

# 计算机时代长度光学计量发展研究展望

王 艳

内蒙古自治区计量测试研究院 内蒙古 呼和浩特 010010

**摘要:** 计算机技术的深度融入正推动长度光学计量领域进入全新发展阶段。本文系统分析了计算机技术对测量原理革新、仪器智能化设计及数据处理自动化的赋能路径,探讨了纳米级测量、动态实时测量等关键技术突破。通过剖析其在先进制造、生命科学及环境监测等领域的广泛应用,识别出极端环境适配、跨尺度测量协同等发展挑战,并提出智能化转型、标准化建设等优化路径,为领域技术进步提供系统性参考。

**关键词:** 计算机技术; 长度光学计量; 测量原理; 仪器设计; 数据处理

引言: 在科技飞速发展的当下,计算机技术已深度融入各个领域,长度光学计量领域也不例外。计算机技术凭借强大的计算、分析与控制能力,为长度光学计量带来了前所未有的变革机遇。从测量原理的革新到仪器设计的智能化,再到数据处理的自动化与精准化,计算机技术正全方位重塑长度光学计量。深入研究计算机时代长度光学计量的发展,对推动相关领域技术进步具有重要意义。

## 1 计算机技术对长度光学计量的赋能路径

### 1.1 测量原理的革新

计算机技术为光学干涉与激光测量注入智能基因,推动测量原理突破传统物理限制。在激光干涉测量中,计算机通过实时采集干涉信号并分析相位变化,运用自适应控制算法动态调整激光频率与光路参数,实现相位锁定与误差补偿<sup>[1]</sup>。这一技术革新显著降低了环境振动、空气折射率波动等外部因素对测量稳定性的影响,使精密加工场景下的测量重复性指标提升至亚纳米级(具体可达到0.1-0.5纳米)。光谱干涉与光学频率梳技术的融合则依托计算机对频率梳梳齿间距与相位的精确控制,通过扩展频谱覆盖范围实现绝对距离测量的纳米级精度突破,目前可实现精度在1-5纳米的绝对距离测量。多光谱与超光谱成像技术借助计算机算法对多波段数据进行融合处理,通过解算不同波长下的表面反射特性,可重构复杂表面的三维形貌,在文物保护、生物组织检测等需要高精度表面分析的领域展现出独特优势。

### 1.2 仪器设计的智能化

计算机技术驱动光学计量仪器向智能化、模块化与微型化方向演进。嵌入式计算机与现场可编程门阵列(FPGA)的集成,使光学计量仪器具备边缘计算能力,测量数据可在仪器内部完成初步处理与特征提取,显著缩短反馈周期并降低对外部计算资源的依赖,反馈周期

可缩短至毫秒级(例如1-10毫秒)。模块化设计理念依托计算机辅助设计工具,允许用户根据测量需求快速组合光学组件,构建定制化测量系统。例如,在航空航天领域,模块化光学探头可适配不同曲率的飞行器表面检测任务,通过计算机模拟优化光路设计,提升测量效率与数据可靠性,测量效率可提升30%-50%。微型化趋势则通过微机电系统(MEMS)技术与计算机芯片的集成,将光学传感器、信号处理单元与电源管理模块集成于手持式设备中,推动计量工具从实验室走向生产现场,满足现场快速检测与便携操作需求,手持式设备重量可减轻至几百克(例如200-500克)。

### 1.3 数据处理的自动化与精准化

计算机技术为光学计量数据处理提供从信号提取到决策支持的全链条解决方案。数字信号处理(DSP)算法通过滤波、降噪与特征提取,显著提升光学信号的信噪比,为后续分析奠定基础。人工智能与机器学习技术的引入,则使误差修正、模式识别与预测分析进入智能化阶段。例如,深度学习模型可通过训练学习不同环境条件下的误差分布规律,构建非线性补偿模型,提升测量结果的鲁棒性。大数据与云计算技术构建的分布式计量数据平台,支持跨设备、跨区域的数据共享与协同分析,通过聚合多源数据挖掘潜在规律,为质量控制与工艺优化提供数据驱动的决策支持。这种自动化与精准化的数据处理模式,不仅降低了人工干预成本,更推动了光学计量从单一测量工具向智能化服务系统的转型。

## 2 计算机时代长度光学计量的关键技术突破

### 2.1 纳米级与亚纳米级测量技术

计算机技术正推动长度光学计量向纳米甚至亚纳米尺度突破,为半导体制造、量子科技等前沿领域提供关键支撑。光学超分辨率技术通过计算机算法重构光学系统点扩散函数,突破传统衍射极限对分辨率的限制。例

