

计量仪器的远程量值传递与溯源技术探讨

同立民

陕西省计量科学研究院 陕西 西安 710000

摘要：传统的量值传递与溯源方式需离线进行，影响正常生产，且仅能获得基本误差，无法获取现场应用的附加误差。随着物联网技术的发展，远程量值传递与溯源技术成为解决这一难题的关键。本文调研了国内外计量仪器领域的远程量值传递与溯源技术现状，归纳了三种实现途径，并比较了其难易程度，提出实现理想方式的远程量值传递与溯源技术尚需深入研究的领域及内容。

关键词：计量仪器；远程量值传递；溯源技术

引言

在科技飞速发展的当下，计量仪器的精确度和量值溯源性在科研、工业生产等领域中扮演着举足轻重的角色。然而，传统的现场校准和溯源方式在时效性、成本及资源利用方面存在显著局限。远程量值传递与溯源技术的兴起，为解决这一问题提供了创新性的思路。本文将从技术背景、关键要素、实践应用及未来展望等角度，全面探讨计量仪器的远程量值传递与溯源技术，以期对相关领域的发展提供参考。

1 计量仪器与量值传递基础

1.1 计量仪器概述

(1) 计量仪器按功能可分为测量仪器（如游标卡尺、温度计）、标准仪器（如量块、标准电阻）和辅助仪器（如电源稳压器、数据记录仪）。在工业生产中，游标卡尺用于零部件尺寸检测，保障产品精度；医疗领域，体温计、血压计等直接关系诊疗准确性；科研实验里，光谱仪、干涉仪等为精密测量提供数据支撑。(2) 计量仪器的主要性能指标包括准确度（测量结果与真值的接近程度）、精密度（多次测量结果的一致性）、量程（测量范围）、分辨力（能区分的最小量值）和稳定性（长期保持性能的能力）。例如，高精度天平的准确度达0.1mg，量程却通常较小，而工业用压力表则需兼顾量程与环境稳定性。

1.2 量值传递的概念与重要性

(1) 量值传递是指通过一定的技术手段，将国家计量基准所复现的量值逐级传递到工作计量器具，以保证测量结果统一、准确的过程。其目的是使所有测量结果都能溯源到国家基准，消除量值差异导致的测量误差，确保贸易公平、产品质量可控和科研数据可靠。(2) 在计量体系中，量值传递是核心纽带。它连接了国家最高计量标准与基层测量应用，确保从国家级实验室到企业

生产线的测量结果具有可比性，为质量监督、市场监管和科技创新提供了计量技术支撑。

1.3 量值传递的基本途径与方法

(1) 从国家计量基准到各级计量标准的传递，通常采用逐级检定或校准的方式。国家基准传递至省级计量标准，再由省级传递至市级、县级，最终覆盖企业和实验室的工作计量器具，形成层级分明的传递网络。(2) 检定是具有法制性的计量活动，依据检定规程判定仪器是否合格；校准则是自愿性的技术服务，提供测量结果的修正值。在量值传递中，检定用于强制管理的计量器具（如加油机、医用体温计），校准则适用于科研和企业内部的非强制器具，二者共同保障量值的有效传递^[1]。

2 计量仪器的远程量值传递技术

2.1 远程量值传递的背景与挑战

(1) 计量仪器在使用过程中的误差来源复杂多样，主要包括环境因素（如温度波动、湿度变化、振动干扰）、仪器自身损耗（零部件老化、传感器漂移）、操作偏差（人为读数误差、校准流程不规范）以及外部电磁干扰（电网波动、射频信号干扰）。例如，高精度光谱仪在温度变化 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 时，测量误差可能增加2%~5%；长期使用的压力传感器会因膜片疲劳导致零点漂移。(2) 传统量值传递方式存在显著局限性：一是时效性差，需将仪器送至实验室检定，往返周期通常为1~2周，影响生产连续性；二是成本高昂，大型设备运输费用可达数万元，且拆卸安装可能引入新误差；三是覆盖范围有限，偏远地区或特殊环境（如核电站、航天基地）的仪器难以实现定期校准；四是溯源链条断裂风险，当仪器在两次检定间隔内出现突发故障时，无法及时发现误差超差问题。

