第 52 卷 第 2 期：493-508 高电压技术 Vol.52, No.2: 493-508
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250637

面向新型电力系统的高电压计量技术研究进展及展望

邵海明[1]，王家福[1]，李传生[1]，潘　洋[2]，王　锟[1]
（1. 中国计量科学研究院，北京 100029；2. 上海市计量测试技术研究院有限公司，上海 201203）

摘　要：新型电力系统包含大量可再生新能源发电系统，对测量技术的实时性、准确性和可靠性提出了更高要求。高电压计量技术作为保障电力系统安全稳定运行的关键支撑，面临着新的发展机遇和挑战。该文综述了高电压计量技术的研究现状，从新型量值溯源传递技术、复杂电磁环境下的在线计量以及特高压测试等领域深入分析了当前主流路线，涵盖精准时间同步、高压远程计量、模拟量与数字量集成校准、超快瞬态过电压测量、低功率因数损耗计量以及特高压测量系统的电压线性度测量等关键问题。然后，分析了现有技术的优缺点和适用范围，指出了未来高电压计量技术的发展趋势，包括更高效的在线校准方法、光学仪器在高压领域的拓展应用、基于新型传感器的智能化测量等。最后，提出了面向新型电力系统的高电压计量技术的发展建议，旨在为相关领域的研究和应用提供参考。

关键词：高压计量；量值溯源；数字化；新型电力系统；远程校准

Review and Prospect on the Research Status of High-voltage Metrology Technology for Review and Prospect on the Research Status of High-voltage Metrology Technology for New-type Power Systems

SHAO Haiming[1], WANG Jiafu[1], LI Chuansheng[1], PAN Yang[2], WANG Kun[1]
(1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;
2. Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China)

Abstract: The new power system incorporates a large number of renewable energy generation systems, thus higher requirements on the real-time performance, accuracy, and reliability of measurement technologies are put forward. High-voltage metrology, as a critical underpinning for ensuring the safe and stable operation of power systems, is confronted with new development opportunities and challenges. This paper reviews the current state of research in high-voltage metrology and provides an in-depth analysis of the mainstream technical approaches in areas including novel techniques for quantity traceability and dissemination, online metrology in complex electromagnetic environments, and ultra-high-voltage (UHV) testing. Furthermore, specific key techniques are summarized, including precise time synchronization, high-voltage remote calibration, integrated calibration platform of analog and digital quantities, ultra-fast transient overvoltage measurement, low power factor loss measurement, and voltage linearity assessment of ultra-high-voltage measurement systems. The advantages and disadvantages of existing technologies and their application scopes are analyzed, and future development trends in high-voltage metrology technologies are elucidated, including more efficient online calibration methods, expanded applications of optical instruments in the high-voltage domain, intelligent measurement based on new sensors, etc. Finally, recommendations are made for further developments of high-voltage metrology technologies oriented toward the new power system, aiming to provide a reference for the research and applications in the related fields.

Key words: high voltage metrology; measurement traceability; digitization; new power system; remote calibration

0　引言

实现碳达峰、碳中和是国家的战略目标，而建设以新能源为主体的新型电力系统是实现“双碳”目标的重要途径。新型电力系统对测量技术的实时性、准确性和可靠性提出了更高要求。作为构建新型电力系统的重要举措，推动数智化坚强电网的建设将会有效提升电网结构的鲁棒性。数字化电力装备集成了先进的传感技术和数字技术，贯穿电力设备的设计、制造、运行和维护等各个环节，实现对电力设备状态的实时监测、故障预判和智能控制。数字化电力装备是数智化电网的基石，而传感器则是赋予数字化电力装备精确感知与智能决策能力的

基金资助项目：国家重点研发计划(2023YFF0614802)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFF0614802).

核心要素。通过对不同电力装备部署先进传感器，可实现对电网状态的实时监测，满足电能质量分析、潜在故障预测、电源智能管理等多方面的应用需求，确保电网运行的可靠性和稳定性。此外，数字化电力装备通过集成的信息获取系统，成为实时数据处理和分析的中心，支撑智能调度、负载管理、能源优化以及应急响应等关键应用，进一步增强电网的适应性和响应能力。

新型电力系统以清洁低碳为发展方向，以安全高效为根本保障。特高压输电技术作为实现能源跨区域优化配置、构建坚强智能电网的关键手段，其发展与新型电力系统建设紧密相连。因此，高准确度的特高压计量标准对于保障新型电力系统安全稳定运行、电能质量，提高电网效率，促进资源优化配置至关重要。

《计量发展规划(2021—2035 年)》对未来我国计量事业的发展进行了总体谋划和部署，为加快构建国家现代先进测量体系指明了方向。随着数字革命与能源革命不断融合发展，未来电力计量采集数字化建设持续推进，以数字化驱动的计量转型升级则是推动电力系统源网荷储各环节协调互动的重要基础。这对电力计量设备在计量对象、感知能力方面提出了极高的要求。

目前，时间同步技术提高了监测设备的传感准确度，中国的北斗定位芯片有望解决电网中对统一时间基准的迫切需求，无线通信凭借其高灵活性、多节点接入、低成本和强大的互操作性，非常适合用于例如分布式雷电瞬态监测设备中的信号传输应用。这使得实现可观测、可分析、可预测和可控的电力系统成为可能，各种新型传感，测量技术和测量方法对目前高压大电流计量提出了新的挑战[1]。

本文针对新型电力系统对高压计量提出的挑战，分别从新型量值传递溯源技术(解决溯源问题)、复杂电磁环境下的在线计量(解决实时性问题)以及特高压测试(解决电压等级问题)3 个方面进行综述，分析了现有技术的优缺点和适用范围，指出了未来高电压计量技术的发展趋势，提出了面向新型电力系统的高电压计量技术的发展建议，旨在为相关领域的研究和应用提供参考。

1 新型量值传递溯源技术

针对新型电力系统对量值溯源的更高要求，本章将分别从精准时间同步计量、电力系统宽频相量测量技术和高压远程计量技术 3 个方面，阐述新型量值传递溯源技术的发展现状、面临的挑战和解决方案。

1.1 精准时间同步计量技术

新型电力系统对量值溯源提出了更高的准确度和可靠性要求，尤其是在时间同步方面。精准的时间同步是实现电力系统广域监测、保护和控制的基础，对于保障新型电力系统安全稳定运行至关重要。本节将探讨精准时间同步计量技术在新型电力系统中的应用与挑战，重点关注微秒级时间同步对计量技术带来的影响，以及现有解决方案的技术路径。

电力需求的持续增加、从单一集中式远程发电向包含分布式发电的转变，可再生能源的并网带来电能双向流动，逆变器的开关噪声带来电网谐波以及电能质量的下降，电网负荷的平衡与保护都为新型电力系统带来新的测量挑战。实现电力生产和管理的智能自动化需要正确的时间同步和实时性。

数字化变电站中的合并单元采样电流和电压，需要亚微秒级别的同步能力。现有的电网感知应用，如电压和频率调节以及行波故障检测，需要微秒级别的时钟同步。新的广域监测、保护和控制技术创造了一门新的测量学科：时间同步测量的科学-同步计量学(synchro-metrology)。通过研究和开发电力系统所需的在线和预测精准时间同步的计量技术，支持电力行业的电网监控和控制应用[2-6]。

采用 IRIG-BDC 码的光纤对时，面临光纤传输延时以及晶体漂移和时钟相位噪音对对时准确度的影响，采用基于 IEEE 1588-2019 协议的网络时钟同步，虽然光纤延时可通过 E2E 或 P2P 算法补偿，但也存在交换机队列抖动，网络不对称时延、硬件时间戳误差等技术挑战。

面对需要严格进行的时钟同步设备(比如合并单元)，仪器校准不但需要考虑实验室短距离的时钟准确度测试，还应考虑模拟现场工况的时钟对时准确度，比如合并单元采用 IEEE 1588-2019 协议可根据现场实际工况采用一级或多级交换机设备路由进行测试，并模拟现场的光纤长度。

为了获得高对时准确度，可通过两级锁相环协同建立 ppb(parts per billion)级低抖动的时钟源，利用时间戳引擎和时钟补偿算法实现 10 ns 级别的局部网络对时准确度。

目前，美国国家标准与技术研究院(NIST)同步测量实验室研究同步测量和仪器校准技术，与其他

实验室、工业界、学术界以及政府机构合作，开发测量技术，并与国际标准制定组织合作，制定和修订标准、指南和报告。如图 1 所示，同步测量实验室还通过对同步相量单元(phase measurement unit，PMU)校准器校准服务，为国际同步相量测量性能合规性评估计划的实验室提供溯源服务，通过可信的精准时间同步基础设施支持同步测量功能，同时，开发和验证参考时钟、网络交换机和终端设备的符合性测试方法[7-9]。

1.2 电力系统宽频相量测量技术

随着高比例新能源和电力电子设备的接入，新型电力系统中涌现出大量间谐波信号，并引发一系列宽频域振荡事件，严重影响了电网的运行安全，宽频域的量值溯源变得日益重要。传统的电力系统测量技术主要集中于工频信号，难以满足新型电力系统对宽频域信号的精确测量需求。本节将介绍电力系统宽频相量测量技术的发展现状，重点分析其在新型电力系统中的应用前景和挑战。

宽频相量测量装置将电力行业现有以工频为主的测量推广到涵盖基波、间谐波和谐波的宽频测量，这一新特点使其成为应对未来电网发展的新型测量设备，可以有效满足未来高比例电力电子设备接入电网后宽频信号的测量需求，为新型电力系统的发展建设提供支撑。

与此同时，北美也开始研究高分辨率、时间同步的电网监测设备， 并重点开发了连续点波形(continuous point-on-wave，CPOW)测量设备，指出其在波形采样、快速暂态、谐波分析及时间同步方面相对于 PMU 的优势(更高的采样率，更少的滤波)，并强调其能捕捉更全面的电网事件信息[10]。宽频测量数据涉及基波、间谐波和谐波，采样率覆盖用于保护的 4 kHz 和用于电能质量和计量的 12.8 kHz，且存在同步对时功能，未来随着新型电力系统各类研究的深入，宽频测量装置除在大电网领域外，在配电网、谐波源定位及电能质量监测等领域也具有广阔的应用前景[11-13]，这些不仅要求对宽频相量测量单元，同时要求对一次宽频互感器、谐波互感器的测量准确度和计量溯源提出了新的挑战。

