

激光与光电子学进展

机械测试理论与技术研究:现状、趋势及展望

叶鑫^{1*}, 刘世元², 郝继贵³, 黄志权^{1,4}, 朱金龙², 赖一楠¹, 苗鸿雁¹, 王岐东¹

¹国家自然科学基金委员会工程与材料科学学部, 北京 100083;

²华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;

³天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300392;

⁴太原理工大学机械工程学院, 山西 太原 030024

摘要 机械测试理论与技术是获取机械物理信息的主要途径,是推动工业生产和制造技术进步的“倍增器”。随着我国从“资本密集型、劳动密集型”产业逐步向“知识密集型”产业升级,以集成电路、航空航天、高速轨道交通、新能源汽车为代表的战略性新兴产业与高技术制造业正成为未来十年我国制造业升级的重点领域。如何完整而精确地获取高性能装备运行过程中的服役状态以及如何实时而全面地获取产品制造过程中的形性参数,是保证制造装备与制造过程实现“高性能”、“高效率”的关键所在。开展了科学基金资助情况统计和文献分析,从精密测量、纳米测量与量子测量3个维度综合分析了本领域的代表性进展、研究热点与发展趋势,总结了面向高性能制造的机械测试重要理论、核心方法与关键技术进展,探讨了所面临的关键挑战,凝练了未来5~10年的重大科学问题。

关键词 机械测试理论与技术; 先进制造; 精密测量; 纳米测量; 量子测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223241

Mechanical Testing Theory and Technology: Present Situation, Trends, and Prospects

Ye Xin^{1*}, Liu Shiyuan², Zhu Jigui³, Huang Zhiquan^{1,4}, Zhu Jinlong², Lai Yinan¹,
Miao Hongyan¹, Wang Qidong¹

¹Department of Engineering and Material Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100083, China;

²School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

³School of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300392, China;

⁴School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China

Abstract Mechanical measurement theory and technology is the main process to obtain mechanical physical information, and the booster to promote the progress of industrial production and manufacturing technology. With China's gradual upgrade from capital- and labor-intensive industries to knowledge-intensive industries, strategic emerging and high-tech manufacturing industries, such as integrated circuits, aerospace, high-speed railway transportation, and new energy vehicles, are becoming key areas for the next decade. To achieve high-performance and high-efficiency manufacturing equipment and processes, it is necessary to comprehensively obtain the service status of high-performance equipment in the operation process and the shape and performance parameters in the product manufacturing process in real time. Hence, this study conducts statistics and literature analyses on funded projects of National Natural Science Foundation of China and comprehensively analyzes the representative progress, research hotspots, and development trends in this field from three dimensions: precision, nano, and quantum measurements. Furthermore, it summarizes important theories, core methods, and key technology progress of mechanical measurements for high-performance manufacturing, discusses the key challenges, and clarifies the major scientific problems for the next 5–10 years.

Key words mechanical measurement theory and technology; advanced manufacturing; precision measurement; nano measurement; quantum measurement

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2022-12-30; 录用日期: 2023-01-04; 网络首发日期: 2023-01-14

通信作者: *yexin@nsfc.gov.cn

1 引言

机械测试理论与技术以计量标准理论、测试理论、方法、传感技术及器件、测试仪器系统等内容为主体,综合运用材料、控制、信息等多学科领域最新成果,研究机械信息的高效获取方法与技术,构建高性能仪器设备,是定量机械科学研究、精准制造过程控制和可靠服役性能维护的基础。机械测试是机械学科的 3 个重要组成部分之一:设计是前提、制造是基础、测量是关键;机械测试是机械设计的量化工具,是机械制造的眼睛。在国际竞争格局发生深刻变化、国内高质量发展提出新要求的背景下^[1-3],机械测试理论与技术正逐步摒弃传统单一、辅助的功能模式,从被动为机械学科提供测试服务,转变为主动创新测量方法技术,推动制造技术进步,特别是在以光刻机为代表的各类高端装备中,机械测试理论与技术更是贯穿设计、制造与服役的全过程,起到了信息赋能的融合与推动作用。

机械测试领域研究,在技术及仪器设备层面的科学性与专业性使其成为与制造系统深度融合集成、保障制造工艺优化、产品性能提升的关键;在原理方法基础层面的交叉性和前沿性使其兼具“非对称”赶超优势,特别是新一代量子基标准体系下的计量测试原理方法和溯源技术、智能制造环境状态感知等问题有望成为在该领域弯道超车的重点^[4-8]。

本文通过自然科学基金资助情况统计及国内外文献检索,综合分析了本领域的代表性进展、研究热点与发展趋势,为本领域的科研工作者提供参考。

2 自然科学基金项目资助分析及研究进展

2.1 面上/青年/地区项目

36 年来(1987 年—2022 年),机械测试理论与技术领域申请国家自然科学基金面上/青年/地区项目总数为 6423 项,在机械设计与制造学科(E05)申请总数中的占比为 7.09%,但平均资助率却达到了 21.52%,高出 E05 平均资助率 1.1 个百分点,且面上项目和青年科学基金项目申请总数及获资助项目数排前 5 名的依托单位完全一致,如图 1 所示,哈尔滨工业大学的资助率最高(高达 44.32%),合肥工业大学申请量最高但资助率在前 5 名高校中最低。地区科学基金项目申请量和获资助项目数前 5 名的依托单位相同,分别是南昌航空大学、华东交通大学、昆明理工大学、桂林电子科技大学、南昌大学。

2.2 重要人才类项目的资助情况

自 1994 年国家杰出青年科学基金项目(以下简称杰青项目)和 2012 年优秀青年科学基金项目(以下简称优青项目)设立至今,机械测试理论与技术领域共有 88 人申请杰青项目,11 人获得资助,平均资助率为 12.5%,高于 E05 平均资助率(10.03%),获资助人数

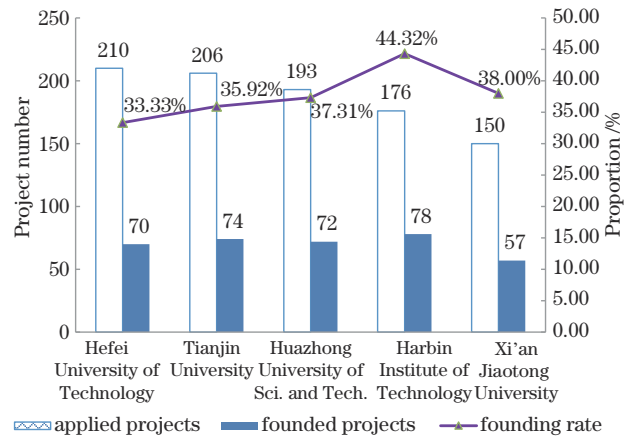


图 1 机械测试领域面上和青年基金项目申请及资助前 5 名依托单位情况(1987 年—2022 年)

