作为电压比例标准，1 kV 电压比例标准二次比例绕组增加标称比例为 100 V：10 V 的辅助标准器 B，使 1 kV 电压比例标准和辅助标准 B 的额定输出为 10 V，再利用双通道的量子电压测量系统，测量两个辅助标准二次输出的比差和角差。参照参考电势法[69]，每次试验，辅助标准器 B 的一次绕组依次在 1 kV 电压比例标准的二次比例绕组间切换，从而获得 1 kV 电压比例标准各段误差 ε_i (i=1，2，…，10)，根据下列公式计算出 1 kV 电压比例标准的 K/N 系列的比例误差。

$$\varepsilon_{K/N}=\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}\varepsilon_i-\bar{\varepsilon} \tag{2}$$

式中 $\bar{\varepsilon}$ 为 1 kV 电压比例标准各段误差 ε_i 的平均值。

根据上述溯源方法，要得到 1 kV 电压比例标准的 1/10，2/10，…，9/10 的比例误差，从而实现 1 kV 电压比例标准误差的量子化溯源。

为了降低辅助标准 B 在 1 kV 电压比例标准的二次比例绕组间切换过程中悬浮电位及负载泄漏电流对被测电压比例标准误差的影响，该辅助标准器需要采用分段等电位屏蔽和高输入阻抗设计，将辅助标准 B 的屏蔽层与 1 kV 电压比例标准对应励磁绕组连接，采用磁导率较高的铁芯材料(纳米晶)以及增加铁芯截面积的方式提高辅助标准 B 的输入阻抗，以保证辅助标准 B 在整个溯源过程中的误差稳定性[70]。

该溯源方法中采用辅助标准实现与量子电压幅值的匹配，可应用于现有的电压比例标准溯源线

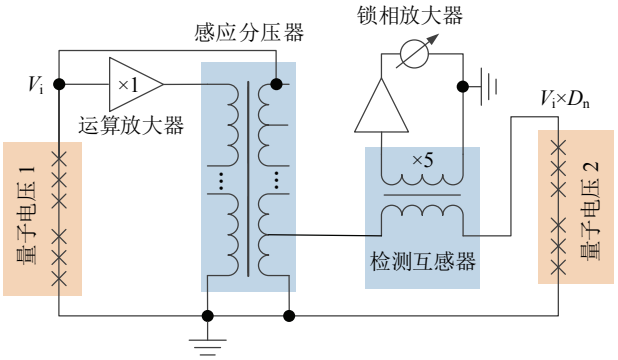


图 8 基于量子电压的感应分压器比例测量原理

Fig.8 Proportion measurement principle of inductive voltage divider based on quantum voltage

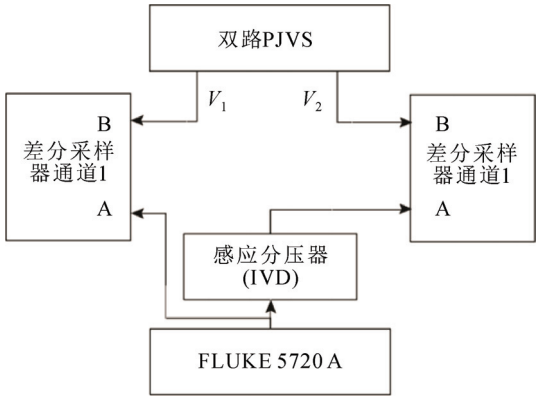


图 9 基于交流量子电压比例的 IVD 测量方案

Fig.9 IVD measurement scheme based on AC quantum voltage ratio

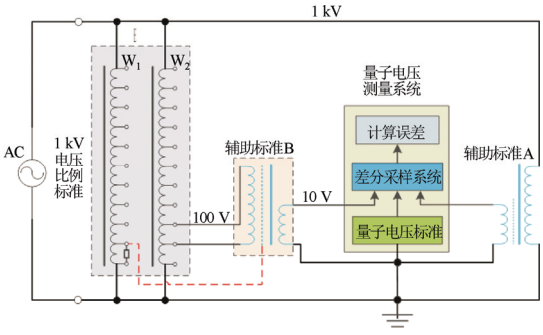


图 10 基于可编程量子电压的电压比例标准溯源方案

Fig.10 Voltage ratio standard traceability scheme based on programmable quantum voltage

路中，理论上可适用于任意电压等级比例标准的量子化溯源。但该溯源方法额外引入了辅助标准 B，因此需要对辅助标准进行特殊设计，以降低其对比例测量的影响。

3　量子电能

国际单位制并没有直流电能这个量值，可由电压、电流以及电阻值计算得到，由于量子电流尚处于研究阶段，无实用化的量子电流标准出现，而电压、电阻是已经量子化的，所以可以通过电压、电阻溯源电能量值。