1.3 高压远程计量技术

为确保测量结果的准确性和可靠性，测量值必须通过校准溯源至国家最高计量基标准。然而，传统的高压计量设备体积庞大、运输不便，给量值溯源带来了挑战。高压远程计量技术通过在现场仪器和实验室之间传输数据，无需实际运输设备，为解决这一问题提供了新的途径。本节将探讨高压远程计量技术的发展现状，重点分析其在新型电力系统中的应用价值和局限性。

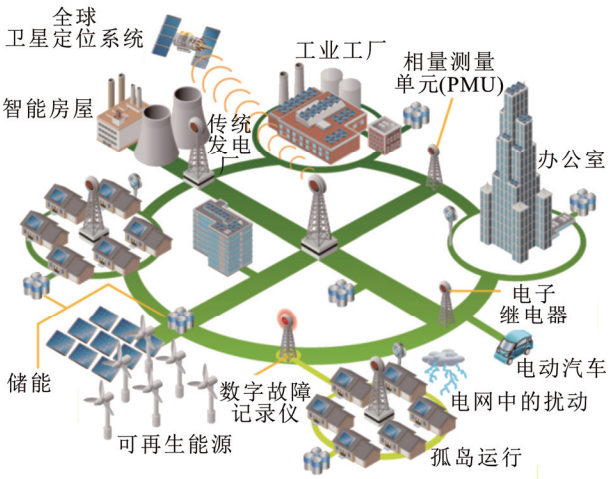


图 1 实时控制的智能电网示意图

Fig.1 Schematic of real-time-control smart grid

测量值的校准通常在参考实验室内完成，被校准的仪器在往返运输过程中可能会带来附加误差。为保证在现场的工作环境，一种方法是在线计量，通过运输标准器而不是被测仪器完成校准，即在电力设备运行的现场，不中断设备运行的情况下进行的计量活动。同样，在标准器的运输过程中，标准器的计量特性发生变化的可能性仍然存在。另一种方法是远程校准，即计量人员在实验室或其他地点，通过远程控制和数据传输等方式，对现场的计量设备进行校准。在现场仪器和实验室之间传输数据，无需任何设备的实际运输。这种方法可以消除基于位置的误差，并且解决校准周期过长及环境变化所引入的误差问题，但目前通常仅适用于非物理标准，如时间频率。

由于高压大电流计量设备通常具有体积庞大、笨重、充油充气等特点，这使得将它们送至传统的计量实验室进行量值溯源变得极为不便，不仅增加了运输成本和时间，还可能面临设备在运输过程中损坏的风险。这种局限性严重影响了校准的效率和时效性。中国计量科学研究院研发了基于云服务的高压直流分压器和电压互感器远程校准系统[14-15]，实现了实验室人员在远程控制和监控下，采集现场的标准器和被检的数据，从而解决了传统高压直流分压器和电压互感器校准中运输损伤、检定效率低

等问题，实现了远程采集/监视现场数据。

图 2 是高压远程计量系统的结构示意图。根据高压直流分压器和电压互感器远程校准的实际需求，系统设计为现场端、云服务器端和控制端(实验室端)分层的远程校准系统架构。

控制端(实验室端)使用联网的 PC 设备登录自主开发的远程校准系统 Web 来进行相关实验操作，实验室端远程校准系统人机交互网页实现各种校准操作功能，满足校准工作需要。实验室端远程校准系统网页基于 Http 协议从云服务端数据库获取校准数据，并通过和现场端访问相同的云服务端接口实现与现场端的交互通讯。

文献[14-15]的核心创新点在于利用云平台实现远程控制和数据采集，减少人员出差的需求，提高校准效率。计量校准人员无需亲临现场，只需在实验室远程操作和监控校准过程，即可完成数据采集、处理和分析。 然而，文献[14-15]解决的是“异地测量与监控”的问题，而不是“完全的远程计量”，它仍然依赖于标准计量器具的现场部署。

同步相量测量单元的普及为远程校准提供了新思路。利用 PMU 的同步数据(电压、电流相量)和传输线参数，可在线估计互感器的比差和角差，其核心是基于传输线的 π 型等效电路，建立发送端与接收端的电压-电流关系方程，结合同步相量数据构建超定方程组。文献[16-17]通过严格的仿真与实验设计，验证了远程校准方法在理论设定值和实际测量误差下的有效性，为电力系统状态估计提供了可行的创新方案。当然，该研究仍需更全面的现场测试、不同互感器类型、传输线参数的温度依赖性等影响因素。

1.4 模拟量与数字量集成校准系统

未来的电力网络需要具备实时控制和监测系统，以确保在日益复杂和具有挑战性的条件下保持稳定。相关联的高压数字传感器和数字计量系统必须通过在广阔空间范围内准确和可靠的时间同步进行管理。

新的 IEC61869-1-15 系列标准，将互感器分为电磁式和低功率互感器(low power instrument transformer，LPIT)，其中 LPIT 包括无源式低功率互感器和电子式互感器，同时，该标准将独立合并单元(standard alone measurement unit，SAMU)也视为低功率互感器。传统主网曾广泛采用的电子式互感器运行状态监测表明，电子式电流互感器故障率是电

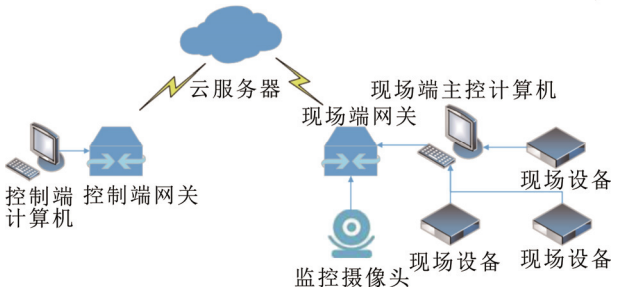


图 2 高压远程计量系统结构

Fig.2 Remote calibration system for high-voltage equipment



图 3 电子式互感器计量分类

Fig.3 Metrology classification of electronic transformer

磁式电流互感器故障率很多倍，考虑到实际运行可靠性，主网的运行模式沿用了传统互感器加独立合并单元的组合。以数字量输出的电流互感器(electronic current transformer，ECT)统计结果发现故障率最高的是远端模块和光接口板。而在配网的一二次融合方案中，采用就地数字化单元将柱上开关与馈线终端单元之间(8~15 m)的距离用屏蔽双绞线传输，大大降低了故障率。

无论是主网还是配网，采用低功率互感器涉及到小信号的模拟量输出以及符合不同协议规范的数字量输出，这同样包括对应的互感器校验仪和整检装置。现有的 100 V/5 A 传统电磁式互感器的量传体系不再适用，开发集成式校准溯源系统有其现实意义，图 3 给出了电子式互感器计量分类，包括非传统的仪用互感器、数字量输出电子式互感器、电子式互感器校验仪及其整检装置。

EURAMAT(欧洲计量组织)于 2018 年 6 月开展了为期 40 个月的新一代数字化变电站计量(metrology for the next-generation digital substation instrumentation)项目，该项目旨在推进欧洲电力行业向更智能、更可靠的电网转型。通过提供更精确的测量、参考标准和校准方法，为提高电力系统的效率、安全性和互操作性做出贡献。该项目的主要成就包括由 PTB(德国联邦物理技术研究院)开发的用于校准数字电压或电流互感器以及通过精密时间

协议 PTP (precision time protocol，IEEE 1588:PTPv2)、IRIG-B 或基于 GPS 将相关时间同步到 PPS(pulse per second)的测量[18-19]。

如图 4，PTB 研发的电流互感器集成测量系统不仅适用于传统互感器、低功率互感器，同样当被测设备(DUT)的输出为采样值数据流(sampled values，SV) 时也适应。在实验室条件下，系统比值误差的不确定度为 2×10^{-5}(k=2)，相位误差的不确定度为 30 μrad(k=2)[18]。

校准任何形式的互感器测量系统，无论是电磁式还是小信号抑或是数字量的采样值，均可通过同步采样实现。通常对于模拟量的输出，标准量和被测量之间无需测量绝对相位，只需在触发时刻同步即可。但是对于采样值的数字量，需要精确测量模拟数字转换器的绝对时延。

参文[20]介绍了一种通用的多功能互感器采样系统(图 5)，通过控制 2 台 Keysight 3458A 数表的同步采样(模拟量)、通道交换技术、电流互感器的跟随技术以及精确确定单台数表的触发时延、积分时间、数表带宽带来的相移，实现了多功能的互感器校验能力，不仅可以校准传统的电磁式互感器，且同样通过采样的时序控制实现数字量的校准(图 5)。系统在计量时可通过升压器或升流器提供一次高压大电流，通过准同步算法在源表不同时钟的条件下进行采样计算，从而在现场工况或含有高次谐波的条件进行校准。

目前国际上主要计量机构开发的数字量校准装置，要求被校准的设备使用 1PPS 作为时钟同步，这样 SV 数据帧组包的相位可以与 1PPS 脉冲前沿进行比较。这些参考校准系统依赖于确定标准采集设备的延时并对其进行补偿，以生成与 1PPS 对齐的 SV 数据帧。 根据 IEC 61869-9(互感器的数字接口)的要求，1PPS 计时已被 PTP 计时协议所取代。由于 PTP 计时最终取决于所有中继计时数据包的网络组件，包括网络交换机和主从设备，计量机构需要开发新的参考系统应对新标准带来的变革。