Fig. 1 Top 5 applied and funded institution for NSFC general and youth program in mechanical testing field (1987-2022)

占 E05 总资助人数(118 名)的 9.32%;共有 86 人申请优青项目,8 人获得资助,平均资助率为 9.3%,基本与 E05 的平均资助率(9.32%)持平,获资助人数占 E05 总资助人数(126 名)的 6.35%。申请与资助情况,如图 2 所示。人才类项目有 2 个特点:

1) 面向制造强国战略,突破装备重大需求。获资助人才类项目背景主要面向高端精密装备几何量超精密测量所需的新型测量原理、方法、技术及仪器研究,研究方向主要集中在精密与超精密测量、机械传感与测量、微纳结构测量、在线/原位测量等方向的理论、方法与器件等。这些方向瞄准了高端精密装备和高性能制造过程,是实现我国重大装备“上水平”、制造过程“高性能”、服役状态“恒保持”的关键。如北京航空航天大学张广军教授研制的载人飞船二氧化碳分压传感器随“神舟一号”和“神舟二号”成功发射;华中科技大学刘世元教授提出了纳米结构椭圆偏振计算测量新原理,创新研制出宽光谱穆勒矩阵椭圆仪、高分辨成像椭圆仪、超快椭圆仪等三类仪器,膜厚重复测量精度为 0.002 nm(目前国际最高水平),广泛应用于集成电路

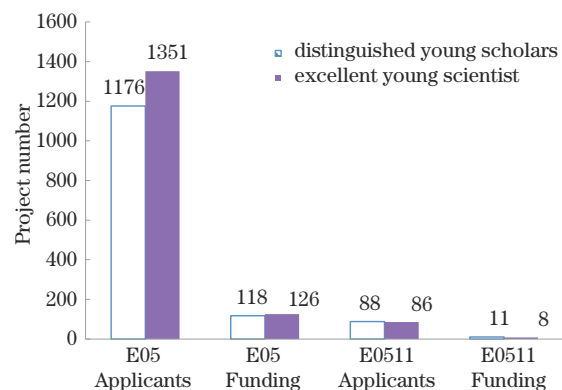


图 2 机械测试理论与技术重要人才类项目申请及资助情况
Fig. 2 Application and funding of important talents program of mechanical testing theory and technology

(IC)纳米结构、新型二维材料、极端超快过程等测量表征,实现了高端椭圆仪成果转化与产业化,开发的 IC 膜厚/关键尺寸(OCD)测量设备已批量进入中芯国际、长江存储等产线。

2) 深耕机械测试沃土,精心培育高端人才。36 年间(1987 年—2022 年),在机械测试理论与技术领域申请项目的依托单位共 373 家,各类项目总计申请量 36 项(年均 1 项)以上的仅 26 家,说明该领域目前大多数学者仍然是单兵作战,能形成团队优势的相对较少。比较有代表性的团队有:哈尔滨工业大学谭久彬院士团队,面向超精密激光干涉、激光共焦、微光纤传感、微环境测控等超精密测量仪器与装备技术研究,近 10 年来承担机械测试理论与技术领域基金项目 30 余项,总经费 2300 余万元,资助培养院士 1 人,优青 1 名,其他国家高层次及青年人才 12 人。天津大学郑继贵团队,依托于精密测试技术与仪器国家重点实验室,针对机械制造发展过程中的在线精密测量问题,研究激光及光电测试、视觉检测、大尺寸测量等空间几何量测量原理和技术,创新制造现场精密测量理论与方法,开发新型测量仪器,服务航空航天、船舶、汽车等领域大型装备现场精密测量需求,支撑装备制造技术持续迭代升级,助力国家智能制造产业发展。近 10 年,团队获批国家自然科学基金委重大科研仪器研制项目 1 项、重点项目 1 项及其他项目 10 项,培养杰青 1 名。中北大学张文栋团队,立足于研究开发极端环境下动态过程参量原位测试的方法、技术和仪器,解决动态测试中基础科学问题与关键技术难题,培养杰青、优青各 2 名,另有卓青、青拔、青长、百千万人才 11 名。

2.3 重点类项目的资助情况

机械测试理论与技术领域重点类项目申请及资助情况,如图 3 所示。迄今为止共有 83 人提出申请,18 人获得资助,资助率为 21.69%,略高于 E05 的平均资助率(19.12%),获资助人数占 E05 总资助人数(257 名)的 7%。其中,聚焦无损检测、在线检测、高精密度测量和超声传感方向的项目较多,瞄准了动态测量、位姿

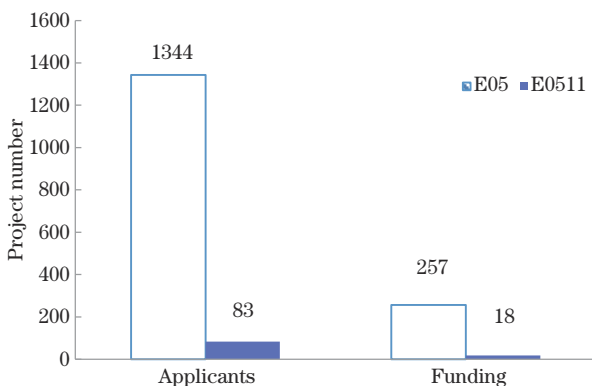


图 3 机械测试理论与技术领域重点类项目申请及资助情况

Fig. 3 Application and funding of key projects of mechanical testing theory and technology

测量、在线测量、高分辨测量以及微细结构测量和缺陷检测等前沿方向。同时,也有计量基准方向的项目。表明资助项目涵盖了机械测试理论与技术的几乎所有资助领域,对各领域的协调发展起到了很好的导向作用。

