

国产化计量仪器在精密检测场景中的适配性研究

王胜超

中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所 北京 100000

摘要: 本文聚焦于国产化计量仪器在精密（精密）检测场景中的适配性问题，通过系统梳理国内外发展现状，深入剖析精密检测对计量仪器的核心性能指标要求，并结合航空航天等典型应用场景，揭示当前国产仪器在精度、稳定性、可靠性及生态兼容性等方面存在的差距与挑战。在此基础上，本文提出构建一个涵盖“基础性能-环境适应性-应用效能-生态融合度”四个维度的综合性适配性评价体系，并从核心技术攻关、标准体系建设、产学研用协同及政策引导等层面，为提升国产计量仪器的适配能力提供系统性优化路径，旨在为推动我国高端制造和前沿科研的自主可控发展提供理论支撑与实践参考。

关键词: 国产化；计量仪器；精密检测；适配性；评价体系

引言

计量被誉为“工业之眼”，是支撑新质生产力发展的关键基础。随着集成电路、商业航天、生物制造等前沿领域对产品精度要求日益严苛，精密检测已从质量控制环节跃升为驱动工艺迭代与创新的核心“导航仪”。然而，我国高端计量仪器长期依赖进口，瑞士海克斯康、德国蔡司、英国雷尼绍等国际巨头凭借技术壁垒，占据国内70%以上高端市场份额，不仅抬高科研与制造成本，更威胁产业链安全。近年来，国家高度重视仪器自主可控，《计量发展规划（2021—2035年）》明确提出加强核心器件、算法和溯源技术研发，推动关键设备国产化。在此背景下，系统研究国产计量仪器在真实复杂检测场景中的适配能力，具有重要的理论价值与紧迫的现实意义。

1 精密检测场景对计量仪器的核心性能指标要求

1.1 基础计量性能

这是衡量一台计量仪器优劣的根本。准确度、重复性、稳定性和分辨率共同构成了仪器性能的基石。准确度是指测量结果与真值的一致程度，在半导体光刻工艺中，套刻误差的测量准确度需达到亚纳米级别，任何微小的偏差都可能导致整片晶圆报废。重复性则关乎批量生产的良率，它反映了在相同条件下对同一被测物进行连续多次测量时结果之间的一致性，高重复性意味着生产过程的稳定可控^[1]。稳定性是仪器在长时间运行或面对不同环境条件时，其计量性能保持不变的能力，这对于需要7x24小时不间断运行的生产线而言至关重要，避免了因仪器漂移而导致的频繁校准和停机。而分辨率则是仪器能够有效辨别的最小示值变化量，在原子力显微镜（AFM）这类尖端设备中，垂直分辨率甚至需达到皮米

（pm）量级，以捕捉材料表面的原子级起伏。

1.2 通用质量特性

除核心计量性能外，仪器还需具备优良的工程化属性。可靠性是用户首要考量，体现为低故障率和高平均无故障时间（MTBF）；环境适应性亦至关重要，需耐受温度、湿度、振动及电磁干扰等工业现场复杂条件——如半导体洁净室设备还须满足严苛的颗粒物排放标准。此外，人机交互便捷性、数据分析智能化，以及对OPC UA等工业协议的支持，直接影响操作效率与系统集成，是决定用户采纳的关键软实力。

1.3 量值溯源性

任何测量结果的可信度都建立在可溯源的基础上。高端计量仪器必须能够通过一条不间断的校准链，将其测量结果追溯到国家或国际计量基准，确保数据的全球互认。这不仅是科学严谨性的要求，更是打破国外技术垄断、建立自主技术标准体系的关键。缺乏有效的量值溯源能力，即便仪器本身性能优异，其测量数据也难以获得国际同行的认可，从而限制了我国科研成果的影响力和高端产品的全球竞争力。

2 国内外计量仪器产业发展现状与对比分析

2.1 国外高端计量仪器产业格局

全球高端计量仪器产业呈现出“寡头竞争、技术壁垒高筑”的特点。以三坐标测量机（CMM）为例，海克斯康和蔡司凭借其在光学、机械和软件算法上的绝对优势，几乎垄断了全球90%以上的高端市场。它们的产品不仅硬件性能卓越，更拥有成熟的、经过数十年行业验证的测量软件生态系统，如PC-DMIS和Calypso，这些软件集成了海量的行业测量方案和经验丰富的数据库，形成了强大的用户粘性。更为关键的是，这些国际巨头深度参与

ISO、IEC等国际标准的制定过程，将自身的技术优势转化为行业规则，进一步巩固了其难以撼动的市场领导地位，使得后来者即便在硬件上有所突破，也难以在生态和标准层面实现超越。