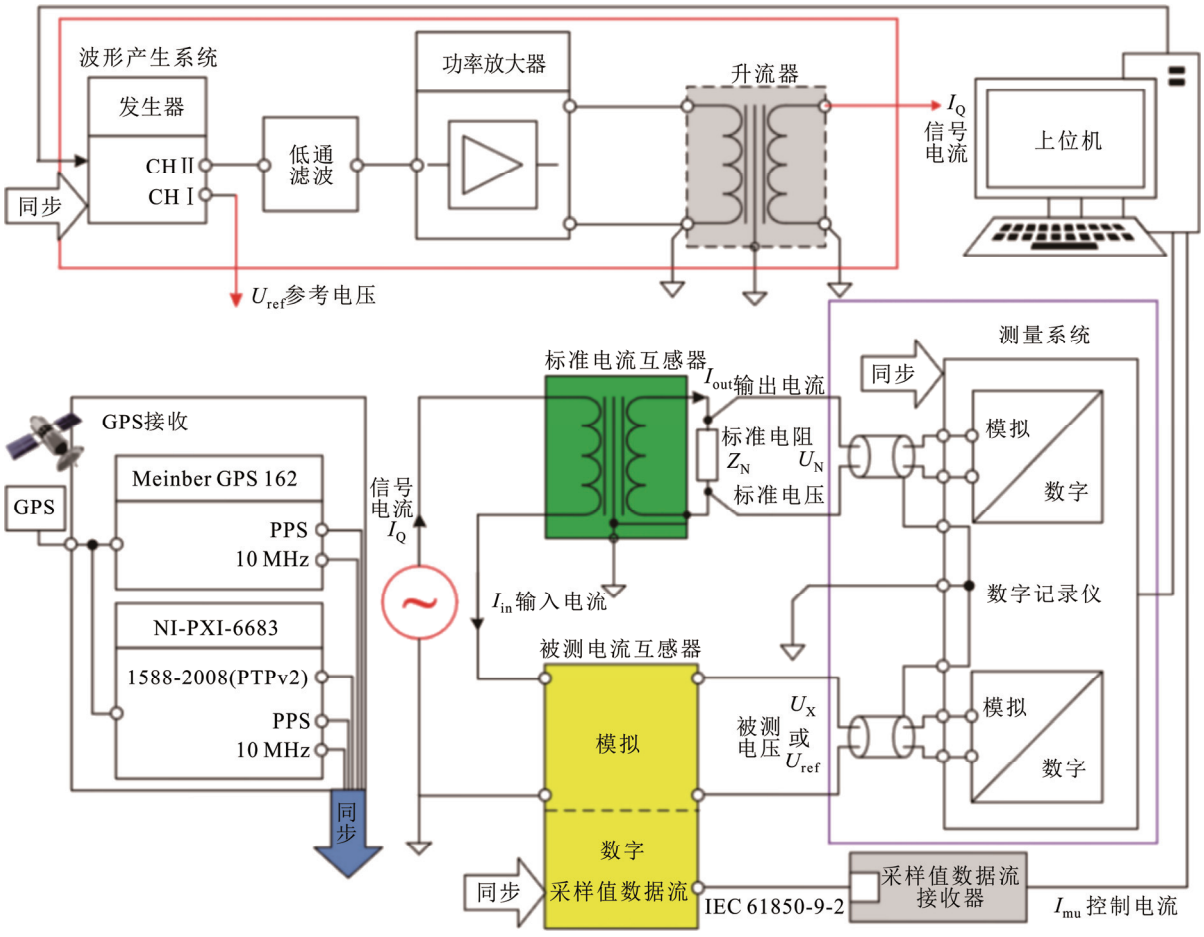


图 4　PTB 研发的电流互感器集成计量系统

Fig.4　Integrated instrument transformer calibration system developed by PTB

2 复杂电磁环境下的在线计量

新型电力系统的负荷呈现强波动性和随机性(如电动汽车充电、分布式能源接入)，电力电子设备(如逆变器、储能装置)的广泛应用，导致电网中高频谐波、暂态过电压等复杂电磁干扰问题加剧，为准确分析电能质量、监测电网暂态过程，要求计量设备具备宽频域(从低频到高频)和高动态范围的测量能力。为及时掌握电网的运行状态，快速响应电网故障，需精确计量冲击高压大电流的瞬态特性，实现对数据的快速采集、处理和分析。本章将重点讨论复杂电磁环境下在线计量所面临的挑战，并介绍超快瞬态过电压(very fast transient overvoltage，VFTO)计量和高压组合波或复合波的计量等关键技术。

2.1 超快瞬态过电压 VFTO

超快瞬态过电压(VFTO)是新型电力系统中一种重要的电磁干扰现象，其具有极高的频率和极短的持续时间，对电力设备的绝缘安全构成严重威胁。传统的测量设备难以准确捕捉 VFTO 的特征，因此需要开发新型 VFTO 测量技术。本节将重点介绍 VFTO 的产生机理、测量挑战以及新型 VFTO 测量技术的研究进展。

对于大多数绝缘材料而言，其绝缘耐压水平和老化程度在很大程度上取决于外加电压的波形特征。然而，几乎所有高压电力设备的绝缘性能试验均采用各自产品国际标准中规定的特定电压波形(如标准雷电冲击电压、标准开关冲击电压等)进行，而现场实际发生的瞬态电压波形可能与高压试验中采用的标准冲击电压差异很大，因此可能会对电力设备绝缘造成不可预测的损坏风险[21]。

现场出现的这种瞬态电压具有新的和无法解释的特性，因此有必要审查现有高压试验标准和绝缘配合标准的适用性，特别是对于运行更高电压等级以及配备了大量新型电力设备的电网。此外，电网故障引起的瞬态电压包含大量有关故障产生的信息，可用于分析故障原因和故障定位。因此，对实际的超快速瞬态电压进行现场测量非常有价值，有利于开发可接受的高压介电强度测试方法和经济的绝缘设计方案，以及分析电网故障原因。

快速和超快速瞬态过电压通常具有非常短的前沿时间(上升时间)，可能小于几纳秒，导致带宽从 50 Hz 到 100 MHz 不等。同时，某些瞬态电压(如雷电瞬态或故障瞬态)的出现是不可预测的，变电站中常见的传统电压测量设备(如电容式电压互感器、电磁式电压互感器等)由于带宽窄、采样率低，通常无法测量快速和超快速瞬态电压。

新型电力系统的应用不断产生新的暂态现象，因此现场测量暂态电压需求可能会长期存在。如何测试测量系统的性能，如何校准测量系统是计量系统面临的急需解决的问题，这些内容包括设计具有快速冲击响应特性和具有宽带测量能力的电压传感测量系统，计量时的连接、布局与对采样数字记录仪的评估，这意味着传统的对冲击记录仪及测量软件 IEC 61083-1、IEC 61083-2 的适用标准已不再适用，需制定 VFTO 特定波形下的指标评定系统[22]。

西班牙、瑞典和芬兰国家计量机构联合研制了一种新型高压 SF_6 标准测量系统如图 6 所示，可用于对 VFTO 测量装置进行校准[23]。该装置由高压直流电源、同轴传输线、SF_6 气体火花隙和主管道组成，利用 SF_6 气体火花隙产生快速阶跃电压，并通过可控阻抗的同轴传输线进行传输；主管道内安装

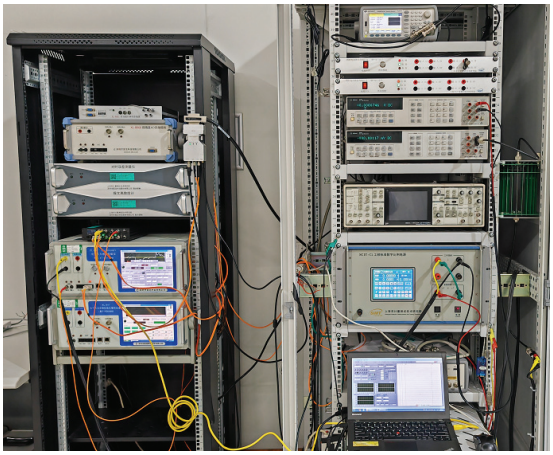


图 5 多功能电子式互感器校准系统

Fig.5 Multifunctional calibration system for electronic transformers



图 6 新型超快瞬态过电压标准测量系统

Fig.6 New VFTO standard measurement system

D-dot 探针接口，同时设计了电阻分压器作为参考分压器，用于评估被测探针的性能，从而为极快速瞬变测量提供计量溯源依据。其所用的瞬态记录仪采用美国国家仪器(National Instruments)的PXIe-5164板卡，具有400 MHz带宽、1.4 ns上升时间和4.5 ns稳定时间。与理想波形的卷积显示，5 ns上升时间的波前时间测量误差为2.4%，峰值误差为0.2%。

2.2 高压组合波或复合波的计量

在实际电力系统中，雷电冲击或操作冲击形成的浪涌波形会叠加在高压输电线路所传输的交流或直流高压信号上，形成高压组合波或复合波，对电力设备造成瞬时过电压，威胁设备安全。现有的高压测量系统多为针对单一波形或参数设计，无法满足对这些设备进行全面、精确测试和评估的需求。本节将对高压组合波或复合波的产生机理、测量挑战以及新型测量技术的研究进展进行讨论。

虽然目前国际标准规定了确定组件对电压冲击的耐受测试要求，但缺乏对叠加波形造成的电网影响的可追溯性，同时也缺乏关于设置或校准叠加在交流和直流电压上的冲击电压规范和标准。

现有的高压测量系统多针对单一波形或参数设计，存在测试效率较低、测量数据不一致、难以进行综合分析的问题。全波形多参数高压参考测量系统，可实现一次测试完成多种波形和参数的测量，包括波形叠加的测试问题，提高测试效率、统一测量标准、实现综合参数分析，从而为相关领域提供高效、精准、可靠的测试手段，不仅将促进相关产业的技术进步，也有助于提升电力系统安全性和稳定性。目前欧洲各国家计量院已联合开展了此方面的计量研究。这不仅需对分压器传感能力进行深入分析，对测量仪器的采集能力也需重新进行评估，同时包括需要重新建立对于相应叠加波形的软件测评能力，用于评估高压复合和组合波形的软件的开发和测试[24-25]。

由于传统高压实验室需要不同的测量仪器来测量不同的电压类型：如通过峰值电压表测量交流电压50/60 Hz(AC)，通过示波器或数字记录仪测量雷电冲击参数，以及通过局部放电测量仪测量视在电荷量。所有这些测量仪器都具有适用于硬件和软件标准的不同技术要求(IEC 61083-1/2、IEC 60060系列标准以及IEC 60270)。随着测量仪器的技术进步，目前这些测量可以通过高性能数字记录器实现。