机械测试领域具有很强的交叉性,融入设计与制造的全过程。截至目前,机械学科所资助的 252 项重点项目中,非机械测试领域的项目有 235 项,其中研究内容或技术手段涉及机械测试、测量的项目有 158 项,占比 67.2%。如:华中科技大学熊有伦院士在“大型复杂曲面零件的数字化设计-加工-测量一体化理论与技术”重点项目,开展了几何量和物理量在线组合测量的研究,研究大型复杂曲面零件的全局测量和局部测量相结合的在线测量和数据融合方法,探索加工过程中力、热等物理量的间接测量新方法,实现大型复杂曲面零件加工过程中几何量和物理量的组合测量和快速高精度获取;西安交通大学何正嘉教授在“大型复杂机电系统早期故障智能预示的理论与技术”重点项目,利用多源传感器优化配置,分析复杂机械系统的动力学、热力学和摩擦学特性,研究潜在故障发生、发展机理,通过多源(振动、噪声、温度、扭转等)传感器的优选与合理配置,获得最能反映微弱和潜在故障的信息。然而,作为机械测试的标准和基础,机械计量标准、理论与方法的研究较少,需引导科学家加强该方向的研究。

2.4 国家重大科研仪器设备研制专项及项目的资助情况

国家重大科研仪器设备研制项目面向科学前沿和国家需求,以科学目标为导向,资助对促进科学发展、探索自然规律和开拓研究领域具有重要作用的原创科研仪器与核心部件的研制,着力支持原创性重大科研仪器设备研制,为科学研究提供更新颖的手段和工具,以全面提升我国的原始创新能力。包括部门推荐和自由申请 2 个亚类,部门推荐类项目的资助额度在 1000 万元/项以上(以下简称大仪器),自由申请类项目一般应小于 1000 万元(以下简称小仪器)。现代科学的发展历程表明,重大科学创新和科学研究新领域的开辟通常以科学仪器和技术方法上的突破为先导。

机械测试理论与技术获资助国家重大科研仪器设备研制专项及项目在学部及全委的占比,如图 4 所示。截至目前,E05 学科共资助大仪器 3 项。1) 中南大学钟掘院士主持的“材料与构件深部应力场及缺陷无损探测中子谱仪研制”(51327902),资助经费为 7800 万元。该项目是基金委工程与材料科学部首批资助的重大仪器专项项目,重点针对结构材料深部内应力不能直接测量的问题,该问题已成为研究、设计、制造工程结构和复杂装备的巨大屏障,严重影响着新材料的研究工作。通过该项目的实施,自主研制了国内首台高通量、高分辨、大承重、高定位精度的中子应力工程谱仪,具有兼顾宏观应力检测和缺陷周边微应力场检测

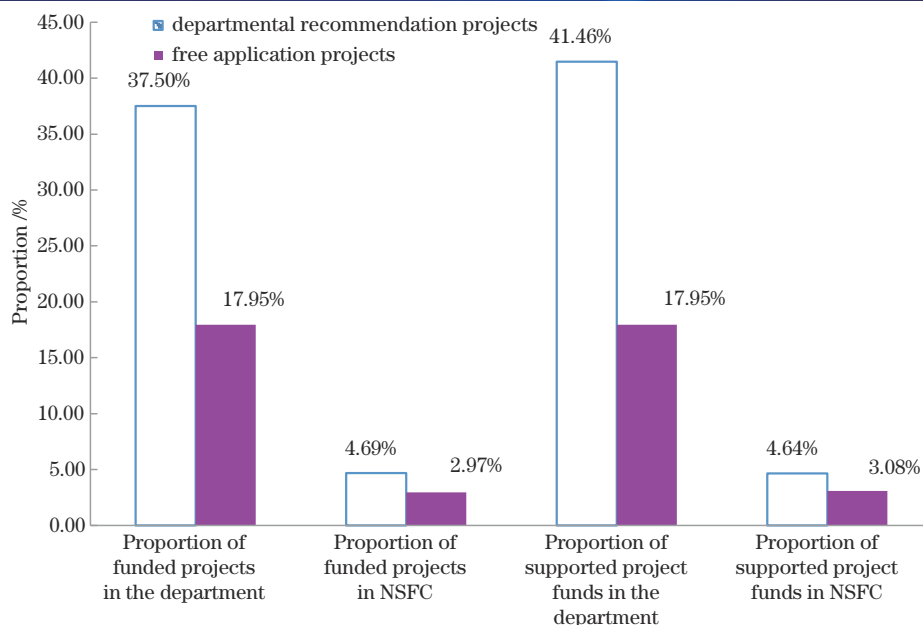


图 4 大仪器和小仪器在工材学部及全委的占比情况

Fig. 4 Proportion of departmental recommendation projects and free application projects in the engineering and material sciences department and NSFC

的功能,可实现在高低温及机械加载条件的应力测试,为揭示材料与构件深部应力形成与演变规律提供了重要的研究手段。2021年9月18日,经项目验收专家组充分质疑和讨论,专家组认为该仪器总体处于国际先进水平,高中子通量、小取样体积和可测工件尺寸等指标属国际一流,测点智能切换具有独创性,并且突破了高通量中子聚焦、大小取样体积与高分辨探测、大承载高刚度高精度样品台架等关键技术。服务于工程构件精确设计和制造及服役性能的精确评估,以及材料-构件一体化设计、重大装备安全运行的工程需求,为国家重大工程的安全服役提供科学依据。2) 清华大学雒建斌院士主持的“高分辨原位实时摩擦能量耗散测量系统”(51527901),资助经费为7475.9万元。项目立足于引领摩擦学的研究,由以力学为核心的研究范式向能量范式转变,以千分之一量级摩擦系数的超滑体系为研究对象,为降低占比工业30%的摩擦损耗为发展目标。课题突破了万分之一量级超低摩擦系数测量、摩擦过程中声子动力学行为测量、电子伏特级物理射线超宽发射谱的探测、摩擦界面分子结构演变的实时测量等仪器关键技术,并研制出国际首台原位实时高灵敏度摩擦能量耗散测量系统,实现万分之一的摩擦系数并揭示了摩擦能量耗散摩擦起源以及超滑的本质,拓展了超滑材料体系和指标能力。目前国际上尚无同类功能的仪器。其成功研制将大幅提升我国大型表界面领域科学仪器的研究水平,具有重大战略意义。超滑本质的揭示将利于研发出新的超滑材料,使摩擦能耗呈数量级降低,可望对制造、交通、能源等领域产生深远影响,也将是人类文明史的一大进步。3) 武汉大学刘胜教授主持的“薄膜生长缺陷跨时空尺度原位/

