

# 先进测量技术与高端测量仪器 ——制造大国迈向制造强国的基础与保障

杨树明, 刘涛, 蒋庄德, 杨晓凯, 赵楠, 王通, 张国锋, 刘强

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049

**摘要** 先进测量技术与高端测量仪器在科学研究、工业生产和医疗等众多领域获得广泛应用,也是中国实现从制造大国向制造强国转变的基础和保障。本文介绍了高端测量仪器产业的背景及需求,分析了目前中国高端测量仪器发展的现状及存在问题,阐述了典型测量技术的进展,并探讨了先进测量技术的发展趋势和高端测量仪器产业化发展途径。

**关键词** 制造与测量;先进测量技术;高端测量仪器

2015年5月,国务院印发《中国制造2025》,其战略目标是将中国从制造大国转变为制造强国<sup>[1]</sup>。计量测试是制造的基础,随着中国制造质量的提升、制造精度的提高以及制造功能的扩展,计量测试的基础作用、先导作用将更加突显,要成为制造强国,计量测试技术必须走在中国制造的最前沿<sup>[2]</sup>。2016年5月,国务院印发《国家创新驱动发展战略纲要》,其战略任务是要求建设一批支撑高水平创新的基础设施和平台,研发高端科研仪器设备,提高科研装备自给水平。中国制造强国战略和创新驱动发展战略都对高端测量仪器产业发展提出了新要求,先进测量技术与高端测量仪器为实现制造强国和质量为先目标提供根本保障。

《中国制造2025》强调,坚持“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”的基本方针,实施五大工程,即制造业创新中心建设工程、强化基础工程、智能制造工程、绿色制造工程、高端装备创新工程,最终实现从制造业大国向制造业强国转变这一宏伟目标。《国家创新驱动发展战略纲要》也要求“研发高端科研仪器设备,提高科研

装备自给水平”。因此,高端测量仪器产业发展是时代所需,是创新驱动的战略任务,更是中国从制造大国向制造强国转变的基础与保障。

先进测量技术指在一定时期内,用顶尖或先进的科学手段测量某一事物相关的方法。高端测量仪器是指在同类产品中原理和技术先进、工艺精度要求高、结构复杂、集成性高、可靠性好、常规仪器不可替代的测量仪器。先进测量技术往往和高端测量仪器有着密切的联系。高端测量仪器已经与科研、工业、民生、军事和国防等诸多方面息息相关。

## 1 高端测量仪器产业现状

### 1.1 高端测量仪器产业背景与需求

#### 1) 测量与科学研究。

俄罗斯化学家门捷列夫认为,“没有测量,便没有科学。”英国物理学家瑞利从化学提纯的氮和空气中的氮密度千分之几的微小差别中,推断出氩气的存在,在元素周期表中填补了惰性元素一族的空白。测量科学的先驱开尔文说,一个事物你如果能够测量它,并且能够用数字表示它,说明你对它就有了

深刻的了解;但你如果不知道如何测量它,且不能用数字表示它,那么你的知识可能是贫瘠的,是不令人满意的。可见,测量是深刻认识事物的基础。

诺贝尔奖是科学界的最高荣誉,自颁发以来,已经有相衬显微镜、X射线断层扫描仪(CT)、高分辨率激光光谱仪、透射电子显微镜、扫描隧道显微镜、核磁共振技术和高分辨率荧光显微技术等一系列测量仪器或技术获得诺贝尔奖,足以说明测量在科学研究中的重要地位。

#### 2) 测量与工业生产。

工业是国民经济的重要支柱,而精密加工制造业技术含量高,同时国外对相关技术及设备出口实行垄断控制,需要投入大量人力和物力进行研究开发<sup>[3]</sup>。精密加工在工业发展中具有重要地位,直接影响国家尖端技术和国防工业的发展。

近年来,随着高精密仪器仪表、光学和激光等技术的迅猛发展和广泛应用,对精密加工制造的设备需求也越来越大,同时精密制造业的经营结构和产品结构也在逐步发生变化。高精密检测仪器可以更好的为精密加工业提供