图7是欧洲为高压测量开发的一种新型通用测量仪器，称为通用测量单元(universal measurement unit，UMU)[26]，用于在高压实验室中进行的几种典型测量：AC 50/60 Hz、DC、雷电冲击1.2/50 μs (LI)、操作冲击250/2 500 μs (SI)、局部放电、无线电干扰(RIV)测量，以及在电流互感器、电压互感器二次绕组中的传递过电压测量等功能。对该UMU频响特性的评测结果表明，在200 kHz下，幅值误差绝对值小于0.5%，有效分辨率达到12 bit，在10 MHz的频率下幅值误差绝对值小于1%。

2.3 局部放电电荷量

局部放电是由于电气导体(如电缆中的空隙或断裂)中的缺陷导致电火花或电弧造成，局部放电会导致一系列重复的、瞬态的、高频的电流脉冲，从而加速绝缘系统老化，造成恶性设备故障，同时降低故障发生前电能质量[27]。

按IEC 60270标准，传统电网中的高压电气设备侧重于在交流高压下进行耐压和局放测试性能。而直流高压下局部放电脉冲的速率和幅度较小，因此在相同的背景噪声下更难以检测到局放信号，测量时需应用噪声抑制技术，目前尚无标准程序来确定测量仪器在执行此操作时引起的误差，无法保证特高压直流设备的局放性能。此外，用于局部放电(partial discharge，PD)测量的局放校准器也需在极低的注入电荷量下进行校准，商用校准器的最低电荷水平达到0.1 pC。电荷敏感前置放大器校准低电平电荷量见图8。

欧洲的国家计量院包括TUBITAK UME、VTT、FFII和RISE根据IEC 60270中详细说明的方法，

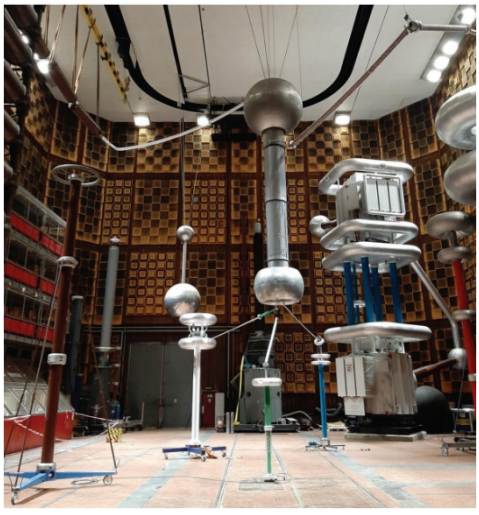


图7 高压通用测量单元

Fig.7 High voltage universal measurement unit(UMU)

独立设计和构建了用于低电平 PD 校准器的校准系统。为克服较低 PD 脉冲发生的信噪比问题，使用了“电荷敏感前置放大器(charge-sensitive preamplifier，CSP)”，其外观及原理结构如图 8 所示。各国家计量院使用商用参考校准器作为传递标准相互比对进行相互验证[28]。

CSP 的使用显著提高了 PD 检测的信噪比，从而使低电平测量成为可能。计量标准装置从 20 pC 到 0.1 pC 的扩展不确定度小于 1%，在 0.01 pC 时不确定度小于 3%(k=2)。校准范围比目前国际计量局各国家计量院提供的校准测量能力扩展了至少 1 个数量级以上[29]。

标准电荷量从计量学角度可溯源到电流和时间，通过对电荷量测量系统注入规定时间的直流电流即可精确标定电荷量参数。参文[28-29]通过小电流源表对示波器不同时间轴进行标定，直接根据电荷量的定义确定整体测量系统的刻度因数。与冲击测量时确定数字记录仪的方波响应类似，直流状态下的测量结果仍然需要在瞬态下进行评估，这取决于数字记录仪在测量电荷量时标称瞬间的冲击刻度因数。考虑到局放标定时更大的不确定度，数字记录仪的冲击刻度因数对积分法测量的结果影响更小。

2.4 低功率因数损耗计量

高压电器设备如电力变压器和电抗器，由于低功率因数运行的特性，对其损耗进行精确测量对于评估运行状态、确保能效达标以及优化电力系统至关重要。然而，低功率因数的测量极具挑战，需要实现微弱信号提取、相位准确度维持、环境干扰抑制等，完善的校准和溯源体系是保证测量结果的关键[30]。

在国际上，高压低功率因数损耗溯源仅在有限几个主要国家的计量院开展。加拿大国家研究委员会(NRC)将电流比较仪技术应用于低功率因数高压损耗测量系统。如图 9 所示，通过基于电流比较仪模拟单元，用双级补偿式电流互感器将输入电流反相 180°注入电流比较仪 Nx 绕组，同时可模拟变压器损耗测量中幅值及相位可调的感性电流，最高达到 1 000 A，最早实现了变压器、电抗器的高准确度现场校准服务，在 0~0.1 范围内可以 0.000 01 分辨率设置功率因数，并达到优于 20 μW/VA 的测量不确定度(即功率因数为 0.01 时，功率测量不确定度为 0.2%，k=2)。值得一提的是：用电流比较仪电桥在等电压下测量电容比例时与电源的频率无关，但在测量电感时却与频率平方成正比[31]。

图 10 为德国联邦物理技术研究院(PTB)提出的一种适用于工频高压大电流的交流功率标准系统[32]。系统中的虚功率源采用双通道信号发生器，结合电压放大器及跨导放大器分别放大电压和电流，通过程序控制产生任意相位角的电压和电流。测量部分包括标准电压互感器、电流互感器和功率比较器。该系统在电压 220/$\sqrt{3}$ kV、电流 2 kA 时，

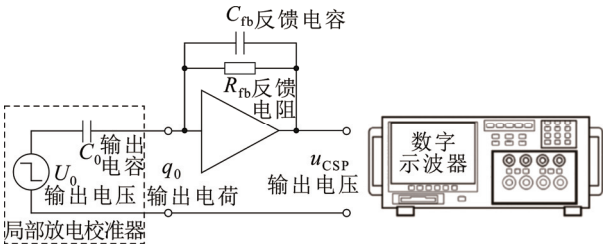


图 8 电荷敏感前置放大器校准低电平电荷量

Fig.8 Calibrating low-level charge with charge-sensitive preamplifiers

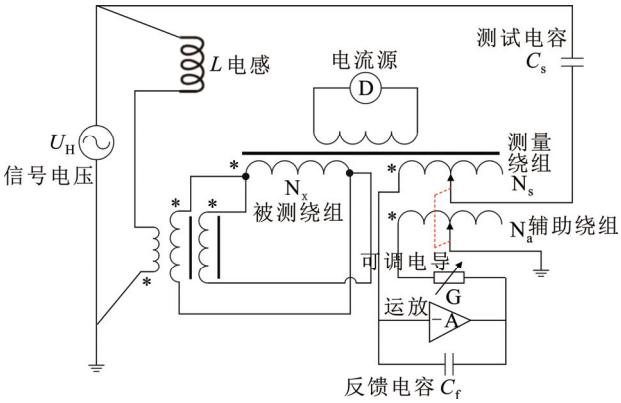


图 9 电流比较仪电桥损耗测量线路

Fig.9 Circuit for loss measurement using current comparator bridge

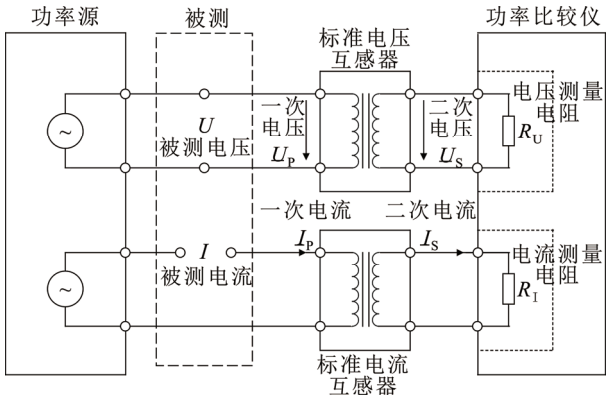


图 10 PTB 损耗计量方案

Fig.10 PTB loss measurement solution

任意功率因数下可达到 40 μW/VA，k=2 的测量不确定度(即功率因数为 0.01 时，功率测量不确定度为 0.4%，k=2)。

如图 11 所示，荷兰国家计量院(VSL)为校准变压器损耗测量系统研制了 1 套标准装置，图中，DSP 为数字信号处理器；G 为跨导放大器。其核心是通过电流比较仪技术与数字采样及信号处理技术，实现了根据输入电压(最高 100 kV)产生一个稳定的、相位接近 90°且可调的大电流[33]。试验表明，此标准装置可在 100 kV/2 000 A 下达到 25 μW/VA，k=2 的测量不确定度(即功率因数为 0.01 时，功率测量不确定度为 0.25%，k=2)。

2017 年中国计量科学研究院牵头的 NQI 项目，联合电力、航天及省级计量机构完成了低功率因数下损耗测量的相关研究，从高准确度工频电压比例溯源、高压电流传感器仿真分析、高准确度相位测量等方面入手，在国内研制成功 1 套低功率因数损耗标准装置，在功率因数为 0.01 时，其功率测量不确定度达 0.3%，k=2[34]，成为亚洲计量合作组织 APMP 首先具有此项校准测量能力的国家计量院，实现了变压器损耗测量系统的整体校准。

2.5 电力互感器在线计量

高压电力互感器是电网保护、控制、计量的重要数据来源。由于运行环境恶劣，高压电力互感器，特别是电容式电力互感器长期运行后易发生性能劣化、计量失准等导致贸易纠纷或安全隐患。传统互感器检测方式依赖实物标准器现场停电开展，故障发现及时性差。《计量发展规划(2021—2035)》将高压电力互感器在线校准列为重点任务，美国、欧盟也制定了相应规划。

电网稳定运行条件下，其电参量满足物理约束，电参量间存在时序强关联。同时，互感器具有多台套冗余配置特点，电参量间存在空间强关联。以多台互感器构造群体，群体测量真值满足时空关联关系，而个体误差相互独立，因此从群体角度可实现误差分离与评估。