3.1　交流量子电能

直至 20 世纪 90 年代，国际上基于约瑟夫森效应和量子化霍尔效应开启了电压和电阻单位的常数定义后，2000 年左右美国、德国相继建成了基于约瑟夫森量子电压的电能标准装置，实现了电能计量标准从实物向物理常数转变的重大技术革新。其中，美国 NIST 基于可编程约瑟夫森电压标准建立了标准功率源[71]，可测电压幅值高达 120 V、电流为 5 A、频率范围为(50~400)Hz，测量不确定度为 6.0×10^{-6}[72]。德国 PTB 通过可编程约瑟夫森电压标准，对被测功率源的输出电压、电流进行准确测量，即可实现电能测定，可测电压幅值高达 120 V、电流为 5 A、频率范围为(50~400) Hz，测量不确定度为 5.0×10^{-6}[73-74]。近几年，英、法、日、韩等国家也开始了基于约瑟夫森效应创建电能标准装置的研究，实现方案与美、德类似。

国内除中国计量科学研究院开展了基于量子电压测量交流电能的研究外[75-77]，国家电网江苏公司也在开展相关工作研究[78]。中国计量科学研究院先后申请了国家 863 研究计划项目《新型数字化计量仪器的溯源与量传技术》和国家质检总局科研项目《电磁计量数字化及宽频带计量标准装置研究》，主要研究内容即为基于约瑟夫森量子电压创建新一代国家电能标准装置，旨在进一步提高我国电能计量准确度水平，同时解决数字化电能无法直接溯源至电能实物标准的难题。目前，中国计量科学研究院已经基本完成了量子化的电能计量单位复现工作，创建的基于量子电压的新型电能标准装置，可测电压幅值高达 120 V、电流为 5 A、频率范围为(50~1000) Hz，测量不确定度为 4.9×10^{-6}。

3.2　直流量子电能

在直流电能方面，根据 BIPM 国际计量局网站显示，目前全球尚没有国家建立直流电能计量基准，但国际上已经将为直流电能计量制定统一的法律框架列入《欧洲智能电网战略研究议程》。中国计量院已完成直流电能计量基准的研究课题，正在筹建基于量子电压的直流电能基准，相关技术及设备正在完善，建立时间尚未确定。中国计量院预计在直流电能检定系统表及相关规程发布后，向国家市场监督管理总局申请直流电能建标，开展相关溯源工作。国内除中国计量科学研究院开展了基于量子电压测量直流电能的研究外，公司系统内陕西公司、江苏公司等也在开展相关工作研究。

3.3　交直流量子电能

目前量子化计量基标准技术经过将近 30 年的技术发展与积累，相关技术已比较成熟，运行环境及要求也较前几年有了大幅度的改善。在量子交直流电能计量技术方面，NIST、PTB 及中国计量院研制了基于可编程约瑟夫森芯片的交直流电能计量标准，但其在幅值、频率量程范围扩展能力等方面还不能完全适应新型电力系统应用需求。与此同时，更具频谱纯净度及频率范围的脉冲型约瑟夫森计量标准技术刚刚兴起，其在交直流电能计量标准领域的应用处于起步阶段，还需要结合新型电力系统电能计量需求开展深入研究。为了进一步提升国家电网计量中心交直流电能计量能力，同时为后续扩展到更宽范围、更宽频带及任意波形、动态等更多量值溯源校准技术研究奠定基础，国家电网计量中心正在开展量子化交直流电能计量标准能力建设。

4　时间频率计量

时间是物理学中的 7 个基本物理量之一，时间的基本单位为秒。1967 年，第 13 届国际计量大会正式通过了秒的量子化定义：“秒是铯−133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所辐射的 9 192 631 770 个周期所持续的时间”。随着秒定义的量子化，“时间”从天文秒到量子秒，准确度水平提升了 10 个量级，成为应用最广且准确度最高的物理量，成为了 7 个国际基本单位中最基础和最准确的。在电力计量，时间的计量是其他物理量量值准确可靠的基础[78]。

原子秒的确定，使得时间频率计量可应用在许多高技术领域，高精度的时间频率已经成为国家科技、经济、社会发展中至关重要的参量，其应用范围从基础研究渗透到了工程技术应用和国计民生领域等各方面，关系着国家社会的安全稳定。随着互

联网发展和信息系统日趋复杂，高稳定、统一溯源的时间频率重要性日益凸显，根据我国国家计量法，法定时间频率量值应溯源到国家时间频率计量基准，尤其是电力、通信、金融、公安、交通、航空和航天等对安全、稳定有着高要求的行业及用户。

4.1 时间频率计量技术的整体进展和趋势

4.1.1 时间频率计量基标准

当前国内外大多数守时实验室的守时钟组都是由氢原子钟和铯原子钟组成，并通过国际时间比对和铯喷泉驾驭主钟产生准确的原子时标。例如美国标准时间 UTC、日本标准时间 UTC 以及我国国家计量院、航天 203 所和国家授时中心采用铯、氢钟组作为守时标准，先后建立了地方原子时[79-80]。当前，原子钟的测量精密度和准确度已分别达到 1×10^{-19} 和 1×10^{-16}，是国家时频体系的核心设备，常见的有铯原子钟、氢原子钟以及铯原子喷泉钟。