实时监测与调控实验装置”(51727901),资助经费为6500万元。该项目针对薄膜生长过程跨越介观到宏观的空间尺度和飞秒到秒的时间尺度、缺陷萌生及演化机理留有許多空白的现状,研制薄膜生长过程跨时空尺度原位/实时测量与调控实验装置,实现飞秒激光-等离子体复合增强的分子束外延(MBE)、有机金属化学气相沉积法(MOCVD)、微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)真空互联系统,生长异构异质薄膜。目前已成功研制出飞秒激光连续/突发成像系统、超快激光调控装置等各类测试/调控装置及定制超快电子成像等关键装备;已完成主体多功能薄膜集成生长装备的设计、各测量装置与薄膜生长系统的集成方案;同时开展了金刚石半导体p型掺杂、氮化镓外延薄膜的飞秒激光缺陷修补研究,从本质上揭示了能量的吸收、传递、转换机制,以及微观缺陷的产生、演化和调控规律等主要科学问题。该实验装置对解决我国在薄膜生长核心技术“卡脖子”问题具有重要意义,大大促进了宽禁带等半导体材料与器件领域的学科发展与进步。

在机械测试理论与技术方向共资助小仪器12项,占E05学科资助项目数和经费的一半以上,分别占工程与材料科学部资助项目数量和资助经费的17.95%;在全委的资助项目数量和资助经费也分别占到了2.97%和3.08%。资助的项目多聚焦于航空航天、量子传感等前沿领域无损检测和测量、损伤测试、高分辨率成像关键核心仪器等领域。面向航空航天及量子传感,如在轨服务的空间机械臂接触作业地面半实物模拟器、航天服内嵌式意图驱动操作仪、基于稀疏孔径多波段成像的飞机位姿动态视觉测量系统、机载共形阵列天线柔性自动三维扫描测量技术与系统、深

空探测成像仪、全模式微动磨损测试系统和高温高压多相流冲击微动损伤测试系统、共聚焦拉曼与微纳米压痕同步同位测试仪、固态量子传感的自旋系综测量与调控装置等。面向智能制造、基础工业和人类健康的多目标测量和检测仪器研制,如高性能精密坐标测量可重构多目标坐标测量技术及仪器、五轴数控机床的激光高精度多参数快速综合测量仪、超精密蜗轮副隐含误差规律的机械传动误差检测智能仪、小模数齿轮超精密测量仪、极端工况下轮轨黏着特性测试系统等基础制造业、多面体结构高性能分子成像仪器、血糖血脂无创监测核磁共振科学仪器、人体运动单元放电序列(MUAPt)的非侵入式记录仪器等。

每一项科研仪器的研制成功通常成为某一领域发展的“增速器”,为相关方向的基础科学研究、制造工艺优化、产业化提供了新原理、新方法和新途径,也能起到为该领域指明新研究方向和广阔发展前景的重要作用。机械测试理论与技术面向机械工程学科共性测量问题,以重大科研仪器设备研制为重点研究内容之一,与国家重大科研仪器研制项目鼓励和培育具有原创性思想的探索性科研仪器研制的资助导向较为相符。这也充分体现了机械测试理论与技术是衡量机械前沿基础科学研究能力及机械工程发展水平的重要标志之一,在机械学科基础研究、制造技术装备研发、制造过程控制、产品质量保证、系统运行保障等全部流程环节中发挥着不可或缺的支撑作用。

3 国内外研究现状及发展趋势

自 1986 年国家自然科学基金委员会成立以来,机械学科所资助的 1521 个机械测试理论与技术项目中精密测量占比 14.6%、超精密测量占比 52.33%、纳米测量占比 6.11%、量子测量占比 0.33%、其他占比 26.63%。资助项目和相关成果显示,测量精度要求不断提高,测量尺度向极大和极小两极加速延伸;测量频响要求不断增大,测量参量由静态向动态高频测试方向拓展;测量参量向多种类、多参量同时测试方向发展;测量对象及条件要求不断升级,测量向对象复杂化和条件极端化方向发展;测量基准精度要求不断提高,测量基准开始由实物基准向高精度的自然基准方向发展等。基于机械测试理论与技术学术成果动态,重点聚焦于精密与超精密测量、纳米测量、量子测量 3 个主要方向,并结合各自特点对机械测试理论与技术的现状、挑战与未来作出展望。

3.1 精密与超精密测量

精密与超精密测量的对象通常是具有宏观尺寸的物体,如大尺寸待抛光的碳化硅镜面以及光学镜头表面^[9]。精密测量的目标是对这些具有宏观尺寸特征的物体表面或亚表面进行测量,测量的精度范围需达到 1 μm 至 0.1 μm 的量级。而超精密测量则进一步将测量的精度推进至 100 nm 以内,乃至 1 nm 甚至皮米

量级^[6]。

以 precision metrology 与 precision measurement 作为主题词,在 Web of Science 数据库中,精密与超精密测量领域过去 20 年整体呈现发文量逐渐上升的趋势,这与精密测量的测量对象(尺寸、形貌、温度、压力、应力等形性参数)具有广泛的工业应用场景具有较大的联系。在检索到的 5403 篇文献中,美国、中国、德国在此领域分别发表了 1523、1420、651 篇,占据绝对优势地位,其中资助机构主要来自于我国自然科学基金委(资助率为 14.938%)、美国自然科学基金会(资助率为 4.588%)以及欧盟相关科研机构(资助率为 4.196%)。以英国哈德斯菲尔德大学蒋向前教授、日本东北大学高伟教授、北京理工大学郝群教授、浙江大学居冰峰教授、英国诺丁汉大学 Adam Clare 教授为代表的精密测量领域高被引学者,在纳米量级超精密表面测量领域取得了卓越的研究成果,其中蒋向前教授成为第一位以中国专家身份进入国际标准组织 ISO/TC213 顾问组的成员,同时也被任命为 ISO 新一代 GPS(几何产品的技术规范与论证)4 项国际标准研究制定的负责人。

进一步在中国知网以精密测量、精密仪器、精密计量作为主题词,共检索到 2158 篇文献,其中科技类论文主要发表在《中国光学》《仪器仪表学报》《物理学报》等期刊。以哈尔滨工业大学谭久彬院士、天津大学叶声华院士、清华大学张书练教授等为代表的我国著名精密测量领域专家,在高精密光电子测量领域取得了卓越成绩,是“将科研论文写在祖国大地上”的典范。

