

计量测试在精密制造中的关键技术与创新探索

张 军

保定市计量测试所, 河北 保定 071000

[摘要]精密制造作为高端制造的关键指引方向,对产品的尺寸数值、形位状态以及表面质量提出极高规格,计量测试为高精度制造的实现筑牢基础,在保障产品质量、提高工艺层次以及推动智能制造进步方面意义重大,伴随制造技术朝着微纳尺度、智能化方向拓展,计量测试也有高精度、自动化与多维数据融合等趋势的呈现,就关键测量技术与前沿应用开展系统的分析,能推动制造业实现高质量增长与技术革新。

[关键词]计量测试;精密制造;关键技术;创新;质量控制

DOI: 10.33142/ucp.v2i4.17311

中图分类号: TP24

文献标识码: A

Key Technology and Innovative Exploration on Metrology Testing in Precision Manufacturing

ZHANG Jun

Baoding Metrology Testing Institute, Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract: Precision manufacturing, as a key guiding direction for high-end manufacturing, sets extremely high specifications for the size values, shape and position states, and surface quality of products. Metrology testing lay a solid foundation for the realization of high-precision manufacturing, and are of great significance in ensuring product quality, improving process levels, and promoting the progress of intelligent manufacturing. With the expansion of manufacturing technology towards micro nano scale and intelligence, there are also trends in high-precision, automation, and multidimensional data fusion in metrology testing. Systematic analysis of key measurement technologies and cutting-edge applications can promote high-quality growth and technological innovation in the manufacturing industry.

Keywords: metrology testing; precision manufacturing; key technology; innovation; quality control

引言

目前制造业正朝着高端与智能方向前行,在国防、航空航天、医疗器械等关键领域中,精密制造发挥的作用不可替代,产品结构渐趋繁多,对尺寸、性能精度的要求持续攀升,计量测试成为质量把控与精度保障的重要支撑力量,正走进技术革新的崭新阶段,国际在微纳测量、智能检测等范畴不断取得突破,国内也获得了诸多方面进展,然而系统集成、标准建设等方面依旧存有短板,围绕关键技术及创新路径展开的系统探讨,对制造水平的提升意义非凡。

1 精密制造对计量测试提出的新需求

伴随制造技术的迅猛发展与应用场景的持续拓展,精密制造给计量测试抛出了前所未有的新需求,尤其在精度、一致性、系统性以及数据智能化等方面的凸显极为明显。

1.1 高精度、高一致性的需求特征

精密制造产品存在尺寸微小、结构复杂及质量要求严苛等需求,对计量测试精度、重复性的标准要求极为苛刻,在航空航天、微电子以及医疗器械等范畴,零部件的几何精度及表面质量需限制在微米甚至纳米的级别,稍有误差便存在系统功能失效的风险,面对诸如复杂曲面、深腔结构和透明材料之类的挑战,传统测量手段,已无法胜任工

作,所以亟须引入高分辨率、非接触式并实现多维度融合的测试技术,用以实现复杂微结构的精密检测诉求。

1.2 全流程计量的系统性要求

现代制造模式正由聚焦单一环节优化迈向整体流程协同发展,计量测试还应覆盖产品从设计开始,经制造、装配到检测的全生命周期,达成从前端设计验证贯穿中间过程控制至最终质量评价的系统化衔接,在该实施过程里面,实现在线与离线测量的合理结合很关键,在线测量可达成对过程状态的实时监控及工艺调整,增进生产效率及良品比例;离线测量在精度、可追溯性等方面展现出优势,应用于最终产品的严格检验与测评,作为保障高端制造稳定输出的重要策略,系统性测试布局已就位。

1.3 多维数据与智能分析的集成化需求

测量系统不只是获取单一维度的静态数据,而是朝着多参数、实时动态、空间分布等信息的集成采集和分析方向发展,怎样从测量数据里挖掘制造流程特征、预判潜在瑕疵并优化工艺路线,成为智能制造时代计量测试的重大任务。在以数据驱动的反馈控制机制中,计量系统应具备快速响应和智能识别的能力,做到跟制造设备、控制系统的协同合作,构建一个拥有数据采集、建模、分析及决策能力的一体化智能测试平台,这成为精密制造计量体系未

来发展的核心要点。

2 关键计量测试技术的发展现状

为应对精密制造对测量精度和测量效率要求的不断提高, 计量测试技术正不断发展与突破。计量领域有三大关键技术方向, 即光学测量、微纳尺度检测以及在线与非接触式技术, 正助力现代制造从传统人工检测迈向高效、智能、自动化检测的全面升级。

2.1 光学测量技术

光学测量依靠非接触、高精度和响应迅速的优势, 普遍应用于精密零部件尺寸与表面形貌的检测, 作为一种高分辨率的光学测量器械, 白光干涉仪借助干涉的原理可实现对微米乃至纳米尺度的表面轮廓扫描, 适合对表面平整度、粗糙度开展高精度测量。共聚焦显微成像技术经获取与重建不同焦点的图像, 达成三维形貌的快速采集, 尤其适宜用于有阶梯、凹槽这类复杂几何结构样件的测量, 激光跟踪仪在大型复杂工件空间定位方面展现出卓越的精度与灵活性, 可应用于大型装备装配精度检测工作; 而传统计量的主力设备当属三坐标测量系统, 借助逐点扫描形式实现对工件几何参数的完整测量, 在机械制造和汽车工业中依然占据主导位置, 新一代光学测量技术呈现出的集成化和智能化发展走向, 推动计量设备朝着高速度、高精度与多功能聚合的方向迈进。