收稿日期:2016-08-15;修回日期:2016-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51575440)

作者简介:杨树明,教授,研究方向为微纳制造及测量、光学测量技术及仪器,电子信箱:shuming.yang@mail.xjtu.edu.cn

引用格式:杨树明,刘涛,蒋庄德,等.先进测量技术与高端测量仪器——制造大国迈向制造强国的基础与保障[J].科技导报,2016,34(17):19-24;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.17.003

质量保证。测量在一定程度上可以认为是加工的极限,精密加工制造需要高精度测量设备的支撑。因此,测量技术的进步也必将促进精密制造业的发展。

### 3) 测量与医疗健康。

随着医学科学的进步,医学影像检查为临床提供了先进的诊疗方法,如X光、CT、核磁共振等。核磁共振主要用于发现软组织疾病,其成像非常清晰精细,大大提高了医生的诊断效率。

生物学的发展对高端仪器的要求越来越高,在研究生物学机理时,要求研究人员快速直观的观察整个生命化学过程,因此高分辨荧光显微镜等设备的发明使得可在细胞分子水平以更高的分辨率来研究生物物理化学机理。精准医疗作为战略新兴产业纳入了“十三五”规划,相关仪器及其产业的发展作为精准医疗的重要技术支撑手段必将备受关注。

## 1.2 中国高端测量仪器产业现状及存在问题

中国许多领域高端测量仪器主要依赖进口。根据国家统计局数据,2012—2014年,每年从国外进口的先进仪器设备价值近6000亿元,其中高端科学仪器和医疗器械总额约1000亿元,2010—2012年的年增长率约30%,而其中具有尖端技术或涉及国家安全的仪器设备还被禁止进入中国市场<sup>[4]</sup>。2012年以后,高端测量仪器进口额增长速度有所减慢。

高端测量仪器主要依赖进口,少数国产高端测量仪器和中低端测量仪器也存在一定差距<sup>[5-6]</sup>,主要表现为:仪器的稳定性和可靠性较差,国产仪器的平均无故障运行时间要比国外主要仪器厂家的产品低1~2个数量级;个别类型的仪器性能较差,标称精度不符合实际;国产仪器技术更新周期长。

存在问题的原因是多方面的,总体上可从技术层面和非技术层面分析。

从技术层面看:一是缺乏自主创新,大部分高端测量仪器或关键零部件依赖进口,没有自主知识产权,原始创新仪器几乎没有。如超精密压电陶瓷纳米位移设备,一直由德国PI公司垄

断。二是原材料物理化学性能达不到制作工艺要求,如高端光学玻璃。三是创新成果工程化、产业化转化吃力,产学研没有形成良性循环。

从非技术层面看:中国工业基础薄弱直接制约了高端技术产品的研发。长期忽视工业标准和质量标准建设和监管,工业质量标准和监管的缺失导致基础工业产品质量和可靠性不高,高端测量仪器的工业体系、标准指标和评价体系不健全。产学研一体化未形成良性循环,巨大的高新技术科研投入得不到产品实现。在高端测量仪器产业,企业创新的主体地位树立不牢,在市场经济条件下因竞争导致企业研发注重“短平快”效应,而不顾及长远利益。

## 2 先进测量技术及研究进展

高端测量仪器一般依赖于某种先进测量原理、工艺或算法等,以实现高精度和准确度、高稳定性、高可靠性等目标。按测量时被测表面与计量器具的测头是否接触可分为接触式和非接触式。工业上常用的接触式测量方法主要包括有三坐标测量机和扫描探针显微技术。非接触式测量方法分为超声波测量、电磁测量、光学测量等。由于光学测量以其非接触、高效率、高精度、可溯源和易于实现自动化的特点,长期以来一直是测量技术研究的热点。光学测量又可分为相干和非相干