高测量精度对保证制造产品的性能与仪器设备的性能具有极其重要的意义。一方面,高精密测量技术与仪器是科学探索不可或缺的手段与工具。截至 2017 年,诺贝尔物理学奖、化学奖、生理学或医学奖获奖总数为 371 项,获奖总人数为 594 人;直接因测量科学研究成果或直接发明新原理仪器而获奖的项目总数为 42 项(占比 11.3%),总人数为 64 人(占比 10.8%),如电子显微镜、质谱仪、CT 断层扫描仪、扫描隧道显微镜、超分辨荧光显微镜、冷冻电镜、激光干涉仪等;同时,72% 的物理学奖、81% 的化学奖、95% 的生理学或医学奖都是借助于相关尖端仪器完成的^[9]。科研仪器,尤其尖端测量仪器,对前沿科学研究及重大物理现象的发现发挥着不可估量的作用。另一方面,现代制造业已经将制造产品的表面性能推进到近原子尺度。以集成电路制造中的晶圆抛光为例,对抛光后的晶圆表面进行近原子量级的精密测量,是确定抛光表面质量是否满足一致性、高平坦性的关键;以大口径太空望远镜为例,为了保证镜头的分辨率和成像质量,光学系统对反射镜的面型精度提出了极为苛刻的要求。

3.2 纳米测量

与精密超精密测量不同,纳米测量的对象是具有纳米尺度特征的纳米结构或纳米材料。由于纳米制造

的对象处于微观尺度,因此纳米测量主要是指纳米尺度(尤其包括 0.1~100 nm 尺寸范围)和精度的测量技术^[10-12]。一个硅原子的直径大约为 0.25 nm,纳米尺度已经接近原子量级,因此对纳米量级物体的高精度测量难度比传统测量大很多^[13]。与精密测量技术相比,纳米测量具有以下特点:1)以非接触测量手段为主;2)须提供纳米乃至亚纳米量级测量精度;3)须保证在纳米尺度上有稳定可靠的重复性;4)涉及多学科知识(如光学干涉与衍射、电子散射、晶格衍射、电子隧穿效应等)。

以 nanoscale metrology、nanoscale measurement 及 nanometrology 作为主题词,在 Web of Science 数据库检索,纳米测量领域的发文量在 2013 年前缓慢增长,在 2014 年、2015 年急剧增长后趋于平缓,这与微纳米制造技术及产品的快速发展有着较大关联。检索到的 47382 篇文献中,美国、中国、印度、德国在此领域分别发表了 11159、10356、5003、4230 篇,共占据总发文量的 64.894%,其中资助机构主要来自我国自然科学基金委(资助率为 13.269%)、美国自然科学基金会(资助率为 7.499%)以及欧盟相关科研机构(资助率为 5.120%)。以德国联邦技术物理研究所戴高良博士、美国纽约州立大学 Alain C. Diebold 教授、捷克计量院 Petr Klapetek 博士、美国阿拉巴马大学 Nader Jalili 教授、美国德克萨斯大学达拉斯分校 Eric Vogel 教授、日本东京大学高增·高桥(Takamasu-Takahashi)教授、英国国家物理实验室 Andrew Yacoot 研究员为代表的纳米测量领域的高被引学者,在纳米结构成像与表征方面取得了丰硕的研究成果,其中美国纽约州立大学 Alain C. Diebold 教授长期耕耘在纳米光学测量领域,在光学散射纳米结构测量技术与光学物理参数测量领域取得了一系列重要成果,并与硅谷半导体测量领域公司保持长期合作关系,是国际上“产学研用”的典型代表。

在中国知网数据库,以纳米测量、纳米检测等作为主题词,共检索到 514 篇文献,其中科技类论文主要分布在《合肥工业大学学报》《天津大学学报》《仪器仪表学报》《光学技术》《计量学报》《光学学报》等期刊。以天津大学胡小唐教授、浙江理工大学陈本永教授、合肥工业大学费业泰教授等为代表的测量技术及仪器方面的专家居多。

纳米测量对实现纳米制造的可预测性、可操控性和可重复性,对保证基于纳米制造技术的产品或实现的功能满足可靠性、安全性和一致性等要求具有十分重要的意义。一方面,纳米测量是保证纳米制造产品性能的关键。以集成电路制造领域为例,特征尺寸更小、集成度更高的芯片是集成电路制造的永恒追求,如果制造的不可控因素导致芯片内纳米结构特征尺寸偏离设计值 10%~15%,抑或产生一些缺陷结构,将对芯片的性能产生极大影响,甚至造成芯片功能失效。因

此,对芯片制造过程中的纳米结构进行精密测量与检测是提升集成电路制造性能的重要手段。另一方面,纳米测量也是探索微观世界的利器。宏观世界的物理规律已经趋于完备,然而在微观世界依然有众多的谜题有待揭示。纳米测量,因其观测对象本质上就是具有纳米尺度的物体,这为探索微观世界、发现全新的知识提供了重要的技术手段。

3.3 量子化测量

在 Web of Science 数据库中,发现量子测量领域过去 20 年发文量整体呈现逐步攀升的趋势,这与量子领域本身的前沿热度及量子测量在空间探测、惯性制导、现代制造工业等领域的逐步应用有着必然联系。特别是现代制造工业应用领域较广,对制造装备的在役温度、几何量稳定性、电磁参数、力学性能等通常具有极高的要求,因此需要更为精密、响应时间更快的高灵敏测量技术与器件。量子化测量利用原子、光子等量子体系的量子特性及现象,通过对微观量子态进行精确调控及观测,建立多物理场量子体系与被测宏观物理状态的耦合关联模型,进而完成长度、角速度、磁、热等机械量的高灵敏传感测量。特别地,固态量子体系物理量测量具有启动时间短、不需预热等显著优势,理论灵敏度可突破传统测量极限,且依靠先进量子调控、微纳加工技术,固态量子体系器件芯片化前景广阔,发展潜力巨大。近年来,光频梳的发明使光频通过频率链无缝链接到微波钟频率,可独立保证长度基准的准确可靠,对几何量测量具有重要意义。

面向现场的扁平化溯源方法体系建立是量子计量的一个重点方向,2019 年 5 月 20 日(世界计量日)新修订后的国际单位制(SI)体系正式生效,在新的量子化 SI 体系下,计量溯源将呈现 2 个发展趋势:1) 计量溯源的扁平化,量子计量基准与信息技术相结合,使量值溯源链条更短、速度更快、测量结果更准更稳,将改变过去依靠实物基准逐级传递的计量模式,实现最佳测量,提升产品质量竞争力;2) 从传统的实验室条件溯源转向在线实时校准,从过去终端产品的单点校准或测试转向研发设计、采购、生产、交付及应用全生命周期的计量技术服务。