铯原子钟利用铯原子的最外层的电子绕着原子核旋转的速度，总是极其精确地在几十亿分之一秒的时间内转完一圈，稳定性比地球绕轴自转高得多。利用铯原子的这一特点制成了一种新型的钟——铯原子钟。具有优越的频率准确度和长期频率稳定度，且基本无漂移，主要应用于时频标准和守时。

氢原子钟是利用氢原子能级跳跃时辐射出来的电磁波去控制校准石英钟，稳定程度相当高，每天变化只有十亿分之一秒。氢原子钟是常用的时间频率计量基标准，被广泛用于射电天文观测、高精度时间计量、火箭和导弹的发射、核潜艇导航等方面，具有非常好的中短期频率稳定度，可长期连续运行，主要应用于守时[81]。

铯原子喷泉是铯原子钟的一种，主要利用磁光阱等方法将铯原子冷却，形成温度只有几微开的冷原子云，并通过激光获得与光频段跃迁相应的光信号，再用该光信号锁定实用频标的频率。由于用激光冷却，使原子速度比传统设备中的原子速度降低两个量级，因而提高铯钟的准确度，目前铯原子喷泉钟的频率不确定度已优于 5×10^{-16}，目前作为频率基准。

我国铯原子喷泉钟研制中实现了一系列国际首创，主要有：提出铯原子喷泉钟运行率的概念，将铯原子喷泉钟运行可靠性用定量表述，并在 2003 年率先达到运行率 95%；用单根光纤传输四束水平装载(即冷却光)改善对射光功率平衡；利用选态微波功率控制原子密度，改善冷原子碰撞频移评定；提出并成功实现正负交替采样，改善频率锁定稳定度[82]。

在原子钟不断发展的过程中，离子陷微波钟以及光钟已经开始出现，目前，光钟不确定度指标和稳定度指标均进入了 10^{-19} 量级。其中不确定度指标最高达到 9.5×10^{-19}(Al^+)，相当于 330 亿年不差一秒，时间尺度比宇宙的年龄还要长。光钟的研究在我国受到了高度重视，并被广泛关注，在国家基金委重大研究项目和国家基础重大项目(973)支持下，我国及时开展了光钟的研究我国科学研究者们在这个领域取得了重大突破，成功将 729 nm 钟跃迁激光器的频率锁定到钙离子钟跃迁参考跃迁频率上，实现了钙离子光钟的锁定，该钙离子光钟的实现标志着国内首台光钟的诞生。随着研究的深入，钙离子光钟的性能不断提高。目前，钙离子光钟的不确定度达到 2×10^{-17}，相当于 15 亿年不差一秒。另一个重要指标是稳定度，达到了 7×10^{-18}，为目前离子光钟的最好水平。

4.1.2 时间频率传递方法

时间频率传递技术是基于现代科技手段与实际应用需要而发展起来的技术手段，其目的是使相距一定距离的两个点或多个点的时钟与频率达到同步，从而实现它们高精度地协同工作[83]。

时间频率的远程传递主要依赖于 3 种方法：卫星双向法、光纤传递和 GNSS 卫星共视法。卫星双向法是利用地球同步卫星的转发器作为媒介，两地同时发送各自的时间信号进行比对得到两地钟的真正时差，主要有两种：一是利用卫星的射频通道对发对收秒脉冲，比对精度较高；二是利用秒脉冲同步伪随机码，该方法能进一步改善信噪比，提高时间同步精度；卫星双向时间频率传递是一个对发对收系统，原理如图 11 所示。

光纤传递是通过光纤进行精密时间传递的方法，在本地和远地端采用与卫星双向时间比对相同的方式实现两地时间同步以及通过频率信号的自外差环回比，对得到光纤链路噪声并使用延迟线补偿链路噪声的方式，将稳定的时间信号传递到远地端，并且在本地端补偿采用前置补偿技术补偿链路的传输时延，实现两地之间的时间同步[84]。

GNSS 卫星共视法需要两地接收机在相同的时间观测同一颗卫星，并通过同样的测量方法对数据进行处理，其原理如图 12 所示[79]。时间频率传递双方都将各方 GNSS 时频(t_{AGNSS} 和 t_{BGNSS})传递接收机同步到本地参考时间频率标准，双方记录同时段

的导航卫星观测数据，通过解算，分别得到两站参考时间频率标准与 GNSS 卫星系统时间的偏差，它们的单差之差为两站参考时间频率标准的比对结果，即两站时间频率传递结果。能够消除或明显减小了各误差因素对测量时间精度的影响。

