DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.07.003

高端光学元件超精密加工技术与装备发展研究

蒋庄德[1,2,3]，李常胜[1,2,3]，孙林[1,2,3]，段端志[1,2,3]，康城玮[1,2,3]，陈杉杉[1,2,3]，
林启敬[1,2,3*]，杨树明[1,2,3]

（1. 西安交通大学机械工程学院，西安 710049；2. 西安交通大学高端制造装备协同创新中心，西安 710054；
3. 机械制造系统工程国家重点实验室，西安 710054）

摘要：高端光学元件是决定高端装备性能水平的核心零件，研究高端光学元件超精密加工技术与装备发展，对于实施制造强国战略、满足高端装备产业需求具有积极意义。本文剖析了光学元件超精密加工方法与装备、高性能基础部件、超精密光学加工中的测量方法与装备等的发展情况，凝练了精度与尺寸极端化、形状与性能一体化、加工工艺复合化、加工与检测一体化、装备与工艺智能化等发展趋势。通过广泛的行业调研和研讨，从需求、目标、产品、关键技术、应用示范、支撑保障等方面着手，形成了面向2035年我国高端光学元件超精密制造技术路线图。针对性提出了优化创新体系设置、组织优势资源成立技术联盟，加大资源保障力度、布局基础研究和技术攻关计划，加强人才培育、构建梯队并扩大队伍规模，筑牢产业发展基础、培育龙头企业和专精特新“小巨人”企业等发展建议，以期促进高端光学元件加工产业提升与高质量发展。

关键词：光学元件；精密制造；超精密机床；超精密加工；光学加工
中图分类号：TH16　　**文献标识码：**A

Ultra-Precision Machining Technology and Equipment for High-End Optical Elements

Jiang Zhuangde[1,2,3], Li Changsheng[1,2,3], Sun Lin[1,2,3], Duan Duanzhi[1,2,3], Kang Chengwei[1,2,3], Chen Shanshan[1,2,3], Lin Qijing[1,2,3*], Yang Shuming[1,2,3]

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Collaborative Innovation Center of High-End Manufacturing Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; 3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an 710054, China)

Abstract: High-end optical elements determine the performance of high-end equipment. Researching the ultra-precision machining technology and equipment for high-end optical elements is crucial for strengthening China's manufacturing industry and satisfying the requirements of the high-end equipment industry. In this study, the ultra-precision machining methods and equipment for optical elements, high-performance basic components, and measurement methods and equipment used in ultra-precision optical machining are analyzed. Five development trends are summarized including extremalization of precision and size, integration of shape and performance, compounding of machining technologies, integration of machining and measurement, and intellectualization of equipment and processes. Through extensive survey and discussions, a technology roadmap for ultra-precision manufacturing of high-end optical

收稿日期：2022-06-15；**修回日期：**2022-10-08
通讯作者：*林启敬，西安交通大学机械工程学院副研究员，研究方向为光纤传感技术和柔性微纳器件；E-mail: qjlin2015@mail.xjtu.edu.cn
资助项目：中国工程院咨询项目“高端光学系统的精密超精密加工技术及装备的发展战略研究”(2020-XY-02)，“工作母机高端装备的发展战略研究”(2022-XY-114)
本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

elements by 2035 is proposed from the aspects of demand, goals, products, key technologies, application demonstrations, and guarantees. Furthermore, several development suggestions are proposed, including (1) optimizing the innovation system and establishing technical alliances by organizing superior resources, (2) increasing resource guarantees and laying out plans on basic and technical research, (3) strengthening talent cultivation to expand the scale of the multi-level talent team, and (4) building a solid foundation for industrial development and cultivating small-sized leading enterprises.