2015 年，A. G. Phadke 利用潮流方程的强关联性，率先提出面向电力互感器群体的误差在线监测技术，并应用于高压输电线路两端的电力互感器[35]。近年来，国内学者也开展了大量研究，华中科技大学提取高压电力互感器群体时空关联关系，通过构造多目标优化问题的数字标准器并求解，实现了运行误差估计，进而提取误差时频特征，实现了电容击穿、二次回路异常等典型故障的在线辨识，如图 12 所示。

文献[36]首次提出了在线估计互感器误差的大规模多目标优化问题框架，从变电站电气拓扑、互感器误差特性、电参量统计特性中提取真值关联关系，将误差估计的工程问题构建为多约束多目标的待解数学问题，根据求解所得误差，不停电发现误差异常的互感器。

文献[37]提出了一种基于问题重构的动态决策变量分析框架，实现高效求解。该方法将决策变量分析过程重构为二元决策变量的多目标优化问题，通过动态变量分组机制提升优化效率。通过融合动态变量交互建模与分层协同优化框架，将传统静态分组转化为动态多目标优化任务，结合收敛优化、多样性调控等分层策略实现高效求解。

文献[38]提出一种电容式电压互感器电容击穿故障在线诊断方法。该方法首先探明了电容击穿与电容式电压互感器测量误差间映射关系，随后构造了故障敏感的误差特征量，将电容击穿故障检测构造为优化问题，求解获得电容击穿数量及位置。

文献[39]提出一种电压互感器回路故障在线检测方法。该方法首先构建多相电压数据的相似度矩阵并计算初始异常分数，然后基于同相间最小初始

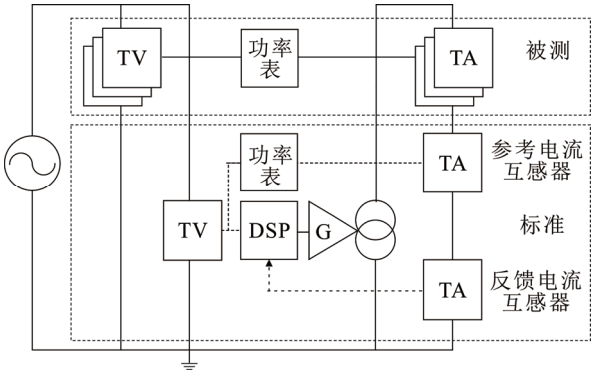


图 11 VSL 变压器损耗标准测量系统

Fig.11 VSL transformer loss standard measurement system

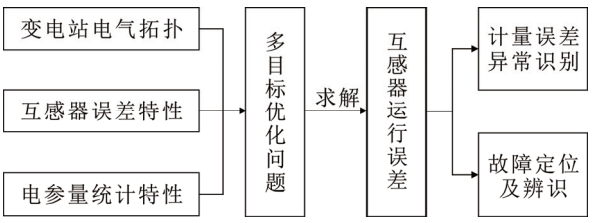


图 12 高压电力互感器不停电智能检测技术示意图

Fig.12 Schematic diagram of online intelligent inspection technology for high-voltage power instrument transformers

分数剔除一次固有波动影响，最后引入量化分布差异的累积相似度曲线，根据曲线拐点确定阈值，提升方法适应性。

3 特高压下的高压计量标准

特高压作为新型电力系统远距离、大容量输电的关键技术，其安全稳定运行对高压计量提出了更高的要求。准确可靠的特高压计量标准是保障电力交易公平、电网安全运行的重要前提。本章重点讨论特高压直流高压分压器、交流高压的自溯源问题以及雷电冲击高压国际比对等方面，分析特高压计量标准所面临的挑战和发展趋势。

3.1 特高压直流高压分压器

作为特高压直流系统中的核心测量设备，特高压直流分压器的测量准确度直接关系到电力交易的公平性、系统运行的安全性和电网调度的经济性。

影响直流高压分压器分压比的因素一般包括分压器的温度场、电阻的温度系数、电路节点的热电势、高压电晕电流和绝缘介质漏电流。消除电晕通常用配置均压环和屏蔽分压器的方法，把最大电场控制在 16 kV/cm 以下。过去认为主分压电阻应置于金属屏蔽套中，并用辅分压器进行等电位屏蔽，后来研究表明只要达到无晕就可以，结构上只需要把辅分压器电阻靠近放置在同电位的主分压电阻外侧。无晕的直流分压器可以多节叠加使用[40]。

20 世纪 90 年代初，澳大利亚国家计量院采用金属膜电阻，对电阻元件进行了表征、选择和匹配，以实现整个高压电阻链的极低温度和电压系数。每个电阻元件通过聚四氟乙烯(PTFE)安装在绝缘支架上，均匀排列在一个圆柱面上，按分压器内部的电压梯度呈螺旋分布。考虑到散热问题，高压臂本体直接与空气接触，该结构广泛应用于世界各地的其他国家计量实验室，用作直流高压参考标准。其单节 150 kV 的直流高压分压器，最大允许误差优于 $\pm5\times10^{-6}$。通过 7 节串联，最高电压达到±1 050 kV，准确度等级为 0.02 级，其外观如图 13 所示。为评估泄漏电流的影响，使用 2 个数字电压表和 2 个分流器分别测量高压端和接地端的电流，计算出泄漏电流对分压比的影响[41]。

测量泄漏电流时，高压端的数字电压表需浮地测量，通过电池和逆变器及无线传输方式实现对 2 台数表的同步触发和数据传输。参文[42]采用蓝牙技术做类似研究。为精确测量直流电阻分压器的线性，参文[43]采用串并联组合方式实现了通过 2 台相同变比的低压分压器在倍压时的电压系数，步骤繁多，测量复杂，操作极不方便。

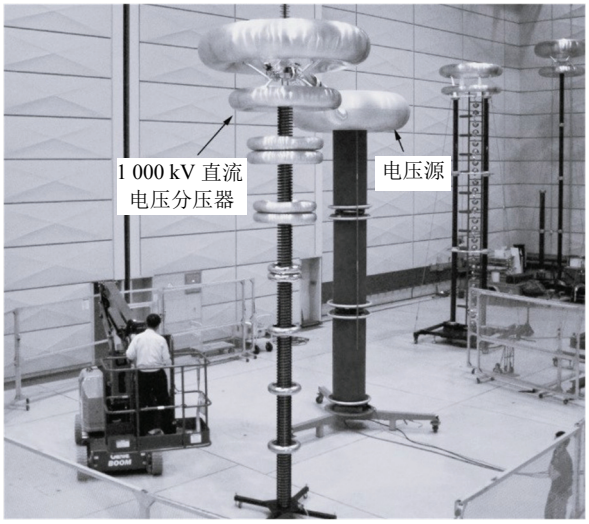


图 13 澳大利亚计量院±1 000 kV 直流分压器

Fig.13 The ±1 000 kV DC divider of National Measurement Institute of Australia

参文[44]基于电容式传感器原理，研制了一种自反馈低功耗直流电场传感器。通过反馈调整传感器的范围和灵敏度，优化直流电场传感单元结构参数的设计，得出当感应电流信号幅值最大时，感应电极扇形叶片开度和叶数，从而实现对高压直流电场的非接触测量[44]。分压器的线性度最终体现在其输出电压与输入电压之间的线性关系上。如果电场传感器放置在直流高压分压器周围，并测量不同电压等级下的电场强度，通过比较测得电场强度与分压器理论上分压比之间的关系，就可评估该分压器的线性度。而电压与周围的电场分布有关，因此测量电场强度可以间接反映电压的线性度。如果这种通过电容调制的方式能够解决现场校准时的准确度问题，将会有很好的应用前景。其技术实现路径如下所述。

首先在低压下用标准直流分压器对被测直流电压测量系统进行标定直至标准分压器的额定最大电压，其次在此电压等级下测量电场强度作为线性度测量的起始参考值，当标定电压高于标准直流分压器时，将标准分压器断开，升压直至被测系统的最高电压，建立电场强度与被测直流电压间的线性比例，并与起始参考值进行比较，确定被测直流电压测量系统的线性度。应该指出，这种评价方式应事先评估电场传感器的线性度，以确定其是否具备

直流电压线性度的测量能力。

3.2 交流高压的自溯源问题

国际上普遍采用标准电压互感器或压缩气体标准高压电容器建立本国在交流领域的最高测量能力。从低压可自校的单盘感应分压器，直至通过在高压下测量电压互感器或标容的电压系数来实现。早期电压串联加法线路采用全绝缘屏蔽型互感器，串联加法的附加误差，受以下两个因素的影响：首先提供屏蔽电位的励磁变压器的中心抽头电位不发生偏离；在加法和互校的过程中，屏蔽互感器的屏蔽电位没有发生变化。由于在实际测量时，这两个条件不能完全满足，且电压等级越高，影响越大，当时最高电压等级仅为 110 kV。后期国家高电压计量站将全绝缘屏蔽型互感器进行改进，采用半绝缘互感器电压串联加法线路，同时在串联上级电压互感器二次侧增加 1:1 隔离电压互感器。避免了屏蔽电位变化所引入的不确定度[45]，其结构如图 14 所示，图中，SSTV 为串联式标准电压互感器，由上段 T_1、下段 T_2 及高压隔离单元构成，标准的二次输出 U_2 和被测电压互感器 T_X 的二次电压 U_3 输入到互感器校验仪测差端子 ΔU 进行比较，U_r 为校验仪参考电压输入端子。

2009 年起，随着我国特高压的快速发展，交流输电线路电压等级达到 1 000 kV，亟需解决 1 000 kV 的电压比例标准装置的溯源问题。2013 年，中国计量科学研究院研制了 $110/\sqrt{3}$ kV 低压励磁双级电压互感器，准确度达到 0.001 级[46]。2017 年起，国家高电压计量站提出绕组分离型高压励磁双级互感器结构，先后研制出 $110/\sqrt{3}$ kV–$500/\sqrt{3}$ kV 高压励磁双级电压比例标准装置，准确度达到 0.002 级，并据此建立起国家工频电压比例基准。