两类。图1为测量方法分类树状图,本文对图中红色字体的测量技术作简要介绍。

### 2.1 扫描探针显微技术

扫描探针显微技术指利用探针与样品间的不同作用原理探测物体表面相关性质的方法。扫描隧道显微镜(scanning tunnel microscope, STM)和原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)等,统称为扫描探针显微镜(scanning probe microscope, SPM)。SPM是最前沿的纳米测量技术之一<sup>[7]</sup>。

AFM是SPM中的典型代表,是一种可用于研究包括绝缘体在内的固体材料表面结构的分析仪器。AFM基本原理如图2所示,它通过检测待测样品表面和一个微型力敏感元件之间的极微弱的原子间相互作用力研究物质的表面结构及性质<sup>[8-9]</sup>。将一对微弱力极其敏感的微悬臂一端固定,另一端的微小针尖接近样品,这时针尖将与样品相互作用,作用力将使得微悬臂发生形变或运动状态发生变化。扫描样品时,利用传感器检测这些变化,就可获得作用力分布信息,从而以纳米级分辨率获得表面形貌结构信息及表面粗糙度信息。

近年来,在AFM基础上各种扫描力显微术发展很快,主要有静电力、摩擦力、磁力、剪切力等显微术,可以分别应用于非导体、磁性物质甚至有机生物体等表面的纳米级测量。

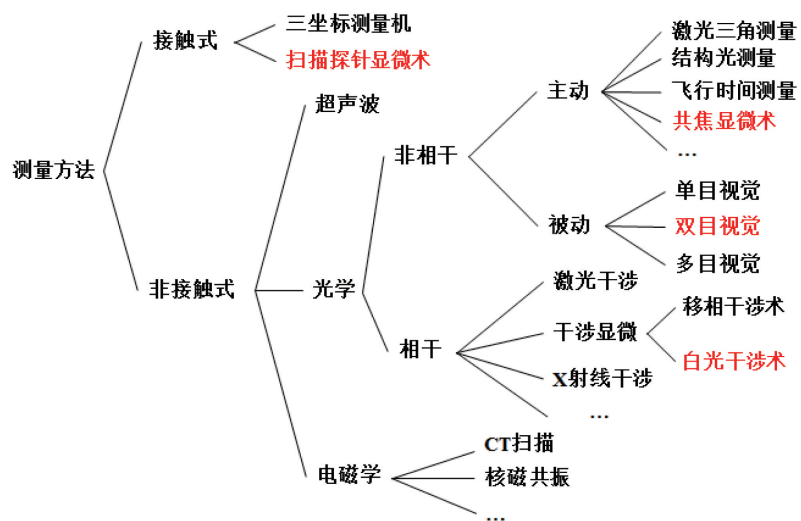


图1 测量方法分类树状图

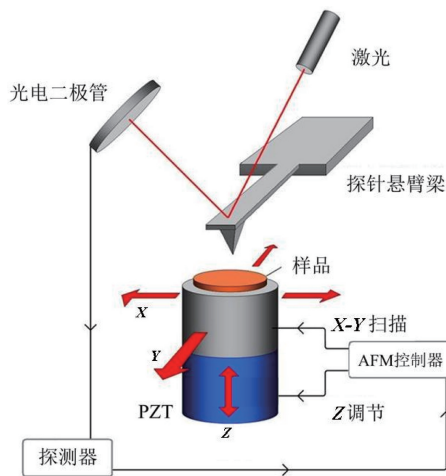


图2 AFM原理示意

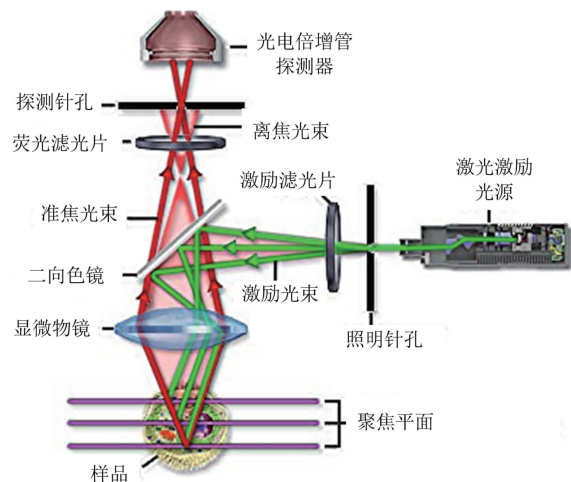


图3 激光扫描荧光共焦显微成像原理

## 2.2 共焦显微成像及测量技术

共焦显微镜(confocal microscope)基本装置于20世纪50年代中后期由美国哈佛大学M. Minsky研制,并于1957年申请了美国发明专利。

图3所示为激光扫描荧光共焦显微成像基本原理<sup>[10]</sup>,激光束经照明针孔形成点光源照明样品的一个微小区域,被照明区域发出的辐射/散射光,经探测针孔滤波成像,通过逐点扫描合成一幅完整的层析图像。由于是点扫描共轭聚焦成像,对离焦像场进行了有效抑制,因而共焦显微镜克服了普通显微镜图像模糊的缺点<sup>[11-12]</sup>。

共焦显微镜采用点照明、点扫描、点探测,实现三点共轭聚焦成像,具有高横向分辨率和轴向光学层析能力,因而成为20世纪显微光学领域所取得的最重大的发明之一。共焦显微技术目前已经广泛应用于生物医学、工业检测、精密工程和材料科学等。