4.2　国家电网时间频率体系架构和应用

4.2.1　时间频率量值传递体系架构

为保证国家电网有限公司时间频率计量量值的准确性和一致性，国家电网建立了较为完整的时间频率量值传递体系。按层级来分可分为 4 级：一级为国家电网时间频率最高计量标准；二级为省级时间频率标准；三级为台区/厂站时间频率标准；四级为时间频率应用终端。体系中每个层级覆盖不同的应用需求，上一级时间频率标准可向下量值传递，也可扁平化覆盖。目前已打通了国家时间频率计量基准–国家电网时间频率最高计量标准–省级时间频率计量标准–电力专业应用的标准量值溯源和传递通道。在中国电力科学研究院建立了以“三氢三铯”钟组为核心的时间频率计量标准装置作为国家电网时间频率最高计量标准，采用北斗卫星共视技术实时远程溯源至国家时间频率基准 UTC，与美国 UTC 的时间偏差优于 8 ns，频率准确度优于 2×10^{-14}。在省级电力公司建立省级时间频率计量标准作为国家电网二级时间频率标准，采用北斗卫星共视技术实时远程溯源至位于中国电科院的国家电网时间频率最高计量标准，时间偏差优于 30 ns，频率准确度优于 1×10^{-12}。在台区或厂站内建立卫星共视终端作为三级时间频率标准，通过卫星共视法直接溯源到省级时间频率计量标准，直接给用时终端或需测试监测的时钟源提供时间参考[85]。时间频率应用终端通过电力线、线缆、光纤、网络等方式溯源至三级时间频率标准。在业务应用中，对长距离(超过 5 km)或实验室远程设备检测的授时授频服务，采用共模共视的方式实现时频信号传递。对短距离(不超过 5 km)或实验室现场检测的授时授频服务，采用光纤实现时频信号的传递。

4.2.2　时间频率标准量值应用

国家电网建立的时间频率量值传递体系保证了国家电网时间频率量值的准确可靠，满足现有电力计量、信通、调度、继保和自动化的授时授频服务需求和实验室现场或远程时频装置检测需求，满足能源互联网源、网、荷、储各领域的应用需求。在发电侧，应用于电厂综合自动化管理与安全管理系统，为电厂系统的统一协调提供了保障，为保护设备、测控设备的维护人员对事故分析提供了精确的时间标志，对安全事故的预判预防起到了重要作用；新能源发电并网需要协调源测与网测的时频、相位一致，高精度的时间频率标准量值有利于新能源安全并网与有效消纳。在电网侧，统一向公司时频同步网进行授时授频，实现公司时频全同步；提供比对评估以及时频信号指标分析评估，支撑公司时频同步网长期稳定运行；提供电网设备时频相关性能测试环境；满足现有变电站二次设备的时间同步需求，进一步支撑未来大电网广域级联保护技术应用。开展向用电信息采集系统授时和时钟管理，将标准时间通过采集设备间互联互通的网络资源延

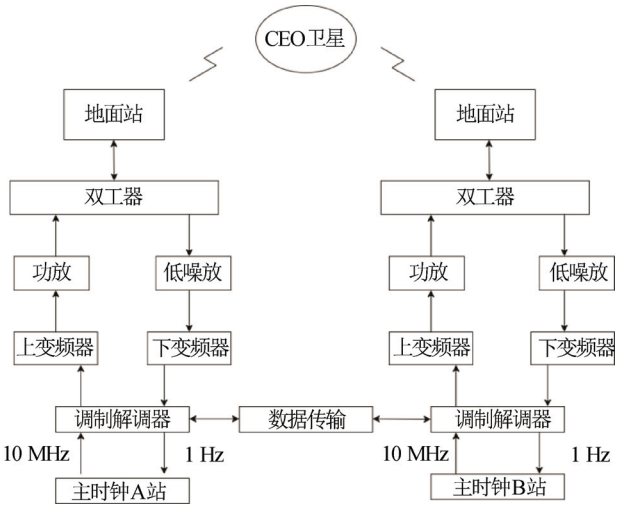


图 11　卫星双向时间传递结构图（图已经替换！）

Fig.11　Satellite two-way time transfer structure diagram

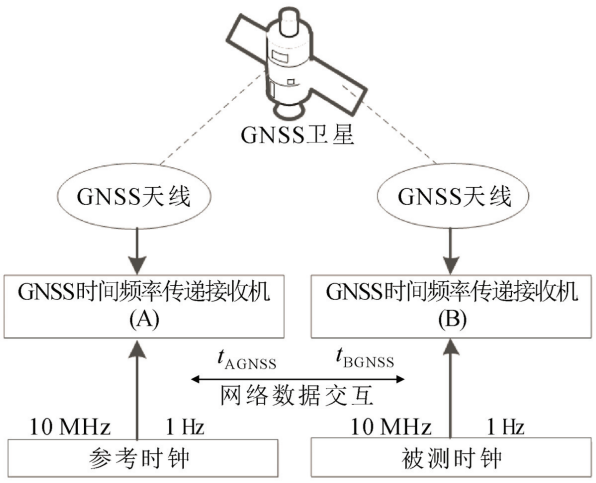


图 12　卫星共视技术原理图

Fig.12　Satellite common view technology schematic diagram

伸至电力计量末端设备，确保电力计量设备的时间准确统一；为电能表自动化流水线提供授时服务，确保电能表时钟检验检测结果的准确性；为国家电网商业密码管理系统提供准确的时间信号，支撑用电信息秘钥管理体系健康运行；为电力 5G 融合、边缘计算和智能协同服务相关产品性能检测与生产环境下的统一授时授频服务，将有助于提升能源互联网和 5G 等新兴技术的整体科研仿真与产业化应用水平[86]。