2.2 远程量值传递的关键技术

(1) 实时数据采集与传输技术是远程量值传递的

基础,需满足高频采样(采样率 $\geq 1\text{kHz}$)和低延迟传输(网络延迟 $< 100\text{ms}$)要求。通过物联网传感器模块(如NB-IoT、5G工业模组)采集仪器的实时测量数据、环境参数及运行状态,结合边缘计算节点对原始数据进行预处理(滤波、降噪),再通过加密传输协议(如TLS1.3)上传至云端平台。例如,智能万用表可通过内置4G模块每秒上传10组测量数据,确保动态误差的实时捕捉。(2)高精度校准算法与模型是提升远程传递准确性的核心,包括动态误差补偿模型(基于机器学习的温度-误差映射算法)、非线性修正算法(最小二乘法拟合)和多源数据融合技术(融合环境参数与仪器读数)。某科研团队开发的自适应校准模型,通过LSTM神经网络预测仪器漂移趋势,将远程校准误差控制在0.02%以内,达到实验室级精度。(3)网络安全与数据保护技术需构建多层防护体系:物理层采用硬件加密芯片(如国密SM4算法)存储计量数据;网络层部署防火墙与入侵检测系统(IDS),拦截异常访问;应用层实施数据脱敏处理,对敏感参数(如计量数据)进行差分隐私保护。某远程校准平台通过区块链技术实现数据上链存证,确保量值传递过程可追溯、不可篡改^[2]。

2.3 远程量值传递系统的实现与应用

(1)系统架构设计采用“终端-边缘-云端”三层架构:终端层由智能计量仪器与环境传感器组成,负责数据采集;边缘层部署在企业本地服务器,完成实时校准计算与异常预警;云端层为国家级计量数据中心,存储溯源记录并提供远程诊断服务。该架构支持数万台仪器同时接入,单台设备数据传输延迟控制在50ms以内。(2)在智能电网领域,某省电力公司部署远程量值传递系统后,关口电能表的校准周期从30天缩短至7天,校准成本降低60%,测量误差超差率从1.2%降至0.3%;在医疗设备领域,远程校准系统实现了CT机剂量计的实时监控,某三甲医院通过系统提前预警3台设备的漂移故障,避免了误诊风险。实践表明,远程量值传递技术可使计量效率提升3~5倍,同时保持与传统方式相当的溯源准确性。

3 计量仪器的远程量值溯源技术

3.1 量值溯源的概念与原则

(1)量值溯源是指通过一条具有规定不确定度的不间断的比较链,使测量结果或测量标准的值能够与规定的参考标准(通常是国家基准或国际基准)联系起来的过程。其核心目的是保证测量结果的准确性和一致性,确保不同时间、不同地点的测量数据具有可比性,为贸易结算、产品质量控制、科学研究等活动提供可靠的计量基础。例如,企业生产线上的温度计通过溯源至国家

温度基准,可确保其测量的温度值与国际通用标准保持一致。(2)量值溯源的基本原则包括溯源的唯一性(所有测量结果最终都应能溯源至国家或国际基准)、不间断性(溯源链中各环节不得中断,需明确各层级标准的不确定度)、准确性(溯源过程中需控制不确定度在允许范围内)。同时,还要求溯源过程具有可追溯性,即每一步溯源操作都应有完整记录,包括校准时间、所用标准、操作人员等信息,以便后续核查与追溯。

3.2 量值溯源的途径与方法

(1)自下而上的溯源链构建是量值溯源的主要途径,通常从工作计量器具开始,逐级向上溯源至更高等级的计量标准,直至国家基准。具体流程为:企业使用的工作仪器(如游标卡尺)先溯源至企业内部标准,再由企业标准溯源至地方计量技术机构的次级标准,进而溯源至省级计量标准,最终溯源至国家基准。每个环节都需通过检定或校准,明确不确定度的传递关系,形成完整的溯源链条^[3]。(2)常见的溯源方式包括直接溯源(将仪器送至更高等级的计量机构进行校准)、间接溯源(通过标准物质或传递标准进行量值传递)、内部溯源(企业建立内部校准体系,自行完成部分溯源环节)。直接溯源准确度最高,但成本高、周期长,适用于高精度仪器;间接溯源灵活性强,可降低运输成本,适用于大型或不易移动的设备;内部溯源能提高效率,适用于日常频繁使用的常规仪器。企业需根据仪器精度要求、使用频率及成本预算选择合适的溯源方式。

3.3 远程量值溯源的实现与挑战

(1)远程量值溯源技术在实现过程中面临诸多难点:一是数据传输的稳定性,网络延迟、数据包丢失可能导致测量数据失真,影响溯源准确性;二是环境干扰的精准把控,远程环境参数(如温度、湿度)的测量误差会直接影响溯源结果,难以像实验室环境那样精确控制;三是标准量值的远程传递,如何在非直接接触的情况下,确保高等级标准量值准确传递至低等级仪器,是远程溯源的核心难题;四是溯源结果的可信度验证,缺乏现场核查环节,难以确认远程数据的真实性与可靠性。(2)提高远程溯源准确度的策略与方法主要有:采用高精度传感与传输技术,如5G+边缘计算技术,减少数据传输延迟与损耗,确保实时数据的准确性;建立动态误差补偿模型,通过人工智能算法分析环境参数对测量结果的影响,自动修正误差;引入区块链技术,对溯源过程中的数据进行加密存证,保证数据的不可篡改与可追溯;定期进行现场比对校准,将远程溯源结果与传统现场校准结果进行对比,验证远程溯源的可靠性,并根