## 2.3 双目视觉测量技术

双目视觉是模拟人类视觉原理,使用计算机被动感知距离的一种测量方法。从两个点观察一个物体,获取不同视角下的图像,根据图像之间像素的匹配关系,通过三角测量原理计算出像素之间的偏移获取物体三维信息<sup>[13]</sup>。

双目立体视觉的开创性工作始于20世纪的60年代中期。美国麻省理工学院的Roberts通过从数字图像中提取立方体、楔形体和棱柱体等简单规则多

面体的三维结构,并对物体的形状和空间关系进行描述,把过去的简单二维图像分析推广到了复杂的三维场景,标志着立体视觉技术的诞生。特别是20世纪80年代初,Marr首次将图像处理、心理物理学、神经生理学和临床精神病学的研究成果从信息处理的角度进行概括,创立了视觉计算理论框架。

双目视觉的关键技术在于双目相机标定、特征点提取和立体匹配。双目相机需要对单相机进行标定,以确定其畸变系数、相机内参矩阵等。然后利用已知世界坐标系(标定板)和图像坐标系(对标定板图像处理结果)的对应关系,计算出双目相机在当前位置关系下的参数信息。特征检测需要将感兴趣的物体特征分割出来,通过点云匹配和三角计算得到物体的三维坐标,然后进行各种几何形貌的测量。广泛应用于机器人导航、3D场景重建、逆向工程测量和复杂形貌测量。

## 2.4 白光干涉测量技术

与激光干涉测量技术相比,白光干涉测量技术(white light interferometry, WLI)能够以极高的轴向分辨率实现并行光学层析测量。图4为白光干涉扫描测量系统<sup>[14]</sup>,其基本原理是:来自光源的光经过分光镜后分成两束,一束被参考面反射,另一束被待测表面反射,两束光最终在探测面会聚干涉,显微镜将待测件表面的形貌起伏转化为干涉条纹信号,通过对干涉条纹提取重构待

测表面三维形貌<sup>[15-16]</sup>。

普通相移干涉测量,要求表面形貌起伏变化小于1/4波长,因此为了克服相位不确定性问题,需要进行相位解包裹等,而白光干涉测量法从内在原理上克服了普通干涉显微技术相位不确定性问题。白光干涉测量技术是一种重要的光学测量方法,可用于光纤传感技术、光纤色散测量、表面形貌测量、膜厚测量、精确定位等。

## 3 先进测量技术应用及趋势

先进测量技术的应用涉及众多领域,以下介绍以先进测量技术为核心多种测量手段融合的柔性测量、以加工制造和测量相互反馈的在线测量、以微小化集成化测量复杂环境的机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)测量。