2.2 微纳测量技术

伴随纳米制造、微电子加工等领域的迅猛发展, 微纳尺度测量技术成为计量研究的热门聚焦点, 原子力显微镜 (AFM) 根据微小探针与样品表面间作用力的反馈, 实现纳米规模的表面轮廓扫描与粗糙度衡量, 大量应用于半导体器件、光学元件等精密产品的检测工作。其不仅拥有极高的分辨率, 还能针对样品开展无损的非破坏性测试, 扫描电子显微镜 (SEM) 凭借电子束对样品表面实施扫描, 实现微观结构的影像剖析, 在进行材料组织观察与微观缺陷分析时优势突出, 将 SEM 跟标准样本及计量校准装置组合, 能实现测量结果量值的溯源, 提高数据的可靠性质, 实际应用中, AFM 和 SEM 屡屡形成互补格局, 搭建起微纳尺度的多维测量体系, 为高端制造提供坚实有力的计量支撑。

2.3 在线测量与非接触式技术

因制造流程自动化的发展, 在线测量技术成为提升生产效率以及质量稳定性的关键节点, 在加工过程当中, 在线测量系统可实时采集工件的尺寸、形貌、温度等参数, 做到工艺状态动态管控并马上反馈调校, 尤其是在数控加工、智能产线等各类场景中, 实现了在线测量设备与数控系统的集成化, 可切实降低因偏差不断累积所引发的报废风险。非接触式测量技术利用其不用物理接触、适应迅速、适用范畴广泛等长处, 成为替代传统接触式测量的关键举措, 借助 X 射线 CT (计算机断层扫描) 技术, 无需破坏样品结构就能获取其内部缺陷、空洞及材料分布信息, 已

在高精度装配件及复合材料检测等方面普遍应用。

3 计量测试设备的智能化与自动化创新

3.1 智能传感器技术发展

智能传感器身为计量测试系统的核心前端, 正朝着高灵敏度、微型化及多功能集成化方向进化, 跟传统传感器对比, 智能传感器能实时觉察微小的变化, 还可开展初步的数据处理与状态判定, 在复杂多样的制造环境中, 具备温度补偿和自校准功能的应变传感器, 可极大提高测量的稳定性与抗干扰能力。更展现出前瞻性视角的是, 实现自感知与自诊断功能的传感器网络架构, 借助嵌入式处理单元加上无线通信功能, 可实时监测设备运行状态, 对故障风险进行预警, 增进系统自适应调控能力, 为形成“感知-决策-控制”闭环的测量体系做好了铺垫。

3.2 自动测量系统与机器人集成

伴随工业机器人与自动化技术的日益成熟, 计量测试与生产设备实现协同作业已成现实, 依靠机器人平台的自动测量系统可达成测头自动更换、工件自动校位、轨迹自主规划等功能, 极大增进了复杂场景下测量的灵活程度与适应能力, 在智能产线的范畴内, 线边所部署的移动式计量机器人, 可以快速对产品抽检, 实时记录检测结果再反馈, 实现生产节拍与质量控制的同步改良, 人机协同情境里, 柔性测量单元正逐步普及。

3.3 测量软件与系统平台升级

如今现代测量系统, 并非仅依赖硬件性能的提升, 软件与平台能力的增进正逐步成为智能化进程的核心动力源, 新一代测量软件集成了数据采集、三维建模、可视化分析等一系列功能模块, 实现测量结果自动判定与过程的溯源, 尤其是处在大数据环境里, 测量数据的拟合、异常识别与误差补偿等方面大量引入了 AI 算法, 依靠机器学习逐步优化测量模型与策略, 有效提升系统响应速度及精准水平, 平台化系统实现多设备协同互动、数据集中管理及远程调控事宜, 搭建起开放互联的计量生态格局, 为智能制造里“测量即服务”的达成提供了坚实依托。

4 标准体系建设与数据互通的技术瓶颈

计量测试是精密制造得以稳固开展的基础支撑, 其标准化和数据互通能力, 直接对测量结果的可比性、可靠性与溯源性起决定作用, 就当前而言, 我国在标准体系搭建和数据集成事宜上仍有诸多技术瓶颈, 极大地抑制了高端制造质量管理协同性及可持续发展的能力。

4.1 国家与行业标准的缺口

虽然近年来国家在高端制造计量范畴中持续加强标准化建设, 但综合整体情况看, 现有精密测量标准依旧面临制定滞后、适用性不足等难题, 难以跟上快速演变的智能制造需求步伐, 尤其在如微纳测量、非接触检测等新兴领域里, 依旧缺少系统性、可实际操作的技术标准, 导致企业在推进实施时难以形成统一规范, 不少制造企业为贴