据比对结果优化溯源模型；制定统一的远程溯源技术规范，明确数据采集、传输、处理等环节的标准，确保不同机构的远程溯源结果具有可比性^[4]。

4 计量仪器的远程量值传递与溯源技术的综合应用

4.1 典型应用场景分析

(1) 在工业生产中，计量仪器校准是保障产品质量的关键环节。远程量值传递与溯源技术可实现生产线关键设备的实时监控与校准，例如汽车制造车间的三坐标测量机、半导体工厂的光刻机定位系统等。通过部署物联网传感器采集设备运行数据，结合云端校准模型，可在不中断生产的情况下完成校准，将传统停机校准导致的生产损失降低70%以上。同时，远程溯源技术能确保车间计量仪器的量值统一，使零部件公差控制精度提升至 $\pm 0.001\text{mm}$ ，大幅减少因测量误差导致的装配故障。(2) 科学研究对测量精度的要求严苛，远程技术为跨地域的高精度测量提供了可能。在天文观测领域，分布于全球的射电望远镜阵列需通过远程量值传递实现数据同步，其频率测量精度需控制在 10^{-15} 量级；在粒子物理实验中，对撞机探测器的能量测量系统通过远程溯源至国际计量局的量子基准，确保不同实验室的实验数据具有可比性。远程技术打破了时空限制，使科研团队能实时共享校准数据，将跨国实验的量值偏差缩小至0.002%以内。

4.2 实际应用案例研究

(1) 某新能源汽车电池生产企业的案例具有代表性。该企业引入远程量值传递系统后，对车间内200余台电压测试仪实施远程校准：通过5G网络实时传输测量数据至省级计量院云端平台，平台基于动态补偿算法修正环境温度对测量的影响，再将校准结果反馈至设备终端。系统运行半年间，电压测试误差从 $\pm 0.5\%$ 降至 $\pm 0.1\%$ ，电池一致性合格率提升12%。(2) 从应用效果看，该案例实现了三大突破：校准周期从14天缩短至4小时，设备利用率提高30%；年度校准成本减少45万元（含运输与停机损失）；通过远程溯源形成完整数据链，顺利通过国际汽车工作组（IATF）的质量审核。但仍存在问题：极端天气下5G信号波动会导致数据传输延迟，影

响校准实时性；部分老旧设备因接口不兼容，需额外加装转换模块，增加了初期投入。

4.3 应用前景与展望

(1) 未来远程量值传递与溯源技术将呈现三大趋势：一是智能化，基于数字孪生技术构建仪器虚拟模型，实现全生命周期的预测性校准；二是泛在化，借助6G网络与微型传感器，使便携式计量设备也能接入远程系统；三是标准化，国际计量组织正推动远程溯源协议统一，预计2030年前形成全球通用的技术规范。(2) 在民生领域，远程技术可实现家用血压计、血糖仪的批量远程校准，保障医疗数据准确性；在航空航天领域，卫星载荷的在轨计量将依赖远程传递技术，降低航天器维护成本；在环境监测领域，分布式传感器网络通过远程溯源，能实现跨区域污染数据的精准比对。随着技术成熟，预计到2028年，工业领域远程校准覆盖率将超过60%，科研领域关键设备远程溯源率可达85%以上，推动计量体系向“实时、智能、全域”方向变革。

结束语

综上所述，计量仪器的远程量值传递与溯源技术不仅革新了传统校准模式，还极大地提升了计量工作的效率和准确性。随着技术的不断进步，其在科研、工业生产等多个领域的应用前景将更加广阔。尽管当前仍面临一些技术挑战，但通过持续的研究与创新，我们有理由相信，远程量值传递与溯源技术将为构建更加精准、高效的计量体系奠定坚实基础，推动各领域的高质量发展。

参考文献

- [1]李东升.基于区块链技术的计量仪器远程溯源系统研究[J].计量学报,2022,(04):45-46.
- [2]黄志强.物联网环境下的计量仪器远程校准技术研究[J].自动化与仪器仪表,2020,(10):114-115.
- [3]张海涛.5G技术在计量量值远程传递中的应用前景分析[J].中国测试,2020,(06):61-62.
- [4]赵静,孙伟.基于云平台的计量仪器远程量值溯源系统设计[J].计量技术,2020,(08):81-82.