国内在光频梳脉冲对准测距、双光梳多外差测距、光谱编码测距等原理创新方面已接近世界先进水平,并且已经将光频梳测距系统应用于卫星、空间相机部件等大型构件的测量,但在光频梳集成以及小型化、芯片化等方面和国外仍有较大差距。国际上,美国国防高级研究计划局陆续支持开展新型量子传感导航系统及器件重大研发计划。欧盟于 2016 年发布《量子宣言(草案)》,呼吁建立 10 亿欧元的量子技术旗舰计划,将量子测量作为重要研究领域之一,在科学研究、产业推广、技术转化、人才培养等方面都将获得重要支持。我国在 2016 年的国家重点研发计划中设立了“量子调控与量子信息”重点专项,将量子调控与量子信息技术

纳入国家发展战略,明确提出要在核心技术、材料、器件等方面突破瓶颈。

3.4 发展趋势与挑战

机械测试理论与技术研究已发展为以计量标准理论、测试理论方法、传感器技术与测试仪器研究为主体,以主动服务于机械工程学科的先进测量原理技术研究、高性能仪器设备研制和应用模式创新为目标。特别是我国航空航天、高速轨道交通、新能源汽车、电子信息等高端制造业中的传感测试及仪器设备需求呈现出爆发式增长,如何提升机械测试自主创新能力以满足高端制造业发展的迫切需求已成为机械测试领域发展必须面对的重大现实挑战。实际上,随着制造领域的不断扩大以及产品性能的不提高,信息科学、材料科学、物理科学等多学科交叉领域在机械系统中占据的重要性日益突出。极端尺度、极限精度、高动态性、多元参量、复杂综合对象、极端测试环境使得测试测量的难度不断提升。智能制造全球化的背景使得测试传感仪器设备向高性能、网络化、智能化发展,并与制造系统深度融合集成,进而促进传统工艺优化、先进工艺创新、产品性能提升。仍然以申请量与获批量最大的测量理论与技术为分析对象,机械测试理论与技术存在如下发展趋势与挑战。

1) 从单一参量离线测量到复杂参量在线、在役测量和复杂环境感知

独立的离线测量能够获取高精度的专一测量参数,但其较长的信息传输路径、间接的测量方式、较大的设备体积导致其难以集成到整个制造产线上,难以实时检测产线的动态状况。多测量手段组合也难以保证测量的高效性与及时性,利用已有测量技术的微型化、集成化、规模化意味着会在一定程度上牺牲部分性能。如在航空发动机叶片测量中,传统离线条件下测量低速转动叶片形状精度已无法满足研制需求,下一步将要求在实际高速转动工作状态下采用智能嵌入式传感器对叶片形状进行在线在役的超精密测量。同时,随着智能制造推进,智能单元、智能车间、智慧工厂已逐步在航空航天、能源重工等工程领域开展了基础性、示范性应用。发展复杂作业下环境状态感知技术,构建智能自主单元,提升智能装备在复杂现场环境中运行适应性、自律性、稳定性和可靠性,对推动智能制造技术深层次发展具有重大意义。

2) 从单一物理量测量到多物理场复合测量和复杂系统综合信息感知

高端装备制造与服役环境更加恶劣,性能要求更加苛刻,智能化特征要求更加显著。在高端装备与制造过程中的高温、强电磁场、多化学相、狭小空间等极端复杂环境下,多参量测量、多物理量强耦合动态演变机制、工艺参数实时优化调控对保证先进制造产品性能具有重大意义,未来需要重点关注复杂物理场耦合原位高精测试、多物理量测量解耦、多参数测量理论与

方法。另外,面向汽车、航空航天、船舶等高端复杂产品的制造正经历从传统模拟量协调向数字量协调的技术变革,基于制造过程综合感知信息的数字化制造模式是提高质量效率、改善产品性能、延长服役寿命的必然选择,先进的高性能测量方法与技术设备已成为重大装备数字化制造系统中不可或缺的组成要件。同时,复杂机电产品的技术综合度、复杂度急剧增加,整机产品的功能和性能大幅提升,面向复杂机电产品的测量任务面临着比以往更为严苛复杂的测量要求、条件及环境。

3) 从单一尺度测量到跨尺度、多模态及微纳尺度形性多参数测量

半导体芯片产业是当今国民经济的基础,芯片制造已经上升为国家最紧急和最重要的战略任务之一。后摩尔时代推动制程芯片大规模量产工艺不断向 5 nm 甚至 3 nm 迈进,芯片制造呈现出由传统单一场作用向包括力、热、电、磁等多场耦合作用转变的趋势,制造过程中材料和零部件的形态和性能可能会同时改变。发展形状、性能参数的高分辨、高准确度、高效率的多物理场、多尺度复合测量技术是支撑微纳制造新方式的关键环节,亟待从理论、技术和实现方法上进行重点研究。微纳米尺度是产品性能的保证,宏观尺度是产品实现的物理载体。从制造过程底层到产品整个流程的角度来看,测量的本质需求是跨尺度的,以极紫外光刻机中的掩模缺陷检测为例,反射式极紫外掩模的宏观大小在厘米至分米量级,而掩模缺陷检测的目的是把整个掩模中所有的、不同尺寸的、不同位置的表面与内部掩埋型缺陷检测出来,这一检测过程本质上需横跨分米、厘米、毫米、微米与纳米多个尺度。为了保证缺陷检测效率,必须保证检测技术针对不同的尺度具有自适应的测量速度与测量模式,进而适应不同的制造场景需求。传统的基于单一物理原理的测量技术难以同时适配如此多的测量尺度需求,因此有必要结合多物理原理测量模式,如将力学、声学、热学、光学、电学测量原理综合评价整合,实现跨尺度的多模态测量。

4) 从单一测量点位到智能大场景测量传感网络

航空航天船舶等大型复杂装备的超高性能必须依靠精确外形控制实现,外形尺寸信息是控制制造过程、保证制造质量、提升产品性能的关键。大规模、多层次、实施持续的物理空间数据获取,特别是高精度空间几何量获取已成为实现复杂装备智能制造的前提,测量需求表现出全局、并发、多源、动态、可重构、共融等全新特点。而在智能生产场景中,产品的复杂性和精密性导致制造产线普遍较长、制造装备多样,形成复杂的制造网络,制造设备的分布由传统的单位点向网络节点分布方向发展。生产测量装备与测量传感器正由单一检测点位向低成本、分布式的测量设备或测量传感器网络形态发展,以高速、精确、全局获取整体制造