如,受激发射损耗显微术(STED)结合计算机实时反馈控制,可将光学显微镜的分辨率提升至20纳米以下(实际可达到10-20纳米),实现纳米级结构的三维形貌测量。量子计量基准则依托量子纠缠与压缩光技术,构建基于量子物理原理的长度基准。量子纠缠光子对的非域性特性,可消除经典测量中的环境噪声干扰,而压缩光技术通过降低光场量子噪声,使长度测量精度接近海森堡不确定原理设定的理论极限,目前量子计量基准的长度测量精度可达到飞米级( $10^{-15}$ 米量级)。这类技术已在国家计量院开展的量子基准装置中得到验证,为纳米制造提供溯源至国际单位制(SI)的绝对测量标准。

### 2.2 动态与实时测量技术

计算机控制技术赋予光学计量动态响应能力,满足工业生产对高速、实时检测的需求。高速光学采样技术通过计算机编程控制光学探头的扫描路径与数据采集频率,实现每秒数万次的高频测量,数据采集频率可达到每秒1万-10万次<sup>[2]</sup>。在半导体晶圆检测中,该技术可捕捉光刻胶涂覆过程中的微米级厚度波动,为工艺控制提供实时反馈,厚度波动检测精度可达到纳米级(0.1-1纳米)。流场与振动测量则通过计算机协调多台光学计量设备的时序与空间布局,构建分布式测量网络。例如,在航空发动机涡轮叶片振动监测中,计算机控制多台激光多普勒测振仪(LDV)从不同角度采集数据,通过数据融合算法重建叶片的瞬时形变场,为疲劳寿命评估提供依据,叶片瞬时形变场重建精度可达到微米级(1-10微米)。这类技术已应用于航天器结构健康监测,实现飞行过程中微米级位移的实时追踪,位移追踪精度可达到0.1-1微米。

### 2.3 多物理场耦合测量技术

计算机模拟与多传感器融合技术推动光学计量向复杂环境适应性发展。光-力-热耦合测量通过计算机建立多物理场相互作用模型,优化光学元件在极端环境下的性能。例如,在核反应堆内部检测中,计算机模拟高温、强辐射对光学窗口折射率的影响,设计自适应补偿算法,确保激光干涉仪在500℃环境下的测量精度,在500℃环境下测量精度可保持在纳米级(1-5纳米)。生物光学计量则结合计算机视觉与光谱分析技术,实现对生物样本的高精度无损检测。通过计算机算法提取多光谱图像中的纹理与光谱特征,可区分细胞组织的病理状态,为早期疾病诊断提供依据。这类技术已在医疗影像设备中得到应用,推动光学计量从工业领域向生命科学领域拓展。

## 3 计算机时代长度光学计量的多领域应用

### 3.1 先进制造业

在半导体制造领域,计算机辅助光学计量技术贯穿晶圆生产全流程。晶圆表面缺陷检测环节,基于计算机视觉的暗场显微系统可捕捉纳米级划痕与颗粒污染,结合深度学习算法实现缺陷分类与定位,检测速度较传统方法提升数倍,检测速度可提升3-5倍,检测精度可达到纳米级(0.1-1纳米)。光刻机对准工序中,双频激光干涉仪与计算机控制系统协同,通过实时反馈调整晶圆台位置,确保掩模版与晶圆图案的套刻精度达到2纳米以内,支撑先进制程芯片量产。航空航天领域,动态光学测量技术为飞行器设计提供关键数据。风洞试验中,高速摄影系统结合计算机图像处理,可捕捉翼型在气流作用下的微米级形变,结合流体力学仿真优化气动布局,翼型微米级形变捕捉精度可达到1-5微米。在役飞行器监测方面,光纤光栅传感器网络与计算机数据采集系统结合,实时监测机翼应力分布与结构健康状态,为飞行安全评估与维护决策提供依据,机翼应力分布监测精度可达到兆帕级(1-10兆帕)。

### 3.2 生命科学与医疗健康

眼科诊疗中,计算机控制的光学相干断层扫描技术通过弱相干光干涉原理,获取视网膜十层结构的断层图像,计算机算法可自动识别黄斑病变、青光眼等早期病理特征,诊断准确率超过90%。微创手术领域,光学定位系统与计算机辅助手术平台深度融合。近红外荧光标记技术与三维光学导航系统结合,在计算机坐标转换算法支持下,将术前影像数据与术中实时画面精准配准,引导手术器械沿规划路径操作,使神经外科、骨科等高风险手术的定位误差控制在0.5毫米以内,显著降低并发症风险。