Keywords: optical element; precision manufacturing; ultra-precision machine tool; ultra-precision machining; optical fabrication

一、前言

高端光学元件是决定航空航天、国防军工、先进民用等领域高端装备性能的关键零件，典型应用对象有：高分辨率对地观测系统、大型天文望远镜、X射线望远镜、激光核聚变装置、同步辐射装置等大科学装置，紫外/极紫外光刻机、精密惯性器件、飞行器光学导引头、消费电子产品、医疗器械等设备。重大装备服役能力不断提高，对高端光学元件性能提出了更高要求；仅以几何尺寸公差为关注点的传统设计制造理念难以适应高性能光学元件的制造需求，光学元件的超精密制造面临技术挑战。

以惯性约束激光核聚变为例，为了实现核聚变“点火”所需的极端苛刻条件，美国国家点火装置[1]大规模采用了以熔石英、磷酸二氢钾晶体材料为基础的大口径平面、非球面、离轴非球面等光学元件。我国在“神光”系列装置上开展了类似研究[2]。目前世界上均未实现核聚变“点火”目标，分析表明，服役在短波长范围的高性能光学元件超精密制造及其抗强激光损伤特性成为制约激光核聚变驱动器–巨型激光装置能否成功研制的瓶颈问题[3]。探究强激光紫外短波长光学元件超精密制造过程中表面形貌及缺陷的形成、影响机制、抑制方法，可极大节约激光核聚变装置的运行维护成本、加速新一代激光核聚变点火装置的研制进程。

空间X射线探测[4,5]是脉冲星全自主计时导航、X射线通信、空间环境监测等工程应用，天文观测、太阳X射线探测等空间科学探测的关键技术。空间X射线反射镜由多层轻质薄壁复杂曲面镜片经同轴共焦精密装配而成，要求加工至亚纳米表面粗糙度、微弧度级斜率偏差、极少的加工缺陷。目前，相比发达国家X射线多层嵌套反射镜加工技术[6,7]，我国在反射镜层数、分辨率方面差距明显，研制高灵敏度空间X射线探测系统亟需解决相关难题。突破多层嵌套式X射线空间反射镜制造新工艺的基础理论与工艺方法，对推动新一代航天器深空全自主导航与通信、深空探测、空间科学领域发展具有重要的科学意义和工程价值。

在半导体芯片制造领域，极紫外光刻技术是国际半导体行业延续摩尔定律、确保光刻分辨率进入7 nm/5 nm节点的核心关键所在。极紫外光刻物镜需要适应以全频段、亚纳米精度制造为代表的一系列苛刻要求，才能保证光刻性能[8]：采用光学自由曲面设计，减小光学系统波前误差，增大数值孔径，减少元件数量；使用超低膨胀的微晶玻璃来保证工作稳定性，而这种异质材料的高性能超精密制造具有挑战性。目前，只有德国蔡司集团能够生产面向大规模制造的极紫外光刻物镜[9]；我国重点研究的深紫外光刻物镜制造技术[10]，与国际先进水平相比差距明显，是制约极大规模集成电路制造技术发展的“卡脖子”环节。

我国高端光学元件超精密制造技术及装备，相比国际前沿存在阶段性差距，成为制约高端装备制造业发展的重大短板。在高新技术领域国际竞争趋于激烈[11]、一些国家试图对我国进行科技封锁的背景下，“自主可控”解决光学制造这一“卡脖子”难题显得尤为迫切。发展国产高端光学元件超精密加工技术，是实现诸多大科学装置、高端装备应用突破的必由之路。

中国工程院咨询项目“高端光学系统的精密超精密加工技术及装备的发展战略研究”，广泛开展了文献调研、现场考察、会议研讨、问卷调查，旨在推动新形势下高端光学元件超精密加工技术与装备的高质量发展。本文作为相关咨询项目研究成果的学术性展示，梳理光学元件超精密加工方法与装备、高性能基础部件、超精密光学加工相关测量方法与装备的发展现状，分析理论、工艺、装备、应用等方面的瓶颈问题，提炼超精密光学制造技术的发展趋势，形成面向2035年高端光学元件超精密制造技术路线图，以期为我国超精密加工技术领域基础研究、技术攻关、装备应用等研究提供基础性参考。