2.2 国产计量仪器的发展成就与瓶颈

在国家政策强力支持下，国产计量仪器产业取得显著进展。以中图仪器为代表的企业，其固定桥式三坐标测量机在短行程下的长度测量示值误差已控制在1微米以内，基本满足部分中高端制造需求；在半导体领域，卓海科技、精测电子等企业已能提供前道量检测设备，并实现百台级产业化交付，标志着国产替代迈出坚实一步。然而，与国际顶尖水平相比，国产仪器仍面临三大核心瓶颈。一是关键核心元器件——如高精度传感器、特种光源、高速数据采集卡等——仍严重依赖进口，从根本上限制了整机性能上限。二是工程化与可靠性存在明显短板：许多设备在实验室表现良好，但在复杂工业现场的长期稳定性与抗干扰能力不足。正如业内人士所言：“要实现真正落地，必须系统性补齐工业化能力——无论是运行稳定性、批量一致性，还是人机交互体验，任一环节薄弱都会影响用户采纳意愿。”三是生态体系尚不健全：相比国际龙头，国内厂商普遍缺乏成熟、开放且经大规模验证的软件平台与配套数据库，导致用户面临较高的学习成本和技术转换风险，严重制约国产设备的市场渗透与规模化应用。

3 国产计量仪器在典型精密检测场景（航空航天）中的应用分析

国产计量仪器在航空航天领域的应用已从辅助角色逐步迈向核心支撑，并在若干高难度、高价值场景中实现系统性突破，主要体现在以下三类典型应用中。

3.1 复杂曲面关键部件的高精度几何量测量

航空发动机叶轮叶片、RV减速器摆线轮等零部件具有高度复杂的自由曲面，其形面偏差需控制在微米级，直接影响整机效率与寿命。中图仪器依托全栈自研的PowerDMIS软件与高精度测头系统，实现了对这类工件的全自动三维重建与公差分析，成功支撑C919大飞机等国家重大工程的研制，标志着国产装备在高端几何量检测领域具备工程化能力。

3.2 航天器密封性能的微漏率精密检测

载人航天对舱体密封性要求极为严苛，微小泄漏可能危及宇航员生命。兰州空间技术物理研究所李得天团队自主研发舱门快速检漏仪及精确标定装置，攻克了 $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 量级微漏率测量的世界性难题，建立了可溯源、高灵敏度的检测体系，已应用于神舟系列飞

船，为载人任务提供关键计量保障。

3.3 大型飞行器结构装配的空间坐标动态测量

C919、长征火箭等大型装备的模块化总装要求在数十米尺度内实现 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 级的高精度对接。此类任务依赖激光跟踪、摄影测量或多传感器融合系统进行动态非接触测量。尽管原文未详述具体案例，但国内相关单位正加快自主激光跟踪仪与智能测量平台研发，力图打破国外垄断，支撑未来商业航天与重型运载器发展。

4 国产计量仪器适配性评价体系构建

为系统评估并指导国产计量仪器的优化升级，亟需建立一套科学、全面的适配性评价体系。本文提出的四维评价模型如图1所示。

四方评价模型图

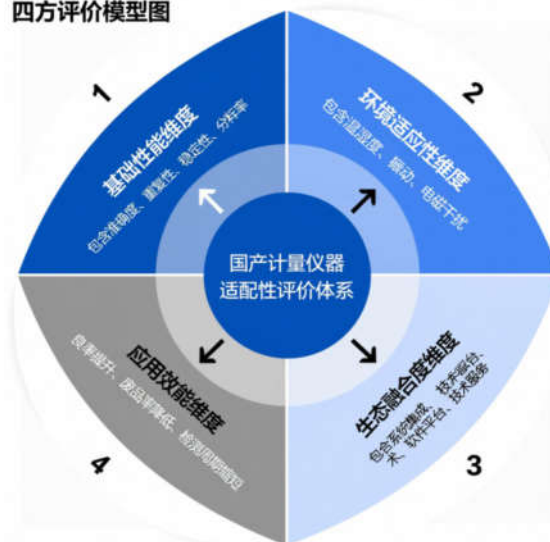


图1 国产计量仪器适配性四维评价体系

4.1 基础性能维度

此维度聚焦仪器的核心计量学指标，是评价体系的根基所在。它要求通过标准化的实验室测试流程，对仪器的准确度、重复性、稳定性、分辨率等关键参数进行量化评估。这一过程并非孤立地看待单一指标，而是要将其置于一个完整的对标框架中，与国际同类顶尖产品以及相关行业的权威标准进行横向比较，从而客观地定位国产仪器的技术水平，明确其优势与不足。

4.2 环境适应性维度

如果说实验室测试是“理想状态”下的考核，那么环境适应性维度则是对仪器“实战能力”的检验。该维度强调模拟真实工业现场的复杂环境，包括但不限于温湿度的周期性变化、来自周边设备的机械振动、以及无处不在的电磁噪声。通过在这些非理想条件下进行长时间的测试，可以有效评估仪器性能的漂移程度和整体鲁棒性，确保其从洁净、恒温的实验室“走出”后，