目前主流的几个国家计量院包括 PTB、NRC、NIMA 等均采用的是压缩气体高压标准电容器实现高压电压互感器溯源。从 20 世纪 60 年代开始，长期以来通过对标容的结构理论，产生电压系数的机理等方面的深入研究，发展了诸如直流偏压法、双频法、倾斜法及倍压法等主要方法。尤其是倾斜法认为同轴圆柱电极标容的低压电极在电场作用下发生位移，是造成高压标容产生电压系数的主要因素。中国计量科学研究院研制了一种可远程控制的倾斜旋转实验平台，实现电容器在高压下带电旋转，在此基础上，又在原同轴圆柱电极结构的高压电容器上，安装了 1 套基于电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)成像和图像识别技术的微位移测量系统(见图 15)，分辨力达到微米量级，可直接测量高压电容的低压电极在受力作用后产生的位移量及方向，基于测量的位移增量，推导基于高低压电极相对位移测量的高压电容器容量电压系数的计算方法，并形成一套完整的测量标准[47]。

值得一提的是：对高压标准电容器电压系数的所有测试方法中，只有倍压法能够同时获得电容器容量和损耗的电压系数。更重要的是：测试结果是在运行条件下测量得到。倍压法最初由德国联邦物理技术研究院(PTB)在 1987 年提出，二段半电压采用级联变压器提供，由于这两段电压存在谐波含量的差异，当工作电压超过 50 kV 时，指零仪的平衡将非常困难。此外，由于需要手动操作，在高电压下进行平衡存在危险。参文[48]提出了一种在 400 kV 条件下实现的自动平衡改进倍压法，其实验装置如图 16 所示。该装置主要由以下部分构成：设置在浮地测量平台上的 2 台标准电容器，用于监测倍压的实际比值；一台用于提供倍压并具备中间输出的电

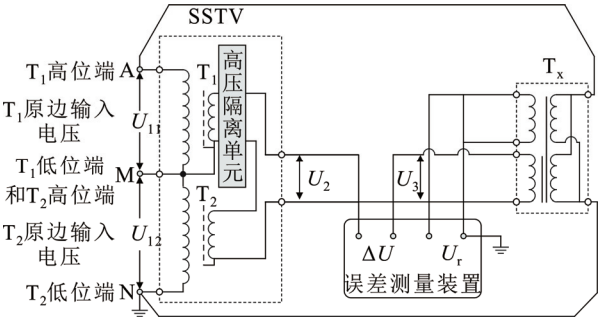


图 14 具有高压隔离单元的互感器串联加法线路

Fig.14 Series-summation calibration circuit for instrument transformers with high-voltage isolation units



(a) 带微位移测量系统的高压电容器结构示意图 (b) 微位移测量系统设计及实物图

图 15 基于 CCD 成像和图像识别技术的微位移测量系统

Fig.15 Micro-displacement measurement system based on CCD imaging and image recognition technology



图 16 倍压法测量高压标准电容器电压系数平台

Fig.16 Voltage dependence measurement platform for standard HV capacitor using voltage doubling method

容分压器；以及一套具备浮地自动平衡和数据无线传输功能的电流比较仪电桥系统。指零仪被浮地的自动电流比较仪电桥所取代，该电桥可以远程控制，以实时确定倍压的精确比率；通过引入电容分压器来提供倍压，消除了谐波失真的问题。其测量 400 kV 高压电容器电容和损耗角正切的电压系数的扩展不确定度约为 5×10^{-6} 和 5 μrad (k=2) 。

3.3 雷电冲击高压国际比对

2016 年，欧洲计量组织 EURAMET 的电磁计量委员会(TCEM)开展了雷电冲击(LI)测量系统辅助比对 EURAMET.EM-S42。此次比对由瑞典国家计量院(RISE)主导，并得到了 VTT MIKES(芬兰)和 FFII LCOE(西班牙)的支持。有 11 个国家计量院(NMI)和来自 4 个区域计量合作组织(EURAMET、COOMET、APMP 和 SIM)的 2 个指定研究机构(DI)参加比对[49]。

比对采用了 1 套用于测量雷电冲击(LI)的传递标准(TRMS)，该标准由 HIGHVOLT 提供。TRMS 由 1 个 700 kV 电阻分压器、1 个带计算机的瞬态数字记录仪(200 MS/s，12 bit，2 个通道)、冲击校准器和截波球隙组成。比对开始前，主导实验室于 2016 年 11 月对 TRMS 进行校准，并在 5 个 EURAMET NMI/DI 之间进行首次循环。在主导实验室于 2017 年 7 月进行中间校准后，TRMS 在其他区域组织的 7 个 NMI/DI 之间传递。在 TRMS 于 2019 年 3 月返回主导实验室完成了最终校准。

测量参数由 IEC60060-1 定义。试验电压(U_t)、波前时间(T_1)、半峰值时间(T_2)和相对过冲(β')用于测量雷电全波；极值(U_e)和截波时间(T_c)用于测量波前截波。试验电压为–700~700 kV，包含 2 个雷电全波和 1 个截波。确定了 1 组首选电压水平和波形。比对参考值(CRV)的扩展不确定度(k=2)分别为：U_t<0.3%，T_1<1.3%，T_2<1.0%，β'<0.4%，U_e<0.6%，T_c<1.4%。

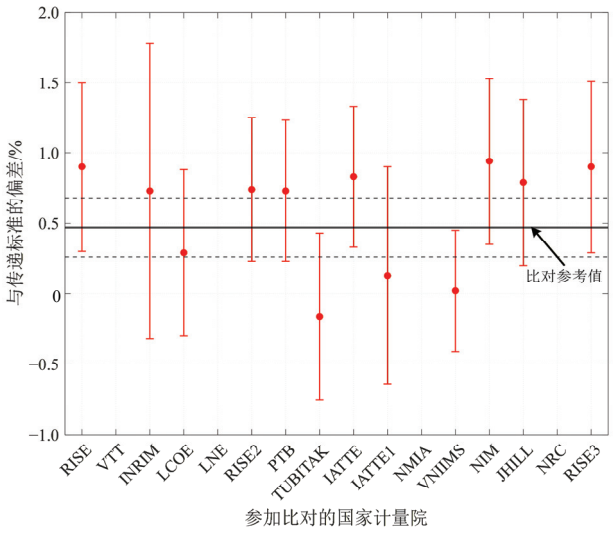
图 17 给出了 500 kV 雷电冲击全波电压的比对结果[49]。虽然各国计量院的测量结果在其声称的测量不确定度范围内取得一致，但可以看到这次国际比对结果整体的分散性较大，虽然传递标准出现了轻微的漂移，但在数据处理时进行了修正，即使没有修正，也并不会影响本次比对的不确定度。分压器刻度因数的校准结果，以及对数字记录仪冲击校准的反复测量均无法解释这次比对结果的分散程度。因此，比对的总结报告可以相当肯定地认为，分散性不是由传递系统的不稳定性造成，因为主导实验室对传递系统进行的重复校准可以证明。

可能的原因是实验室低估了由诸如不同冲击波形、不同的高压连接或不同的接地系统等因素引起的不确定度。考虑到这些影响量，比对增加了基于主导实验室在不同时间和地点执行的 3 次校准的可重复性不确定度分量。参文[50]分析和验证了雷电冲击发生器和测量系统中波前振荡的一种诱因。即在使用弱阻尼阻容分压器作为测量装置时，缺失或省略了应作为雷电发生回路负载的高压电容，从而导致波前振荡。此外，回路中的电感、接地和电缆效应也可能导致波形失真。对波形畸变对比对结果，特别是波前时间有较大影响。建议增加低等效串联电阻的高压脉冲电容器作为负载，以改善发生器多级点火的同步性等，这将有助于消除或减小雷电冲击电压波前振荡导致的测量分散性。

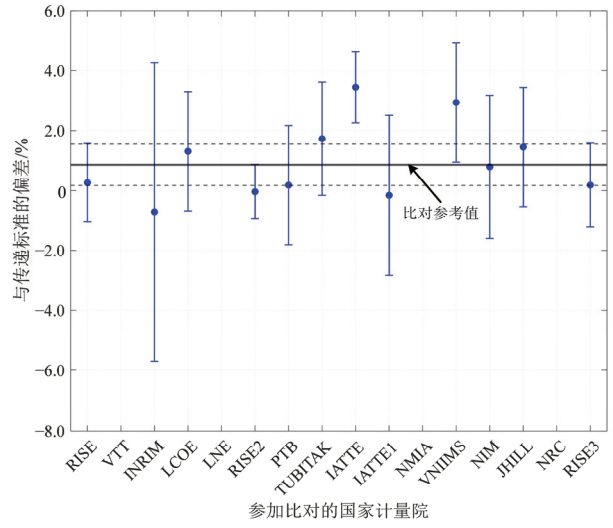
3.4 操作冲击标准测量系统

操作冲击(SI)电压是一种波前时间为20 μs或更长的高压冲击波形。SI 电压与 LI 电压解析波形的差异在于 SI 具有更长的有效持续时间。IEC 60060-1 中为高压测试定义的 SI 波形参数包括测试电压的最大值 U_p、达到峰值的时间 T_p 和半峰值时间 T_2。还包括几个辅助的附加参数，如真实原点 O，超过 90%峰值的持续时间 T_d，以及回零点的时间 T_z。由于只是辅助参数，并未对其定义容差[51]。

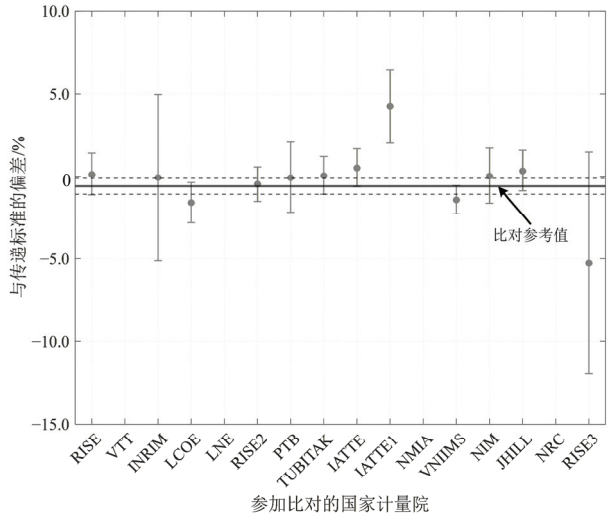
当前 IEC 60060-1:2010 关于 SI 冲击的问题在于，它对 SI 电压的峰值时间有一个单一的定义，但对其有多种不同的计算方法。首先，将峰值时间定义为冲击真实原点与峰值之间的绝对时间。随后，