5 结论

从电力计量的发展可以看到，其核心已经由实物原器向以物理常数转变，国际计量的发展趋势是用物理常数复现单位。在电力系统中，电压、时间等量已经实现了量子复现，但是目前电流以及高电压中的比例装置的量子化进展距离实用化还有一定距离。

1）在量子电流方面，基于单电子隧道效应的量子电流装置需突破电流强度以及稳定性方面的难点，且需要在液氦条件下的使用给其未来在电力的应用增加了限制；基于电子加速器的方案虽在电流强度上有所优势，但在电子发射与控制方面不如单电子隧道效应精准。基于量子效应的磁传感技术在测量性能方面已经表现出远超过传统传感器的优势，前景空间相当广阔，需针对电力测量的实际需求，在宽量程与采样率方面需进一步提升。超导低温电流比较仪可能是未来大电流比例标准的发展趋势，但是大电流引入的热负载以及超导量子干涉仪在量程的限制，均是需重点研究和突破的方向。

2）在量子电压方面，10 V 量子电压技术已发展成熟，且可实现交直流输出，不确定度水平远高于传统的电压基准。提高带载能力以及如何与现有的电力溯源体系有效结合，是量子电压的电力应用需重点关注的内容。

3）在量子电能方面，NIST、PTB 及中国计量院研制了基于可编程约瑟夫森芯片的交直流电能计量标准，在不确定度水平方面与现有国家电能基准水平一致，但其在幅值、频率量程范围扩展能力等方面还不能完全适应新型电力系统应用需求。

4）在量子时间方面，国家电网有限公司建立了基于原子钟的时间频率量值传递体系，统一了国网时间量值，是目前在电力行业实际应用最好的量子技术。

电力与量子的融合研究刚刚起步，前景空间相当广阔、研究潜力很大，未来 5~10 年有望成为此领域取得重要突破的关键机遇期。

参考文献 References

[1] 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.

[2] 马爱文，曲兴华. SI 基本单位量子化重新定义及其意义[J]. 计量学报，2021，41(2)：129-133.
MA Aiwen, QU Xinghua. The quantized redefinition of the SI and its signification[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 41(2): 129-133.

[3] 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(增刊 1)：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(Supplement1): 261-274.

[4] MCGREW W F, ZHANG X, FASANO R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level[J]. Nature, 2018, 564(7734): 87-90.

[5] 刘玲玲. 二氧化钒纳米颗粒薄膜的金属—半导体相变[D]. 南京：南京大学，2011.
LIU Lingling. Semiconductor-to-metal phase transition in vanadium dioxide nanoparticle films[D]. Nanjing, China: Nanjing University, 2011.

[6] 陈伟亮，房 芳，袁小迪，等. NIM6 铯喷泉钟背景气体碰撞频移的评估[J]. 计量技术，2020(5)：11-13，6.
CHEN Weiliang, FANG Fang, YUAN Xiaodi, et al. Evaluation of the background gas collision frequency shift in NIM6 cesium fountain clock[J]. Metrology Science and Technology, 2020(5): 11-13, 6.

[7] KAESTNER B, KASHCHEYEVS V. Non-adiabatic quantized charge pumping with tunable-barrier quantum dots: a review of current progress[J]. Reports on Progress in Physics, 2015, 78(10): 103901.

[8] MARÍNSUÁREZ M. An electron turnstile for frequency-to-power conversion[J]. Nature nanotechnology, 2022, 17(3) : 239-243.

[9] SEO M, AHN Y H, OH Y, et al. Improvement of electron pump accuracy by a potential-shape-tunable quantum dot pump[J]. Physical Review B, 2014, 90(8): 085307.

[10] SCHERER H, LOTKHOV S V, WILLENBERG G D, et al. Steps toward a capacitance standard based on single-electron counting at PTB[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(2): 666-669.

[11] VAN DER HEIJDEN J, TETTAMANZI G C, ROGGE S. Dynamics of a single-atom electron pump[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 44371.

[12] 童光球，赵克功，张秀增. 单个电子隧道电流基准及其在计量科学中的潜在应用[J]. 物理，1997，26(7)：434-436.
TONG Guangqiu, ZHAO Kegong, ZHANG Xiuzeng. Single electron tunnel current reference and its potential application in metrology[J]. Physics, 1997, 26(7): 434-436

[13] TONO K, TOGASHI T, INUBUSHI Y, et al. Beamline, experimental stations and photon beam diagnostics for the hard x-ray free electron laser of SACLA[J]. New Journal of Physics, 2013, 15: 083035.