### 3.1 柔性测量

柔性测量是指由于某种测量方法在实际测量过程中存在约束和限制,需要结合其他一种或多种测量方法和技术,实现灵活(柔性)智能的测量<sup>[17]</sup>。

随着先进制造技术的不断发展,测量对象越来越复杂,对测量系统的精度和效率、柔性和自动化水平的要求也在不断地提高。对于具有复杂特征或极限尺寸的物体,利用单一传感器难以精确、快速、完整地获取其几何尺寸和形貌特征。因此现代测量系统需要结合多种类型的测量传感器,形成功能互

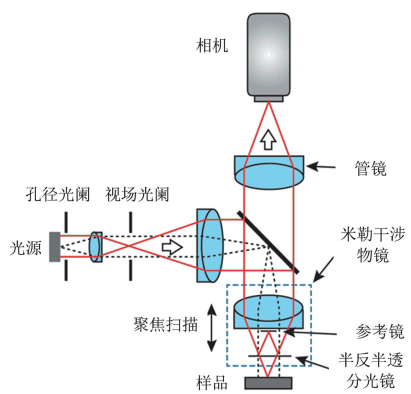


图4 白光干涉扫描测量系统光路

补,以满足测量的实际需求。如将视觉传感器和激光测头安装到三坐标测量机上,实现自适应测量路径规划,可有效提高自由曲面接触式数字化测量的效率和精度<sup>[18]</sup>。图5为融合多种测量方法的复合式飞机轮廓测量示意。

### 3.2 在线测量

在工业生产领域,包含曲面的工业部件非常多,其设计与在位、在线视觉测量越来越受到重视。快速、准确地对这些复杂曲面部件进行三维测量,不仅可以缩短生产周期,还能及时对产品生产加工过程进行反馈,提高加工精度,对数字化制造有着无可替代的作用。

发展闭环反馈式测量技术,实现测量和加工控制的一体化成为趋势。机械制造在线测量具有快速高效、实时性强、高可靠性和抗干扰能力强等特点,在闭环控制情况下进行误差补偿,使加工质量得到保证<sup>[19]</sup>。目前,机床的误差补偿已由机构误差和简单热变形误差向处理动态误差和比较复杂的热变形误差方向发展。在高精度和超精度加工中,实时补偿对加工质量的提升有很大作用<sup>[20]</sup>。

### 3.3 MEMS多传感测量

20世纪60年代,在硅集成电路制造技术发明后不久,研究人员就想利用这些制造技术和利用硅很好的机械特性制造微型机械部件,如微传感器、微执行器等。如果把微电子器件同微机械部件集成在同一块硅片上,就是微机电系统(MEMS)。一般来说,MEMS采用微电子批量加工工艺制造,是集微型

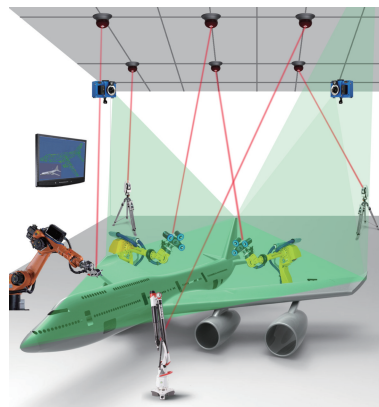


图5 复合式飞机轮廓测量示意

机构、微型传感器和微型执行器于一体具有信号感知、处理和执行能力的微型系统<sup>[21]</sup>。图6为一种天气监测系统MEMS芯片图,4个不同物理量的传感器集成在同一芯片上<sup>[22]</sup>。

与一般传感器相比, MEMS传感器具有体积小、质量轻、成本和功耗低、适应性强、适于批量生产、易于集成和实现智能化等优点<sup>[23]</sup>。微米量级的特征尺寸使其可以完成某些传统机械传感器不能实现的功能,而且适应工作于各种极端环境,比如高位高压环境测量。

## 4 先进测量技术发展趋势

先进测量技术的发展包括:计量基础前沿研究、精密/超精密测量与极端条件测量、通用化与标准化发展、测量活动的服务化等。

### 4.1 计量基础前沿研究

计量对科技具有很强的引领和促进作用,如果没有计量测试技术的创新与发展,没有计量测试所提供的准确、可靠、一致、有效的数据,很难提出创新的思路,也很难验证创新的成果<sup>[24]</sup>。