### 3.3 环境监测与能源领域

大气环境监测方面,基于激光散射原理的光学颗粒物计数仪通过集成计算机信号处理模块,能够精准区分PM2.5、PM10等不同粒径的污染物,并结合实时气象数据与机器学习模型,实现对污染源的动态追踪与扩散趋势的精准预测,显著提升环境预警能力。在核能设施安全监测领域,计算机驱动的激光测距系统可定期扫描反应堆压力容器表面,通过高精度形变数据分析结构完整性;伽马射线光学传感器网络与计算机辐射监测系统协同联动,能够实时生成辐射剂量分布热力图,为人员安全防护与设备检修策略提供关键数据支撑。这些创新应用不仅大幅提升了环境治理的效能与精准度,也为能源行业的安全稳定运行构筑了坚实的技术防线。

### 4 长度光学计量技术的发展挑战与保障路径

#### 4.1 核心发展挑战

极端环境适配能力不足成为当前技术应用的主要瓶颈。在深空探测、极地科考等特殊场景中，超低温、强辐射、高真空环境不仅影响光学元件的物理稳定性，还会干扰计算机信号传输与数据处理精度，导致测量误差显著放大，这使得现有技术难以实现长期可靠的计量监测<sup>[3]</sup>。与此同时，跨尺度测量协同性欠缺也严重制约了复杂场景的应用效果。由于微观纳米级测量与宏观大尺寸测量的技术体系相对独立，加上计算机数据融合算法尚未形成统一标准，导致难以实现从微观结构到宏观构件的全尺度计量闭环。此外，技术转化效率偏低的问题同样不容忽视，它严重阻碍了创新价值的有效落地。实验室阶段的高精度测量技术往往受成本控制、操作复杂度等因素限制，加之计算机辅助系统的模块化与通用化设计存在明显不足，最终导致先进技术向产业应用的转化周期过长。

#### 4.2 关键发展趋势

智能化与自主化无疑将成为技术迭代的核心方向。依托人工智能与自主控制算法的持续进步，光学计量设备有望实现测量参数的自适应调整、误差的实时自主修正及异常数据的智能诊断，从而显著减少对人工经验的依赖，推动整个计量过程从“被动响应”向“主动预判”的深刻转型。与此同时，标准化与溯源体系的不断完善将极大地强化技术公信力。通过构建基于计算机技术的计量数据溯源平台，可以实现测量结果从仪器端到国际单位制的全链条精准溯源；而建立跨行业的技术标准共享机制，将进一步规范数据格式与分析方法，提升行业整体协作效率。另一方面，多学科深度融合将持续拓展技术边界。计算机模拟与光学计量的深度结合将有力推动光机电一体化发展，而与量子物理、生物医学等前沿学科的交叉融合，必将催生更多创新性计量技术与应用场景，最终打破传统计量领域的局限，开拓新的发展空间。

#### 4.3 保障体系构建

技术研发体系的持续完善是突破现有瓶颈的基础支撑。迫切需要建立“企业-高校-科研机构”高效协同的创新机制，集中力量聚焦极端环境适配、跨尺度数据融合等关键技术难题，同时加大计算机算法与光学元件一体化研发的投入力度，以期攻克核心技术难题。标准与规范的全面强化将为行业健康发展提供明确指引。应积极依托计算机网络构建能够动态更新的标准体系，明确不同应用场景下的具体计量技术要求、数据处理规范及设备校准流程，从而有效推动技术应用的标准化与规范化进程。人才培育体系的系统性构建将为领域长远发展提供坚实的智力保障。高校与职业院校需优化课程设置，加强光学工程、计算机科学与计量学的交叉教学；企业也应强化在岗人员的专业技术培训，切实提升其对先进计量设备与计算机辅助系统的操作应用能力，共同打造高水平的复合型专业人才队伍。

#### 结束语

计算机技术的赋能显著提升了长度光学计量的精度、效率与适应性，使其在多个前沿领域发挥了不可替代的作用。面对当前存在的技术挑战，需通过深化智能化研究、完善标准体系、加强跨学科融合与人才培养等综合措施持续推动技术创新。扎实的技术积累与有效的体系保障，是长度光学计量保持活力、支撑相关产业高质量发展的坚实基础。

#### 参考文献

- [1]熊玉朋,王建鹏,戴一帆,等.科教融合视角下的光学与长度计量课程建设研究[J].现代职业教育,2021(24):150-151.
- [2]黄英博.基于光缆通信传输技术的仪器设备长度远程计量校准研究[J].科技资讯,2025,23(13):129-131.
- [3]缪宜芳.三维光学测量技术在复杂工件长度检测中的应用[J].大众标准化,2024(19):179-181.