合自身产品属性，独立制定出个性化测量标准，虽可适配于特定的工艺要求，然而各标准之间缺少相互认可的机制，拉高了产业链上下游沟通及对接的成本，拖慢了行业整体质量水平协同提升的节奏。

4.2 数据接口与测量溯源难题

现代制造系统产出的数据体量惊人、结构复杂多样，而计量设备的数据格式以及通信协议目前还未统一，导致系统集成难度提升、信息传输效率欠佳，尤其在车间里，多品牌、多类型计量设备并存的环境条件下，数据无法达成直接共享，引发信息孤岛现象极为明显。因缺少统一的数字化计量平台，测量数据溯源链条变得不完整，对产品质量追溯与问题原因的解析造成干扰，数据接口标准、测量流程文档以及质量检验记录多数采用分散管理，缺少集中式的管理及可视化手段，极大地阻碍了计量管理迈向信息化与智能化的步伐。

4.3 面向未来的标准框架探索

为打破标准桎梏与数据封闭困境，迫切需要搭建契合数字化制造要求的计量标准全新框架，“数字孪生”计量参考体系被提出，为标准系统的升级转型指明新方向，凭借建立产品与测量模型的数字映射联结，可在虚拟环境中开展测量流程的仿真操作、精度的预估工作与误差的补偿处理，实现标准的动态调控与多场景契合。需加速实现与国际主流标准体系的衔接，加强跟 ISO、IEC 等组织的交流合作，助力国内计量标准实现国际化迈进，构建标准验证实验平台及测试认证机制，也有利于对新兴测量技术与系统实施科学评估及推广应用，提升我国在全球制造标准体系内的话语权及影响力。

5 融合智能制造的计量测试前沿探索

处在智能制造不断推进的大背景下，计量测试技术正朝着网络化、智能化、服务化方向加速拓展，变成制造系统中感知及反馈方面必不可少的核心，依托工业互联网、人工智能、自适应制造等前沿技术，计量测试正开启全面智能化的新阶段。

5.1 计量与工业互联网的深度融合

依靠工业互联网平台，计量设备逐步做到网络互联、远程合作及集中统管，打开了传统设备信息封闭、运行孤立的枷锁，测量结果可马上上传至云端平台，实施集中的监控、追溯及分析，为质量管理及工艺优化给予整体的数据支撑。基于这一基础，“测量即服务”（MaaS）模式兴起势头初显，借助服务化接口把测量能力外包成可调用的资源，为企业给予按需编排、快速响应的远程测量帮扶，切实削减成本、增强灵活性。

5.2 人工智能在计量领域的应用

尤其是图像识别、深度学习技术的人工智能，为计量测试赋予强大的数据感知及处理本领，在实际运用过程中，利用 AI 可自动识别产品缺陷、异常纹理及误差模式等，大幅增进检测的效率与精准度，深度学习模型可从海量历史测量数据里挖掘出潜藏规律，实现对复杂结构测量拟合及预估，应对传统算法难以触及的非线性、多变量困境，让测量的过程增添智能、自主与可靠属性。

5.3 面向“自适应制造”的智能测试系统

智能制造重视工艺过程动态优化及实时调节，闭环控制系统正逐步接纳计量测试的嵌入。智能测试系统作为反馈的核心，驱使制造策略自动进行调校，凭借构建“测量—反馈—控制”的闭环回路，系统可实时察觉加工中的偏差，自动纠正工艺参数偏差，增进制造进程的稳定性及响应效率，尤其在多品种与小批量的生产环境里面，自适应测试系统可针对不同产品特性灵活地设定测量策略，协助实现高度柔性化的智能制造追求。

6 结束语

计量测试身为精密制造的战略基础依托，在保障产品质量、提高工艺水准、推进智能化转变中起到了无可替代的作用，面对制造业日益加剧的精度要求与复杂情形，计量技术正加速往高精度、智能化、自动化、融合化方向去发展，需着重攻克标准体系滞后、数据互通难题等关键障碍，助力智能感知、数据驱动与系统协同等技术实现深度融合，借助强化产学研的协同创新，实现技术链与应用链的衔接，带动核心技术攻坚与平台聚合，全面赋能制造业高质量发展格局。

【参考文献】

- [1]黄志军,张吉祥.精密检测服务平台助企“闯难关”江苏省泰州市计量测试院发挥技术优势为企业解难题[J].中国质量监管,2022(4):57.
- [2]云南省《〈规划〉实施意见》强调.服务高端仪器推动关键计量测试仪器国产化[J].中国计量,2022(9):87.
- [3]谭久彬,蒋庄德,雒建斌,等.高端精密装备精度测量基础理论与方法[J].中国科学基金,2022,36(6):955-962.
- [4]刘江雪.2023全国产业计量大会暨全国产业计量测试联盟成立大会侧记[J].中国计量,2023(10):6-21.
- [5]凌明.基准级齿轮渐开线样板的精密制造研究[D].大连:大连理工大学,2024.

作者简介：张军（1976.8—），男，河北省保定人，汉族，大学专科，工程师，工作单位为保定市计量测试所，从事计量管理工作。