近现代,三次工业革命历程一次又一次证明了计量测试与科技发展密不可分的关系。计量朝着高精度发展,促进了纳米技术、微电子技术、航天技术等现代科技的突飞猛进<sup>[5]</sup>。原子能、生物、超导、半导体、电子计算机、激光和遥感等新技术的广泛应用,使计量技术日趋现代化,计量的宏观实物基准逐步向量子基准过渡。而新技术又带给计量更加广阔的发展空间。

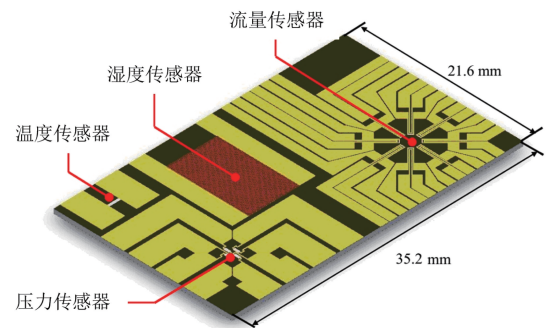


图6 天气监测系统MEMS芯片

### 4.2 精密/超精密测量与极端条件测量需求不断增加

机械加工精度要求的提高,势必推动测量技术的发展。大型发电设备和航空航天机械系统等装备的开发,导致测量范围从微观到宏观的尺寸不断扩大<sup>[25]</sup>。极端测量还表现在测量对象的复杂化和测量条件的极端化。在现代制造系统中,部分测量问题出现测量对象复杂化、测试条件极端化的趋势。如需要在高温、高压、高速、高危场合进行测量,这些需求使得测量技术要适应环境的极端化。

### 4.3 通用化与标准化发展趋势

为便于获取和传输信息,实现系统维护与升级,现代测量仪器的通用化、标准化设计十分重要<sup>[26-27]</sup>。目前仪器零部件、接口类型及尺寸较多,随着高端测量仪器的发展,需要在国内甚至全球范围制定通用零部件、接口及总线系统标准,规范及引导其设计和生产,便于仪器系统的组建、互换、更改和连结等。

采用通用化、标准化设计和制造,高端测量仪器将易于实现零部件互换和组合,统一的接口易实现分散和大范围联网。当不需要使用整个检测系统工作,而仅需单一目标检测时,可单独使用系统中的某个智能部件;当观测多目标时,可将许多智能部件连结成大型智能测量系统,也可将多个大型智能测量系统联网,组成巨型智能测量网络。

### 4.4 测量活动的服务化

当测量系统实现网络化以后,仪器资源的应用将得到很大延伸。当前蓬

勃发展的物联网、云计算、并行计算、深度学习等网络和智能信息处理手段的应用将成为测量技术的一个发展方向,面向服务的体系结构在测量系统中的应用使得测量活动以一种服务的形式呈现<sup>[28-29]</sup>,其请求和结果在网络中进行共享。测量活动的服务化,即测量活动从传统的制造、控制和测量活动的非现场事后测试,进入制造现场并参与制造过程,实现在线测量,促进制造系统的集成化与智能化,为现代集成制造系统奠定技术基础。

## 5 高端测量仪器产业化发展途径

从国家层面来说,要加强基础工业建设,在原材料和加工工艺方面要解决相关产品依赖进口的问题,补齐原材料和加工工艺这两块短板;制定相关国家标准体系;弘扬大国工匠精神,加强高素质技术工人的培养。从企业的层面来说要抓住产业机遇<sup>[4,30]</sup>,在关键核心部件的研发上有所突破,并把创新成果进行工程化和产业化。

### 1) 加强基础工业建设。

中国的工业起步比西方发达国家晚了很长时间,工业基础相对薄弱。工业的基础是材料,材料是底层,零部件是中层,设计是上层,研发的一切活动都深深依赖材料和制造工艺。从硬件角度看,首先得有材料,这些材料大多