[14] SIEWERT F, BUCHHEIM J, BOUTET S, et al. Ultra-precise characterization of LCLS hard X-ray focusing mirrors by high resolution

slope measuring deflectometry[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4525-4536.

[15] PAL A, KACHHWAHA S S. Application of ultrasound energy for biodiesel production of non-edible oils and CI engine performance testing[J]. Journal of Pure and Applied Ultrasonics, 2013, 35(2/3): 68-75.

[16] ROUSSEL E, ALLARIA E, CALLEGARI C, et al. Polarization characterization of soft X-ray radiation at FERMI FEL-2[J]. Photonics, 2017, 4(2): 29.

[17] SHIRLOW E, DUGGAL K. The ILC articles on state responsibility in investment treaty arbitration[J]. ICSID Review-Foreign Investment Law Journal, 2022, 37(1/2): 378-542.

[18] EDUARD P, AIBA M, BETTONI S, et al. Emittance measurements and minimization at the SwissFEL Injector Test Facility[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2014, 17(10): 104401.

[19] RUBER R, ZIEMANN V, EKELÖF T, et al. The CTF3 two-beam test stand[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, 729: 546-553.

[20] LI Z B, FANG W C, GU Q, et al. RF design of a C-band compact spherical RF pulse compressor for SXFEL[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, 863: 7-14.

[21] YEH M S, WANG C E, CHANG L H, et al. Energy-efficient operation of a booster RF system for Taiwan light source operated in top-up mode[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 775: 46-53.

[22] ZHANG T L, MIAO Y X. The influence of quantum technology on the development of metrology and measuring science[J]. Aerospace China, 2016, 17(3): 28-35.

[23] 裴元吉. 电子直线加速器设计基础[M]. 北京：科学出版社，2013.
PEI Yuanji. Design basis of electron linear accelerator[M]. Beijing, China: Science Press, 2013.

[24] 邓庆勇. BEPCII 储存环逐束团测量研究[D]. 北京：中国科学院高能物理研究所，2015.
DENG Qingyong. The research of bunch-by-bunch measurement for BEPCII storage ring[D]. Beijing, China: The Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2015.

[25] RICHTER C, KALUZA M, KARSCH L, et al. Dosimetry of laser-accelerated electron beams used for in vitro cell irradiation experiments[J]. Radiation Measurements, 2011, 46(12): 2006-2009.

[26] GUNNARSSON J B, TORFASON K, MANOLESCU A, et al. Space-charge limited current from a finite emitter in nano- and micro-diodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(1): 342-346.

[27] 李小飞，余佶成，胡桐宁，等. 应用于电流量子化的弱流电子束装置概念设计[J]. 自动化仪表，2020，41(8)：61-65.
LI Xiaofei, YU Jicheng, HU Tongning, et al. Conceptual design of weak-current E-Beam equipment for the application to current quantization[J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(8): 61-65.

[28] 胡桐宁. 紧凑型亚毫米波 FEL 预注入器关键技术研究[D]. 武汉：华中科技大学, 2013.
HU Tongning. Key technology researches of submilimeter-wave FEL pre-injector[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[29] ACOSTA V M, BAUCH E, JARMOLA A, et al. Broadband magnetometry by infrared-absorption detection of nitrogen-vacancy ensembles in diamond[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(17): 174104.

[30] LE SAGE D, PHAM L M, BAR-GILL N, et al. Efficient photon detection from color centers in a diamond optical waveguide[J]. Physical Review B, 2012, 85(12): 121202(R).

[31] DUMEIGE Y, CHIPAUX M, JACQUES V, et al. Magnetometry with nitrogen-vacancy ensembles in diamond based on infrared absorption in a doubly resonant optical cavity[J]. Physical Review B, 2013, 87(15): 155202.

[32] WOLF T, NEUMANN P, NAKAMURA K, et al. Subpicotesla diamond magnetometry[J]. Physical Review X, 2015, 5(4): 041001.

[33] WICKENBROCK A, ZHENG H J, BOUGAS L, et al. Microwave-free magnetometry with nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(5): 053505.

[34] BARRY J F, TURNER M J, SCHLOSS J M, et al. Correction for Barry et al. optical magnetic detection of single-neuron action potentials using quantum defects in diamond[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(32): E6730.

[35] FESCENKO I, JARMOLA A, SAVUKOV I, et al. Diamond magnetometer enhanced by ferrite flux concentrators[J]. Physical Review Research, 2020, 2(2): 023394.

[36] EISENACH E R, BARRY J F, O'KEEFFE M F, et al. Cavity quantum electrodynamic readout of a solid-state spin sensor[J]. arXiv: 2003.01104, 2020.

[37] XIE Y J, YU H Y, ZHU Y B, et al. A hybrid magnetometer towards femtotesla sensitivity under ambient conditions[J]. Science Bulletin, 2021, 66(2): 127-132.