依然能在嘈杂、多变的工厂车间里保持可靠的计量性能,真正实现从“样品”到“产品”的跨越。

4.3 应用效能维度

这一维度将评价的视角从仪器本身转向了其服务的对象——终端用户。它主张在目标用户的实际产线上进行为期数月甚至更长时间的应用验证,从“用户视角”出发,考察仪器对提升良品率、降低废品率、缩短检测周期、减少人工干预等关键业务指标所产生的实际贡献。这种基于真实价值创造的评价方式,能够有效弥合技术研发与市场需求之间的鸿沟,确保国产仪器的研发方向始终与产业痛点同频共振。

4.4 生态融合度维度

在智能制造时代,单台仪器的性能已不再是唯一决定因素,其融入更大工业生态的能力变得愈发重要。生态融合度维度着重考察仪器与现有制造执行系统(MES)、产品生命周期管理(PLM)等信息系统的集成能力,评估其软件平台的易用性、开放性和对二次开发的支持程度^[3]。同时,配套技术服务网络的完善程度,包括响应速度、备件供应和技术支持的专业性,也是该维度的重要组成部分。一个高融合度的生态,能够显著降低用户的使用门槛和总拥有成本,是国产仪器赢得市场信任的关键。

5 提升国产计量仪器适配性的优化路径

5.1 强化核心技术联合攻关

要从根本上解决“卡脖子”问题,必须强化对核心技术的联合攻关。建议设立国家级重大科技专项,集中高校、科研院所和龙头企业的优势资源,形成合力,重点突破高精度传感器、量子计量基准、核心算法等领域的技术瓶颈。鼓励由行业龙头企业牵头,组建跨学科、跨领域的创新联合体,打通从基础研究、技术开发到工程化、产业化的全链条,实现创新要素的高效配置和成果转化。

5.2 完善标准与评价认证体系

一套科学、公正、权威的评价认证体系是国产仪器走向市场的通行证。应加快制定覆盖更多仪器品类的《国产化检测仪器设备验证评价指南》,并依托国家计量院等权威机构,建立独立的第三方测评与认证中心^[4]。通过“揭榜挂帅”等机制,推动评价结果与政府采购、首台(套)重大技术装备保险补偿等激励政策直接挂钩,为经过严格验证的优秀国产产品打开市场通道,破除“不敢用、不愿用”的市场壁垒。

5.3 深化产学研用协同机制

创新的源泉在于需求,而需求来自于用户。必须深化“产学研用”一体化的协同机制,构建“用户出题、院所答题、企业解题、市场阅卷”的良性循环模式。政府应积极引导并鼓励终端用户,特别是大型央企和行业领军企业,主动开放其真实的应用场景,为国产仪器提供宝贵的“练兵场”。这种在真实环境中进行的迭代测试和反馈,是任何实验室模拟都无法替代的,能够极大地加速产品的成熟与优化。

5.4 加强政策引导与金融支持

持续的政策引导和金融支持是产业发展的催化剂。一方面,应延续并扩大首台(套)重大技术装备示范应用、政府采购倾斜等行之有效的政策;另一方面,可设立专门的产业引导基金,重点投向那些具有原创性技术和高成长潜力的计量仪器初创企业,解决其在早期发展中面临的融资难题。通过政策与资本的双重驱动,营造有利于国产高端仪器茁壮成长的沃土。

6 结语

国产化计量仪器在精密检测场景中的适配性研究,不仅是技术自主可控的关键一环,更是支撑我国高端制造和前沿科研高质量发展的战略基石。面对国际巨头的技术垄断与生态壁垒,我国需以系统性思维统筹推进核心技术攻关、标准体系建设、产学研用深度融合及政策金融协同支持。通过构建“基础性能-环境适应性-应用效能-生态融合度”四位一体的适配性评价体系,可为国产仪器的研发迭代与市场推广提供科学指引。未来,唯有坚持需求牵引、问题导向和生态共建,才能真正实现从“能用”到“好用”再到“首选”的跨越,筑牢新质生产力的计量根基,为建设科技强国和制造强国提供坚实支撑。

参考文献

- [1]许瑞祥,王煦,翟恒涛,等.计量技术机构服务国产流量仪表产业发展的模式研究[J].中国计量,2026,(04):51-53+62.
- [2]市场监管总局开展首批国产仪器仪表计量测试评价工作[J].传感器世界,2024,30(07):48.
- [3]鲁安康.计量仪器的周期检定与标准化管理方法探究[C]//中国智慧工程研究会.2024工程技术与施工管理交流会论文集(下).北京科技大学工程技术研究院,2024:137-138.
- [4]王素玲.智能制造助推计量仪器行业高质量发展[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(06):128-130.