(a) 试验电压 U_t



(b) 波前时间 T_1



(c) 半峰值时间 T_2

图 17 500 kV 雷电冲击全波电压比对结果

Fig.17 Comparison results of 500 kV full-wave voltage of lightning shock

又定义标准操作冲击峰值时间的计算式为 $T_p=KT_{AB}$，其中：

$$K=2.42-3.08\times10^{-3}T_{AB}+1.51\times10^{-4}T_2 \quad (1)$$

式中：T_{AB} 为冲击电压波前上，电压幅值分别达到峰值的 10%(A 点)和 90%(B 点)时刻之间的时间间隔。最后根据 IEC 60060-3 标准，峰值时间的定义计算为 $T_p=2.4T_{AB}$。这意味着对于标准 SI 冲击同时存在 3 种不同的定义，且它们彼此不同。此外，标准 IEC 60060-1:2010 还允许以任何可能的方式计算非标准 SI 冲击峰值时间。

SI 和 LI 在波形上非常相似，均为双指数波形，只是 SI 有效时间持续时间更长，因此在“IEC 60060-1:2025”中，已经规定以与 LI 电压相同的方式标准化 SI 冲击。新的 SI 电压定义具有与 LI 相同的波前时间 T_1 和半峰值时间 T_2。这意味着 LI 的 IEC 60060-1 附录 B 和 C 中规定的波形处理方法也适用于 SI 测试电压评估。在当前版本的标准 IEC 60060-1:2010 中，标准操作冲击电压定义为具有 250 μs 的达到峰值的时间和 2 500 μs 的半峰值时间。如果 SI 电压定义为具有与 LI 电压相同的波前时间和半峰值时间，则标准 SI 将被定义为具有 170 μs 的波前时间，2 500 μs 半峰值时间保持不变[52]。

虽然操作冲击也被列入了国际计量委员会电学与磁学咨询委员会(Consultative Committee for Electricity and Magnetism，CCEM)校准测量能力公布的高压大电流领域的关键参数，但国际上开展比对的次数较少，国内对标准操作冲击分压器的研究也相对较少，不如雷电冲击的研究深入和透彻。因其具有较长的持续时间，标准电阻分压器受功率的限制，不宜作为测量标准，主要通过弱阻尼电容分压器进行测量。

俄罗斯国家计量院(VNIIM)和德国联邦物理技术研究院(PTB)于 2017 年开展了一次操作冲击的双边比对[53]。比对内容包括在 0.5~1 kV 范围内对时间参数以及在 5~100 kV 范围内对电压幅值的测量；VNIIM 通过串联多个齐纳二极管进行分压测量，而 PTB 使用的传统的弱阻尼电容分压器，比对结果显示，双方在各自不确定度范围内一致性良好，其中电压幅值的测量不确定度约为 0.3%，时间参数的测量不确定度约为 1%。

3.5 特高压冲击量值传递的线性度问题

目前，冲击电压测量的一个难点在于 1 MV 以上电压等级的线性度问题，由于特高压输电线路在

电力系统中的广泛应用，大多数省级电科院及部分的计量院都配备了具有 1 800~3 600 kV 的冲击电压发生器，而中国电力科学研究院的特高压交流测试基地的额定冲击电压分压器更是达到 7.5 MV。制作相应电压等级的参考分压器并不现实，为了对测量系统实现全量程校准，这意味着线性度校准的不确定度也应小于 3%[54]。

线性度校准的前提是有线性度理想的参考设备，IEC 推荐的是用冲击电压发生器充电直流电压或是场强测量仪作为线性度的标准。但其一旦在高压下发生电晕，高压和低压下的电场分布发生改变，场强测量仪的输出将不再线性，并不适合作为线性度的标准或是只适合作为低压下的标准。目前，更多的是采用冲击高压发生器作为线性源，用被校准测量系统测量得到的峰值电压与冲击高压发生器的充电电压的比值作为线性度的测量方法，如果测量结果线性则证明被测是线性的，即在低压下校准得到刻度因数可以在高压下使用；但是如果测量结果不线性，并不能说明被测冲击高压系统是非线性的，因为并不知道冲击高压发生器本身是否线性[54]。

Li 在 2012 年 CIGRE 会议上报告指出，随着电压升高，被测的峰值电压和冲击发生器的充电电压的比值不断下降[55]。正极性的线性度似乎比负极性的线性度要差，且输出电压的波形也发生了明显的变化；对于用于特高压范围测试的分压器来说，实现刻度因数的电压线性度小于 3%和时间参数的电压线性度小于 5%可能很困难。应该研究其他的电压线性度方法，以便适当地规定特高压范围内冲击试验的测量不确定度。

参文[56]通过在冲击电压发生器的储能电容上并联浮地直流分压器，分别在 30 kV 和 90 kV 的单级充电电压下测量各级储能电容上的充电电压，并利用恒流充电和补偿功能稳定放电电压，通过蓝牙传输数据；随后，根据精确测量的充电电压计算放电效率，以此评估分压器的线性度，结果表明该方案能将 4 200 kV 冲击电压分压器的扩展不确定度控制在 1.3%，同时与电场测量法结果相互验证，提升了电压线性度测量的准确性。但文中并未涉及到时间参数的电压线性度[56]。

2022 年 10 月，9 个实验室利用荷兰代尔夫特大学高压实验室进行了为期 3 周实验和比对，验证了 1 500 kV 以上雷电冲击电压线性扩展方法的有效性，并希望找到波前时间非线性在特高压下较大的原因[57]。实验中仔细考虑包括邻近、电晕和冲击发生器源阻抗等影响。本次比对测量从 400 kV 下 9 个测量系统的校准开始，利用 5 台 500~2 000 kV 电阻分压器，4 台 1 000~4 000 kV 阻尼电容分压器，扩展和校准测量系统的线性到 3 000 kV。研究发现，2 套弱阻尼分压器的线性度在 3 000 kV 电压之间一致性在 1%之内，但以充电电压作为参考，线性度变化达到 3%，分析认为主要受实验室尺寸和电晕现象影响。

4 结论

新型电力系统包含大量可再生新能源发电系统，对测量技术的实时性、准确性和可靠性提出了更高要求。高电压计量技术作为保障电力系统安全稳定运行的关键支撑，面临着新的发展机遇和挑战。本文针对新型电力系统对高压计量提出的挑战，进行了分析、总结和展望。

1）量值溯源体系的创新是保障新型电力系统可靠性的基石。传统高电压量值溯源技术已难以满足新型电力系统对测量精度、实时性和可靠性的苛刻要求。未来的突破点在于精准时频同步，宽频相量测量，远程校准技术等方向。

2）复杂电磁环境下的精准计量是提升电网智能化水平的关键，新型电力系统运行环境日益复杂，电磁干扰对测量精度的影响不容忽视。未来的研究重点应放在 VFTO 抑制与计量和高压组合波形分析。

3）特高压计量是构建坚强智能电网的战略支撑。特高压技术是实现能源远距离传输的关键手段，对特高压计量标准的准确性提出了更高要求。未来的发展方向包括高精度直流分压器和交流高压计量自溯源，发展自主可控的高压标准装置，打破国外技术垄断，确保国家能源安全。积极参与国际比对活动，提升我国在高电压计量领域的国际影响力，推动相关国际标准的制定。

要实现上述目标，需要学术界、工业界和计量部门共同努力，完善标准规范，建立可靠的计量体系，为未来能源发展提供保障，为实现“双碳”目标贡献力量。

参考文献 References

[1] CIGRE. Lightning transient sensing, monitoring and application in electric power systems[R]. Paris, France: CIGRE, 2025.

[2] TANG Y H, STENBAKKEN G N, GOLDSTEIN A. Calibration of phasor measurement unit at NIST[J]. IEEE Transactions on Instru-

mentation and Measurement, 2013, 62(6): 1417-1422.

[3] FLUKE Corporation. Phasor measurement units gain credibility through improved test and calibration standards[R/OL]. (2011-11-01)[2025-04-21]. https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/3780120C_EN_w. pdf.

[4] QIAN C, KEZUNOVIC M. Synchrophasor reference algorithm for PMU Calibration system[C]//2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). Dallas, USA: IEEE, 2016: 1-5.

[5] PIRRET R. Testing and calibration of phasor measurement units[J]. NCSLI Measure, 2012, 7(2): 36-42.

[6] 朱介北，罗贺予，俞露杰，等. 新型电力系统惯量-频率“云-网-端”感知与控制技术展望[J]. 高电压技术，2024，50(7)：3090-3104.
ZHU Jiebei, LUO Heyu, YU Lujie, et al. Modern power system inertia-frequency sensing and control technology outlook across “cloud-grid-terminal”[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3090-3104.

[7] XU S D, LIU H, BI T S. Field PMU test and calibration method-part I: general framework and algorithms for PMU calibrator[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(6): 1507-1518.

[8] ŠÍRA M, MAŠLÁN S. Simple method for calibration of PMU calibrators[C]//25th IMEKO TC4 International Symposium and 23rd International Workshop on ADC and DAC Modelling and Testing (IWADC). Brescia, Italy: IMEKO, 2022: 39-44.

[9] IEEE. IEEE Guide for synchronization, calibration, testing, and installation of phasor measurement units (PMUs) for power system protection and control: IEEE Std C37.242—2021[S]. New York, USA: IEEE, 2021: 1-98.

[10] SILVERSTEIN A, FOLLUM J. High-resolution, time-synchronized grid monitoring devices[R]. Richland, Washington, USA: North American Synchrophasor Initiative, 2020.

[11] 樊　陈，姚建国，常乃超，等. 电力系统宽频测量装置技术规范解读及应用展望[J]. 电力系统自动化，2023，47(5)：190-199.
FAN Chen, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Interpretation of technical specification for wide-frequency measurement device of power system and prospect of its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 190-199.

[12] 吴　琛，刘旭斐，程　旻，等. 电力系统宽频相量测量装置的设计及测试[J]. 云南电力技术，2022，50(1)：78-83.
WU Chen, LIU Xufei, CHENG Min, et al. Design and test of broadband phasor measurement device for power system[J]. Yunnan Electric Power, 2022, 50(1): 78-83.