[38] XU L X, YUAN H, ZHANG N, et al. High-efficiency fluorescence collection for NV^- center ensembles in diamond[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 10787-10797.

[39] ZHANG N, ZHANG C, XU L X, et al. Microwave magnetic field coupling with nitrogen-vacancy center ensembles in diamond with high homogeneity[J]. Applied Magnetic Resonance, 2016, 47(6): 589-599.

[40] 赵　龙，仇茹嘉，孙　峰，等. 金刚石 NV 色心电流互感器的应用[J]. 微纳电子技术，2022，59(11)：1199-1204.
ZHAO Long, QIU Rujia, SUN Feng, et al. Application of NV center in diamond as current transformer[J]. Micronanoelectronic Technology, 2022, 59(11): 1199-1204.

[41] DEGEN C. Nanoscale magnetometry: Microscopy with single spins.[J]. Nature nanotechnology, 2008, 3(11) : 643-4.

[42] 周训通，胥建文，冯争人，等. ±800 kV 换流变压器调压引线电流引起的结构件环流研究[J]. 高电压技术，2018，44(7)：2424-2432.
ZHOU Xuntong, XU Jianwen, FENG Zhengren, et al. Research on structural parts loop current caused by current of voltage regulation leads of ±800 kV converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2424-2432.

[43] 周　峰，李　鹤，李文婷，等. 大电流测量传感技术综述[J].高电压技术，2021，47(6)：1905-1920..
ZHOU Feng, LI He, LI Wenting, et al. Overview of high current measurement sensing technology [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1905-1920.

[44] 熊　博，刘　俭，殷小东，等. 10~110 kV 高电压比例标准装置的 0.5×10^{-6} 误差自动精密测量方法[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3232-3239.
XIONG Bo, LIU Jian, YIN Xiaodong, et al. 0.5×10^{-6} error automatic precision measurement method of 10~110 kV high voltage proportional standard device [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3232-3239.

[45] HAMILTON C A. Josephson voltage standards[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(10): 3611-3623.

[46] 高　原，李红晖，沈雪槎. 我国的 1 V 及 10 V 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. 1 V and 10 V Josephson voltage standard in NIM[J]. Modern Measurement and Test, 2005, 13(3): 3-6.

[47] 周庚如，胡毅飞，赵桂芬，等. Josephson 阵列电压标准及对标准电池的自动化检定[J]. 宇航计测技术，1995，15(5)：48-56，65.
ZHOU Gengru, HU Yifei, ZHAO Guifen, et al. Josephson array voltage standard and automatic calibration for standard cell[J]. Journal of Astronaueic Metrology and Measurement, 1995, 15(5): 48-56, 65.

[48] 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.

[49] LANDIM R P, BENZ S P, DRESSELHAUS P D, et al. Systematic-error signals in the AC Josephson voltage standard: measurement and reduction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(6): 1215-1220.

[50] 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.

[51] KOHLMANN J, MÜLLER F, BEHR R, et a1. Development of Josephson junction series arrays for synthesis of AC voltages and arbitrary waveforms[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 43: 1385-1388.

[52] 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 Zengmin, GAO Yuan, LI Honghui. Research of Josephson arbitrary waveform synthesizer[J]. Acta Metrologica Sinica, 2012, 33(2): 154-157.

[53] BENZ S P, HAMILTON C A. A pulse-driven programmable Josephson voltage standard[J]. Applied Physics Letters, 1996, 68(22): 3171-3173.

[54] 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]// Proceedings of 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Denver, USA: IEEE, 2020: 1-2.

[55] 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.

[56] 周琨荔，韩琪娜，赵建亭，等. 1 V 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 Qi'na, 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.

[57] 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.

[58] BEHR R, KIELER O, LEE J, et al. Direct comparison of a 1 V Josephson arbitrary waveform synthesizer and an AC quantum voltmeter[J]. Metrologia, 2015, 52(4): 528-537.

[59] 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.

[60] 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.

[61] 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.

[62] 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.

[63] 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[M]. HE J H, LI Y H, YANG Q X, et al. The Proceedings of the 16th Annual Conference of China Electrotechnical Society. Singapore: Springer, 2022: 1106-1118.

[64] 高　原，李红晖，沈雪槎. 采用约瑟夫森电压基准参加“直流电压比率”的国际比对[J]. 现代计量测试，2000(6)：29-32.
GAO Yuan, LI Honghui, SHEN Xuecha. Using Josephson voltage reference to participate in international comparison of "DC voltage ratio"[J]. Modern Measurement and Test, 2000(6): 29-32

[65] 严　明，刘　民. 利用约瑟夫森电压标准装置测量直流电阻分压箱[J]. 宇航计测技术，2010，30(4)：49-53.
YAN Ming, LIU Min. Measurement of dc resistance voltage divider with Josephson voltage standard[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2010, 30(4): 49-53.

[66] 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.