指非天然的人工合成材料,然后要有材料加工和成型的工具,比如高精尖的机床、模具等。薄弱的材料研发和制造工艺严重限制了上层设计能力。

### 2) 制定和完善先进测量相关标准。

高端测量仪器往往都涉及一些新的领域,相关的标准并未建立,要及时制定标准,规范设计、制造和测量过程。例如,随着各种镀膜和表面沉积工艺的不断发展和,纳米级薄膜镀层广泛应用于微电子、光学及金属工业等领域,对纳米尺度上薄膜/薄层的测量提出了更高的要求<sup>[31-32]</sup>。纳米膜厚薄层标准物质的研制为台阶仪和椭圆仪等薄膜测量仪器提供了校准标尺。中国目前自主研发的厚度标准物质较少,在各种表面分析仪器的使用过程中多采用没有经过认证的商业化物质。标准物质的研制、计量检定规程和测量方法标准都有待完善。

### 3) 弘扬大国工匠精神。

在2016年3月5日召开的第十二届全国人民代表大会第四次会议上,李克强总理在政府工作报告中要求“培育精益求精的工匠精神”,这为中国各行业提升产品和服务质量、打造大国工匠指明了方向,明确了要求,表明“工匠精神”应该成为“中国制造”的内支撑<sup>[33]</sup>。

### 4) 突破关键核心部件研发。

核心基础零部件有很多,如精密位置传感器、新型质谱离子源、精密光栅、精密微量注射泵、超高温温度和压力传感器等。

核心部件的研发要坚持政府引导、企业主导,立足当前、着眼长远,整体推进、重点突破的原则,以关键核心技术和部件的自主研发为突破口,聚焦高端通用科学仪器设备和专业重大科学仪器设备的仪器开发、应用开发、工程化开发和产业化开发,带动科学仪器系统集成创新。攻克元部件、探测器与传感器、分析分离与控制部件等科学仪器核心部件研发关键技术,研究部件的核心关键材料以及生产工艺,形成具有自主知识产权、质量可靠的核心关键部件。

### 5) 产业化创新成果。

国家“重大科学仪器设备开发”重点专项强调了创新成果工程化、产业化的模式,构建“仪器原理验证→关键技术(软硬件)研发→系统集成→应用示范→产业化”的国家科学仪器开发链条,完善产学研用融合、协同创新发展的成果转化与合作模式,激发行业、企业活力和创造力。强化技术创新和产品可靠性、稳定性实验,引入重要用户应用示范、拓展产品应用领域,大幅提升中国科学仪器行业可持续发展能力和核心竞争力。

## 参考文献(References)

- [1] “制造强国战略研究”综合组. 实现从制造大国到制造强国的跨越[J]. 中国工程科学, 2015(7): 1-6.
- [2] 马爱文. 计量测试技术必须走在中国制造的前列[J]. 工业计量, 2016(2): 1-4.
- [3] 董吉洪. 精密和超精密加工机床的现状与发展对策[J]. 光机电信息, 2010, 27(10): 1-9.
- [4] 我国设立专项资金助力高端仪器科研突围[EB/OL]. [2013-08-16]. <http://www.eepw.com.cn/article/159055.html>.
- [5] 夏虹. 提升国产分析仪器技术水平需要全面努力[J]. 中国仪器仪表, 2007(8): 33-36.
- [6] 叶声华, 秦树人. 现代测试计量技术及仪器的发展[J]. 中国测试, 2009, 35(2): 1-6.
- [7] 荣烈润. 纳米测量技术的现在与未来[J]. 金属加工(冷加工), 2013(8): 75-79.
- [8] 张舒阳, 沈悦. 基于自相关的AFM快速成像[J]. 中国新通信, 2013(19): 51-52.
- [9] Department of Pharmacology, University of Virginia School of Medicine. Atomic force microscope (AFM)[EB/OL]. <https://pharm.virginia.edu/facilities/atomic-force-microscope-afm/>.
- [10] Olympus Corporation. Introduction to confocal microscopy[EB/OL]. [2016-08-03]. <http://www.olympusmicro.com/primer/techniques/confocal/confocalintro.html>.
- [11] 谭久彬, 刘涛, 刘俭. 三维高分辨率共焦显微成像与测量技术理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.
- [12] 章永登. 三维超分辨率显微成像系统、定位算法以及荧光蛋白的开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [13] 魏锋. 立体视觉在准双曲面齿轮接触区检测中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [14] Zygo Corporation. Interferometry: Measuring with light[EB/OL]. [2016-08-03]. <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25128>.
- [15] 苑立波. 光纤白光干涉技术的回顾与展望[J]. 光学学报, 2011(9): 322-334.