[13] 杨　庆，董富宁，罗曼丹，等. 宽频电压感知方法及其数据应用[J]. 高电压技术，2021，47(6)：1969-1983.
YANG Qing, DONG Funing, LUO Mandan, et al. Wideband voltage sensing methods and sensing data applications[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1969-1983.

[14] 唐海涛，王晓飞，王家福，等. 基于云服务的高压直流分压器远程校准系统[J]. 计量科学与技术，2022，66(4)：120-124，73.
TANG Haitao, WANG Xiaofei, WANG Jiafu, et al. Cloud-based remote calibration system for high voltage DC voltage dividers[J]. Metrology Science and Technology, 2022, 66(4): 120-124, 73.

[15] WANG J, CHEN H, SHAO H, et al. Remote calibration system for voltage transformer[C]//2022 Conference on Precision Electromagnetic Measuremets. Wellington, New Zealand: EEE Instrumentation and Measurement Society, Measurement Standards Laboratory (MSL), 2022: 1-2.

[16] VERHELST B, RENS S, RENS J, et al. On the remote calibration of instrumentation transformers: influence of temperature[J]. Energies, 2023, 16(12): 4744.

[17] RENS S. The remote calibration of instrument transformers[D]. Potchefstroom, South Africa: North-West University, 2019.

[18] EURAMET. 17IND06 FutureGrid II-final publishable report[EB/OL]. EURAMET, 2018[2025-04-21]. https: //www. aramis. admin. ch/Texte/?ProjectID=41715&Sprache=en-US.

[19] EURAMET. 21NRM02 Digital-IT: Metrology for digital substation instrumentation[EB/OL]. EURAMET, 2021[2025-04-21]. https://cris.vtt.fi/en/projects/metrology-for-digital-substation-instrumentation/.

[20] PAN Y, GENG J, ZHOU L R, et al. Multifunctional wideband digital sampling system for the calibration of conventional transformers and electronic transformers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1502308.

[21] CIGRE. Measuring techniques and characteristics of fast and very fast transient overvoltages in substations and converter stations[R]. Paris, France: CIGRE, 2021.

[22] ELG A P, GARNACHO F, GARCIA T. Traceable measurement of transmitted overvoltages in instrument transformers[J]. CIGRE Science and Engineering, 2019(16): 58-63.

[23] KHAMLICHI A, GARNACHO VECINO F, HÄLLSTRÖM J, et al. Calibration setup for traceable measurements of very fast transients[C]//21st International Symposium on High Voltage Engineering. Budapest, Hungría: ISH, 2019: 1-6.

[24] IISAKKA O. Development and testing of software for evaluation of high voltage composite and combined waveforms[D]. Tampere, Finland: Tampere University, 2021.

[25] PISCHLER O, SCHICHLER U. HV-com²-support for standardisation of high-voltage testing with composite and combined wave shapes (WP3)[C]//EMPIR 19NRM07 HVcom² Stakeholder Workshop. Braunschweig, Germany: EMPIR, 2023: 1-2.

[26] KHAMLICHI A, GARNACHO F, ROVIRA J, et al. Universal measuring unit for high voltage measurements[C]//Proceedings of the 27th Nordic Insulation Symposium. Trondheim, Norway: NORD-IS, 2022: 1-5.

[27] KUPPUSWAMY R. Review of online partial discharge measurement practices[R]. Sussex, Wisconsin, USA: Dynamic Ratings Inc., 2018.

[28] HAVUNEN J. Methods for the measurement of impulse voltage and partial discharge[D]. Espoo, Finland: School of Electrical Engineering, Aalto University, 2023.

[29] HAVUNEN J, HÄLLSTRÖM J. Application of charge-sensitive preamplifier for the calibration of partial discharge calibrators below 1 pC[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(6): 2034-2040.

[30] EURAMET. 17NRM01 TrafoLoss: Loss measurements on power transformers and reactors[EB/OL]. EURAMET, 2017(2021-04-30)[2025-04-21]. https://www. trafoloss. eu/.

[31] MEHTA S P, PETERSONS O. Calibration of test systems for measuring power losses of transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(4): 215-223.

[32] MARTÍN R, SIMÓN P, BERGMAN A, et al. Traceability in high voltage capacitance and dissipation factor measurements[R]. Madrid, Spain: Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia (LCOE), Final Report of comparison Project EURAMET. EM-S34: Supplementary comparison. EURAMET, 2016.

[33] RIETVELD G, MOHNS E, HOUTZAGER E, et al. Comparison of reference setups for calibrating power transformer loss measurement systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(6): 1732-1739.

[34] ZHAO W, ZHANG H H, YOU L, et al. Reference standard for the

calibration of transformer loss measurement system in China[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2022, 25(5): 4-10.

[35] WU Z Y, ZORA L T, PHADKE A G. Simultaneous transmission line parameter and PMU measurement calibration[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, USA: IEEE, 2015: 1-5.

[36] HE C, CHENG R, ZHANG C J, et al. Evolutionary large-scale multi-objective optimization for ratio error estimation of voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2020, 24(5): 868-881.

[37] HE C, CHENG R, LI L H, et al. Large-scale multiobjective optimization via reformulated decision variable analysis[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2024, 28(1): 47-61.

[38] ZHANG C J, GUO P P, CHENG C, et al. Detecting breakdowns in capacitor voltage transformers: a knowledge-assisted online approach[J]. Measurement, 2024, 226: 114197.

[39] YAN X, HE C, ZHANG C J, et al. Unsupervised online poor contact detection in the secondary circuit of voltage transformers[J]. Measurement, 2025, 240: 115543.

[40] LI D Y, LIU K P, LEI M, et al. Study on the ratio change measurement of 1 000 kV HVDC divider based on improved DC voltage summation method[J]. High Voltage, 2020, 5(2): 202-208.

[41] LI Y, EDIRIWEERA M K, EMMS F S, et al. Development of precision DC high-voltage dividers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(7): 2211-2216.

[42] 张煌辉，林飞鹏，邵海明，等. 直流高压电阻分压器泄漏电流测量研究[J]. 计量学报，2018，39(1)：83-88.
ZHANG Huanghui, LIN Feipeng, SHAO Haiming, et al. Research on measuring leakage current of DC high-voltage resistive divider[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(1): 83-88.

[43] KIM K T, JUNG J K, YU K M, et al. Modified step-up method for calibration of DC high-voltage dividers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(6): 1103-1107.

[44] 杨 琦，张春丽，吴锦涛，等. 高压直流电场非接触测量传感器的设计与研究[J]. 云南电力技术，2024，52(1)，29-35.
YANG Qi, ZHANG Chunli, WU Jintao, et al. Design and research of high voltage direct current electric field non-contact measuring sensor[J]. Yunnan Electric Power, 2024, 52(1), 29-35.

[45] 雷 民，周 峰，项 琼，等. 新一代 110 kV 工频电压比例标准装置及其应用[J]. 供用电，2013，30(2)：71-75.
LEI Min, ZHOU Feng, XIANG Qiong, et al. The new generation of 110 kV power frequency voltage ratio standard apparatus and application[J]. Distribution & Utilization, 2013, 30(2): 71-75.

[46] SHAO H M, LIN F P, LIANG B, et al. The development of 110/$110/\sqrt{3}$ kV two-stage voltage transformer with accuracy class 0.001[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(6): 1383-1389.

[47] ZHANG H H, SHAO H M, WANG J F, et al. Measurement uncertainty in voltage coefficients for compressed-gas capacitor based on a simplified tilting method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1502509.

[48] PAN Y, ZHOU L R, FENG J, et al. Investigation on the voltage dependence of compressed-gas-insulated capacitors up to 400 kV by improved voltage-doubling method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1502907.

[49] HÄLLSTRÖM J, ELG A-P, HAVUNEN J, et al. Comparison of lightning impulse (LI) reference measuring systems[J]. Metrologia, 2020, 58(1A): 01001.

[50] ZHAO W, SHAO H M, DING J D, et al. Resonance at the front of lightning impulse voltage waveforms caused by the load capacitor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1003507.

[51] YUTTHAGOWITH P. An accurate evaluation of switching impulse voltages for high-voltage tests[J]. Energies, 2022, 15(13): 4760.

[52] HAVUNEN J, HÄLLSTRÖM J. Reference switching impulse voltage measuring system based on correcting the voltage divider response with software[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1006008.

[53] BOYARIN N, DUBROVSKAYA T, ERMAKOV K, et al. Bilateral comparisons of reference switching impulse voltage measuring systems[R]. Moscow, Russian: Russian Research Institute for Metrological Service (VNIIMS), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 2017: 1-23.

[54] GOCKENBACH E, HAUSCHILD W, MUHR H M, et al. Challenges on the measuring and testing techniques for UHV AC and DC equipment[C]//2017 UHV-Symposium. Beijing, China: UHV, 2007: 1-4.

[55] LI Y. Voltage linearity of scale factor and wave shape parameters of UHV impulse voltage dividers[C]//2012 CIGRE Paris Session. Paris, France: CIGRE, 2012.

[56] LI W T, LONG Z Z, ZHOU F, et al. Calibration of UHV impulse voltage divider in China[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2023, 39(3): 13-21.

[57] HÄLLSTRÖM J, ELG A P, NIEMINEN T, et al. Linearity extension of UHV class lightning impulse dividers up to 3 000 kV[C]//23rd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023). Glasgow, UK: IEEE, 2023: 8-13.



邵海明
1965—，男，博士，研究员
主要从事高电压大电流新型传感和计量溯源技术研究
E-mail: shaohm@nim.ac.cn

SHAO Haiming
Ph.D., Professor



王家福(通信作者)
1983—，男，博士，副研究员
主要从事高压大电流计量技术研究
E-mail: jiafu.wang@nim.ac.cn

WANG Jiafu
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



李传生
1984—，男，博士，副研究员
主要从事光纤电流传感、冲击高电压/大电流计量技术研究
E-mail: ichsh@nim.ac.cn

LI Chuansheng
Ph.D.
Associate professor

收稿日期 2025-04-29 在线出版日期 2025-10-23 编辑 卫李静