产线与制造装备序列的动态运行数据。

4 关键科学问题与重点研究领域展望

机械测试理论与技术本身具有跨学科交叉特性,特别是近年来立项的仪器项目、重点项目、杰青项目,在立足机械测试领域基础科学问题的同时,越来越多地显示出与光学、超声、医学、生物和量子的交叉发展趋势;主要包括机械计量标准、理论与方法,机械测试理论、方法与技术,机械传感器技术与测试仪器,机械制造过程监测与控制,其共同的关键词是“机械”,相关研究工作和主要产出成果本质上均围绕服务于装备制造前沿技术突破、服务于国家重大需求、服务于国民经济主战场展开。可以预见,未来面向先进制造的精密与超精密测量、纳米测量与量子测量将始终坚持以国家经济社会主战场、国家重大工程需求牵引为出发点,以先进测量基础前沿问题为导向,开展测量理论、技术方法、仪器设备、工程应用等多方面、体系化研究^[5]。

4.1 关键科学问题

1) 纳米-原子量级在线、原位、动态测量理论与方法

精密与超精密测量、纳米测量与量子测量的核心共性问题“高精度”,这是解决超高精度先进制造中过程控制与性能检测问题的基础和关键。随着全频谱(面型、波纹度和粗糙度)、异质表面、三维超构纳米制造不断发展,亟需能够从纳米尺度、分子尺度乃至原子尺度揭示原子迁移、材料去除加工规律的新型测量原理及技术手段;能场辅助制造(如高能束纳米制造)过程中,飞秒激光能够在瞬间将被加工物质电子温度提升到上万摄氏度并引起晶格振动,光子-声子-温度-电子多重耦合与量子效应凸显,亟需通过多重测量模式的组合或新测量手段以超高速从原子、多物理场耦合角度直接或间接揭示材料加工中的相变机制。

2) 复杂制造系统多物理量全局测量感知理论与方法

以大规模集成电路制造、大型客机、高技术船舶为代表的现代先进制造业,从规模、装备精密性、产线纵深上均远超传统制造业。精密测量需求已从传统单一节点向全产业链全制造周期测量迈进,制造质量评价体系已由传统局部测量节点逐级向顶层汇集转向基于全局测量网络的多节点全时空流程整体动态评估,测量技术与测量设备的复杂度、集成度与边缘处理能力大幅提升,网络化、规模化、协同化效应进一步显现。探究嵌入式测量/传感单元与制造系统功能部件的深度融合机制,摸索新型全局定位与测量传感器分布网络,研究复杂系统的多模态物理量感知技术与方法,挖掘复杂、极端、多物理量耦合环境下装备与产线测量信号与产品性能间的关联规律,探索从数学层面解析全局测量/传感网络与产品制造良率间的深层关联,对先

进制造产业具有深刻的指导意义。

3) 量子-经典混合集成式测量理论与方法

以大规模集成电路中晶圆缺陷检测、掩模缺陷检测为代表的宏-微-纳跨尺度测量场景,对测量技术的自适应能力、测量速度、测量范围、测量精度提出了严苛的要求。跨尺度场景下测量问题受到宏观物理规律差异影响严重,所面对的复合测量要求甚至在多数情况下相互矛盾,传统经典物理测量手段面临严峻挑战。量子测量技术,尤其是量子成像技术所展现出来的极低信噪比下成像与探测能力,为测量精度与灵敏度提升带来了新的技术方向。经典测量技术的典型优势包括测量效率与测量的非破坏性(如光学测量手段),这与量子测量(尤其是量子成像)中的高测量精度(但形成大量纠缠光子对则需较长时间)形成天然的优势互补。新型量子传感器通常成本高、使用条件要求高,需要专业人员调试与操控,而经典传感器技术相对成熟,具有体积小、集成度高、成本低、适应性好等突出优势,将经典与量子测量理论与模式相结合,对加深测量领域的科学内涵、拓展测量科学的应用广度具有重要意义。

4.2 重点研究领域

围绕国家在集成电路、航空航天、新能源、生物医药等先进制造领域的重大战略布局,基于本领域的研究现状与发展趋势,以前沿基础方向与关键科学问题为重点核心,建议将面向先进制造的以下测量领域作为重点研究方向,如图 5 所示。

1) 宏-微-纳跨尺度测量技术与仪器——研究跨尺度制造中测量速度、测量精度、测量鲁棒性的关联性与复杂性,开发多模态、多物理量协同测量系统,实现对跨尺度制造材料的加工、排列、操作、成形等过程中多源参量的动态、高速测量。

2) 集成式测量设备与传感器件——研究面向复杂制造环境、受限空间、复杂电磁耦合条件下的制造装备与产线精密测量需求,开发集成式光-电-热-力多模态测量系统,发展片上集成式高性能测量传感器,实现对先进制造装备状态与产线运行过程的高性能、高可靠性、高耐久性测量与监测。

3) 复杂三维纳米结构测量、检测技术与仪器——研究极短波长电磁波、电子束、中子束等激励源与纳米结构的相互作用机理,探索光-电-热多源激发条件下的纳米结构散射信号测量机制,发展基于远场超分辨成像技术的纳米结构测量与缺陷检测理论与方法,实现对纳米结构三维形貌与物理参数的快速、准确测量与重构。

4) 多模态原位测量技术与仪器——研究能场辅助制造、超精密加工、增材制造、光场制造等领域中的原位测量需求与挑战,探索在具有光子、电子、声子、热源等多物理场耦合条件下的制造过程表面与亚表面高速、动态测量与表征方法,发展具有毫秒级以下时间分