[67] KOHLMANN J, GUTTMANN P, NIEMEYER J. Ratio standard for DC resistance using a Josephson potentiometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1993, 42(2): 255-257.

[68] LEE J, SCHURR J, NISSILA J, et al. Programmable Josephson arrays for impedance measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(7): 2596-2601.

[69] HERICK J, BAUER S, BEHR R, et al, Calibration of an inductive voltage divider using pulse-driven Josephson arrays[C]// Proceedings of 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Paris, France: IEEE, 2018: 1-2.

[70] WALTRIP B C, GONG B, NELSON T L, et al. AC power standard using a programmable Josephson voltage standard[C]// Proceedings of 2008 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest. Broomfield, USA: IEEE, 2008: 480-481.

[71] RAMM G, MOSER H, BRAUN A. A new scheme for generating and measuring active, reactive and apparent power at power frequencies with uncertainties of 5 ppm[C]// Proceedings of 1998 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest. Washington, USA: IEEE, 1998: 283-284.

[72] DJOKIC B. Development of a low-frequency quantum-based AC power standard at NRC Canada[C]// Proceedings of 2008 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest. Broomfield, USA: IEEE, 2008: 194-195.

[73] 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.

[74] PALAFOX L, RAMM G, BEHR R, et al. Primary AC power standard based on programmable Josephson junction arrays[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(2): 534-537.

[75] WANG L, JIA Z S, LIU Z Y, et al. Precision ac power measurement based on differential sampling system using ACPJVS[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1065(5): 052023.

[76] 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.

[77] 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.

[78] 沙玉林. 铁路通信时钟同步网的规划研究[J]. 铁路通信信号工程技术，2012，9(3)：34-37，63.
SHA Yulin. Research on railway communication clock synchronization network plan[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2012, 9(3): 34-37, 63.

[79] 卢敬叁. 激光冷却铯原子喷泉钟科研成果获国家科技进步一等奖[J]. 工业计量，2007，17(2)：7，37.
LU Jingsan. The scientific research achievements of laser cooling cesium atomic fountain clock won the first prize of national scientific and technological progress[J]. Industrial Measurement, 2007, 17(2): 7, 37

[80] 金　翠，李　琦，特古斯，等. 光纤授时技术在电力时频同步系统的应用规划研究[J]. 现代传输，2020(6)：74-79.
JIN Cui, LI Qi, TE Gusi, et al. Research on application planning of optical fiber timing technology in power time-frequency synchronization system[J]. Modern transmission, 2020(6): 74-79.

[81] 罗雪芳，吴　蓓. 新疆远程时间频率传递标准的建立与现状分析[J]. 计量科学与技术，2021，65(7)：17-20.
LUO Xuefang, WU Bei. The establishment and current situation analysis of remote time and frequency transmission standards in Xinjiang[J]. Metrology Science and Technology, 2021, 65(7): 17-20.

[82] 程　楠，陈　炜，刘　琴，等. 光纤时间频率同时传递系统中时间同步方法的研究[J]. 中国激光，2015，42(7)：0705002.
CHENG Nan, CHEN Wei, LIU Qin, et al. Time synchronization technique for joint time and frequency transfer via optical fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0705002.

[83] 杨　俊，单庆晓. 卫星授时原理与应用[M]. 北京：国防工业出版社，2013：21-45.
YANG Jun, SHAN Qingxiao. Satellite timing principle and application[M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2013: 21-45.

[84] 赵当丽，翟慧生，胡永辉，等. 利用卫星共视比对系统实现电网的时间同步[J]. 现代电力，2010，27(2)：70-73.
ZHAO Dangli, ZHAI Huisheng, HU Yonghui, et al. Implementing time synchronization of power grid using satellite common view system[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(2): 70-73.

[85] 梁　坤，方　维，顾杨义，等. 远程时间传递与溯源方法、装置及体系[J]. 计量科学与技术，2021，65(4)：3-13.
LIANG Kun, FANG Wei, GU Yangyi, et al. Remote time transfer and traceability method, device and system[J]. Metrology Science and Technology, 2021, 65(4): 3-13.

[86] 朱江淼，宋文峰. 基于氢原子钟组的复合控制算法的研究[J]. 国外电子测量技术，2015，34(9)：57-61.
ZHU Jiangmiao, SONG Wenfeng. Research of compound control algorithm based on hydrogen atomic clock group[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(9): 57-61.



周　峰
1980—，男，博士，教授级高工，硕导
主要从事电力计量、量子传感方面的研究工作
E-mail: zhoufeng@epri.sgcc.com.cn

ZHOU Feng
Ph.D., Professor



李小飞(通信作者)
1988—，男，博士，高工
主要从事高电压大电流计量、电力量子计量与溯源的研究工作
E-mail: lixiaofeihust@foxmail.com

LI Xiaofei
Ph.D.
Senior engineer
Corresponding author

收稿日期　2023-01-10　修回日期　2023-02-09　　编辑　卫李静