- [16] 李娟. 白光显微干涉表面形貌三维测量系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [17] 杨树明, 张国锋. 柔性测量方法及其发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016(8): 16-20.
- [18] Lu K, Wang W. A multi-sensor approach for rapid and precise digitization of free-form surface in reverse engineering[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(9): 1-12.
- [19] 裘祖荣, 石照耀, 李岩. 机械制造领域测量技术的发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 1-11.
- [20] Schwenke H, Knapp W, Haitjema H, et al. Geometric error measurement and compensation of machines[J]. Annals of the CIRP, 2008, 57(2): 660-675.
- [21] 王全龙. 试探机电一体化技术的应用[J]. 新疆有色金属, 2010, 33(6): 54-55.
- [22] Ma R H, Wang Y H, Lee C Y. Wireless remote weather monitoring system based on MEMS technologies[J]. Sensors, 2011, 11(3): 2715-2727.
- [23] 樊建勋. MEMS传感器及其在航空领域的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2014(4): 259-260.
- [24] 张士宏. 新理论、新原理、新方法、新工艺、新软件……N种新, 要用于解决实际问题[J]. 大学生, 2014(18): 70-71.
- [25] 殷国富, 杨杰斌, 赵雪峰, 等. 面向现代制造的先进测试技术及其发展趋势[J]. 中国测试, 2010, 36(1): 1-8.
- [26] 滕召胜. 现代计量测试仪器的特点与发展方向[J]. 计量技术, 2001, 1(2): 12-15.
- [27] 李宏校. 现代计量测试仪器的特点与发展方向[J]. 中国新技术新产品, 2015(22): 90.
- [28] 李智涛, 谭巧, 王建军. 一种面向服务架构的网络测量系统[C]//中国仪器仪表学会. 第九届全国信息获取与处理学术会议论文集II. 丹东: 中国仪器仪表学会, 2011: 4.
- [29] 鲍冬梅. 云服务质量度和测量方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [30] 2014年高端测量仪器和检测服务业迎新机遇[EB/OL]. [2014-08-18]. [http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_a0b40d200102uza7.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_a0b40d200102uza7.html).
- [31] 傅志强, 郭俊诚, 贺翠翠, 等. 扫描电镜纳米尺度测量的标准化研究[J]. 标准科学, 2012(3): 32-35.
- [32] 王梅玲, 关铨灏, 王海, 等. 纳米标准物质研究进展[J]. 化学试剂, 2014, 36(9): 819-823.
- [33] 罗世威. 践行“工匠精神”争做大国工匠[J]. 企业文明, 2016(7): 32-33.

## Advanced measurement technology and instrumentation: A country approach from big manufacturer to powerful manufacturer

YANG Shuming, LIU Tao, JIANG Zhuangde, YANG Xiaokai, ZHAO Nan, WANG Tong,  
ZHANG Guofeng, LIU Qiang

State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

**Abstract** Advanced measurement technology and instrumentation is of great significance in many areas, such as scientific research, industry, medical treatment, etc. It is the base for a country to transfer from a big manufacturer to a powerful one. This article summarizes the background and need of high-end measurement instruments, analyzing current problems and advanced measurement techniques. Finally, it discusses the development trend of advanced measurement technology and instrumentation.

**Keywords** manufacture and measurement; advanced measurement technology; high-end measurement instrument

(编辑 傅雪)