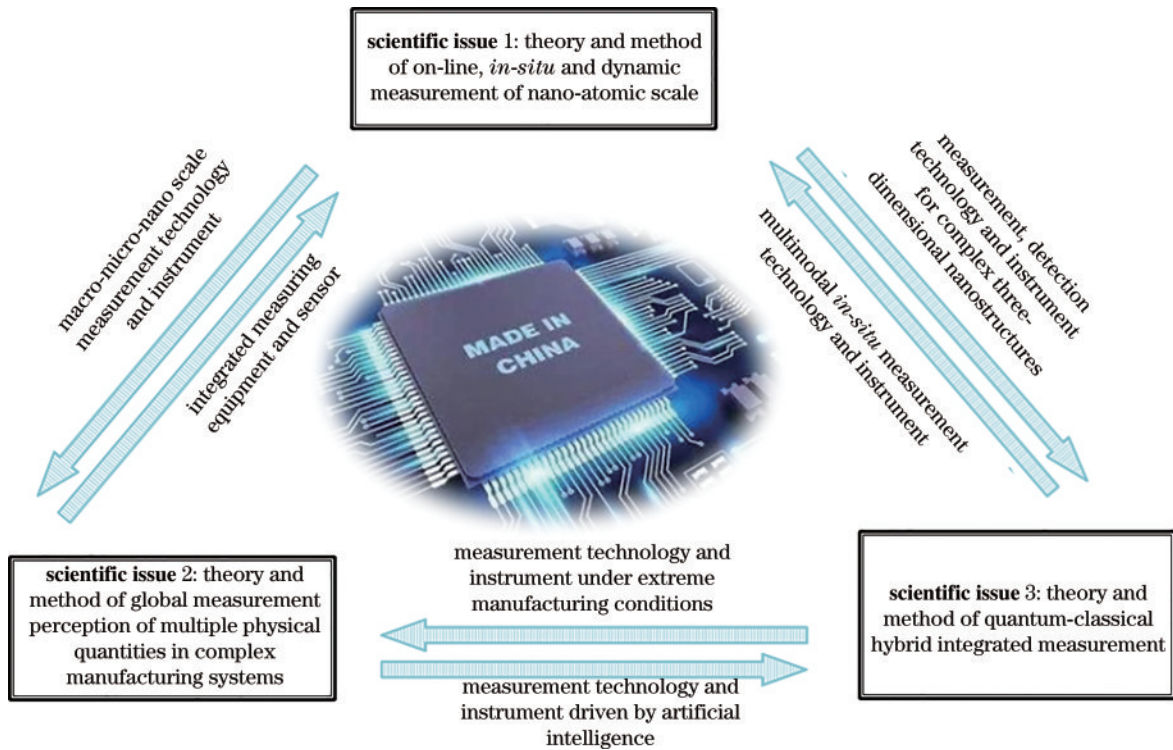


图 5 先进制造中测量领域的关键科学问题与重点研究领域

Fig. 5 Key scientific issues and key research fields in measurement field in advanced manufacturing

分辨率、全三维纳米量级空间分辨率测量技术与仪器。

5) 极端制造条件下的测量技术与仪器——探索在极端温度、极端磁场、极端压力、极端辐射等条件下的形状性能测量理论与方法,研究测量科学与新材料、信息科学、新物理效应相结合的新范式,发展面向航空、宇航、深海、核聚变等制造领域的极端环境高性能、高鲁棒性、高精密度测量仪器与设备。

6) 智能赋能的测量技术与仪器——以传统测量仪器难以解耦多物理场精密测量技术瓶颈为突破口,探索智能感知网络、智能算法与传统高精度测量仪器设备结合的新机制方法,实现超高速、超高灵敏度、超高精度纳米尺度测量与传感。

5 总结与展望

随着制造模式逐步走向纳米化、极端化、规模化、扁平化,机械测试理论与技术面临着“极大尺度中的极小量测量”“极小尺度中的甚小量测量”“跨尺度中的纳米精度测量”“极端条件下的多维多源物理量测量”“超高速纳米量级原位在线测量”等重大挑战。正如中国共产党第二十次全国代表大会报告中特别提到的,要加强基础研究,突出原创,鼓励自由探索,尤其是在全球新一代科技竞争白热化的时代背景下,亟待发挥基础研究的原创力,为科技创新和高质量发展提供有力支撑。如今正面临百年未有之大变局,人类近代史以来首次出现东方大国在整体制造业规模、制造业门类上超越西方主要工业大国之和,我国也正式迈入从

“制造大国”向“制造强国”转型的关键时期。进一步拓展机械测试理论与技术研究领域、发展高精度测量技术与仪器,是满足我国核心制造装备技术性能升级、高端原创装备产业落地、产品性能全面提升的关键,对全面提升我国科技竞争力具有极其重要的意义。我们要从面向国家重大需求、适应科研范式变革、促进学科交叉等方向加强战略性谋划,牵引推动关乎人类生产生活方式变革乃至人类文明发展的重大技术创新,培养高水平人才为强化我国战略科技力量、建设世界重要人才重心和创新高地提供保障,化挑战为机遇。

致谢 衷心感谢机械学科历任主任(黎明、雷源忠、王国彪和赖一楠)在机械测试理论与技术发展方向的超前规划与重点布局。

参 考 文 献

- [1] 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知[EB/OL]. (2015-05-19)[2022-10-22]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm. State Council releases notice on “Made in China 2025” [EB/OL]. (2015-05-19)[2022-10-22]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [2] 周济. 智能制造: “中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284. Zhou J. Intelligent manufacturing: main direction of “Made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [3] 郭东明. 高性能精密制造[J]. 中国机械工程, 2020, 29

- (7): 757-765.
Guo D M. High-performance precision manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 29(7): 757-765.
- [4] 韦亚一. 超大规模集成电路先进光刻理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Wei Y Y. Advanced lithography theory and application of VLSI[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [5] 国家自然科学基金委工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2021-2035)[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Engineering and Material Sciences Department of National Natural Science Foundation of China. Report on the development strategy of mechanical engineering discipline(2021-2035)[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [6] 谭久彬. 精密测量: 科学探索的“眼睛” 高端制造的“尺子”[J]. 中国计量, 2022(5): 11-13.
Tan J B. Precision measurement-the “eye” of scientific exploration and the “ruler” of high-end manufacture[J]. China Metrology, 2022(5): 11-13.
- [7] 谭久彬. 超精密测量与高端装备制造质量[J]. 中国工业和信息化, 2020(6): 18-23.
Tan J B. Ultra-precision measurement and manufacturing quality of high-end equipment[J]. China Industry & Information Technology, 2020(6): 18-23.
- [8] Zhang X J, Hu H X, Wang X K, et al. Challenges and strategies in high-accuracy manufacturing of the world's largest SiC aspheric mirror[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11: 310.
- [9] 谭久彬. 建设世界仪器强国的使命与任务[J]. 中国计量, 2019(7): 5-10.
Tan J B. Mission and task of building a world instrument power[J]. China Metrology, 2019(7): 5-10.
- [10] 蔡娟. 欧洲计量联合研究计划(EMRP)的发展与启示[J]. 中国计量, 2011(9): 52-55.
Cai J. Development and enlightenment of European metrology joint research program (EMRP) [J]. China Metrology, 2011(9): 52-55.
- [11] 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.
Rong L R. The present and future of nanometer technology[J]. MW Metal Cutting, 2013(8): 75-79.
- [12] Yang Y, Zhou J H, Zhu F, et al. Determining the three-dimensional atomic structure of an amorphous solid[J]. Nature, 2021, 592(7852): 60-64.
- [13] 张超星, 边文越, 王海名, 等. 世界主要国家纳米科技发展前瞻/部署分析研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(10): 1142-1149.
Zhang C X, Bian W Y, Wang H M, et al. Analysis of nanoscience and technology plans of main countries[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(10): 1142-1149.