二、国内外高端光学元件超精密加工技术与装备发展现状

高端光学元件制造的载体是精密 / 超精密光学加工机床。在以“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项（简称04专项）为代表的国家科技计划支持下，我国初步形成了超精密加工机床自主研发能力，产品品种基本满足重点领域需求，数控系统与关键功能部件的研发及配套能力基本形成。以04专项实施完毕后的状态来判断，我国机床行业与国际先进水平仍有15年左右的差距[12]。

（一）超精密加工方法和装备

美国企业在光学元件超精密加工领域起步最早、水平最高，欧洲企业紧随其后，日本企业在中小型民用超精密加工领域具有独特优势；这些企业技术体系成熟且注重技术原始创新，占据了大部分市场份额。近年来，我国的科研机构和企业在国家重大需求的牵引下，积极开展光学元件超精密加工技术研究，但与国外相比存在阶段性差距。① 自主研制的超精密加工机床，其数控系统性能与可靠性、主轴回转精度与转速、溜板直线度与定位精度、纳米级运动控制与补偿、加工精度与范围等方面普遍滞后于国际前沿水平；“产学研用”协同创新与要素融合不足，基础研究脱节，应用技术转化率不高，原创技术稀缺，以跟踪研究为主流。② 在我国超精密加工机床市场上，国外公司占据主导地位，进口产品拥有多数份额；国产机床集中在航空航天、国防军工领域应用，以高端民用为代表的大规模、产业化应用尚未展开。③ 国内相关研究队伍规模较大，然而具有国际影响力、引领产业发展的标志性人才稀缺，有关超精密机床制造方面的基础研究力量储备薄弱。

（二）数控系统、关键功能部件和刀具

通过持续努力，我国在超精密机床数控系统、关键功能部件、刀具等方面基本具备了自主保障能力。国产高档数控系统的功能基本接近国外先进系统，高档数控系统配套应用超过1500套，中档数控系统配套超过7万套；高档数控与伺服驱动系统仍依赖进口。国产功能部件平均无故障工作时间超过15 000 h，基本满足数整机配套技术要求，但精密轴承、精密导轨、高精密光栅等基础部件制造仍是薄弱环节。国产数控系统、伺服系统、精密光栅等核心部件未能形成贯通配套，应用领域用户的认可度不高[12]。刀具品种数量丰富（超过45 000种），行业用刀具国产化率提升至45%，但用于超精密加工的高性能刀具，在加工效率、使用寿命方面落后于进口产品。

国产数控系统的市场格局具有低端快速膨胀、中端进展缓慢、高端依赖进口的特点[13]。国产高端数控系统的功能、性能、可靠性等存在明显不足，导致高档数控系统市场90%以上被进口产品占据。机床智能控制系统是新一代机床的重要组成部分，人工智能、数字孪生、云服务等技术是支撑智能控制系统的关键[14]，相关研究有待深入。

国产主轴的径向回转精度约为50 nm，不能适应超精密机床的集成要求：电主轴的电机内装式结构、高转速下的亚 / 微米级高回转精度尚未实现，气体轴承刚度差、承载能力不足且难以保证高转速下主轴的高回转精度，液体静压轴承在油温控制、油泵减振、油液防泄漏等方面有待提高。

国产转台的径向 / 轴向回转精度约为25 nm，不能完全满足超精密机床的研制要求。超精密回转工作台存在很多问题，如液体静压转台的动态特性不稳定，转台工作精度随着温度升高而降低。

国内导轨加工仍停留在1 m长度、1 μm直线度的水平，相应的超高精度导轨没有摆脱进口依赖。气浮导轨承载力低、稳定性差，精密滚动导轨副的抗振性欠佳、机械磨损大，液体静压导轨在温升控制、流量控制等方面存在短板。

国产光栅位移传感器占据世界市场的50%以上，但以中 / 低档产品为主；大行程、高精度光栅直线位移传感器，超精密圆光栅角位移传感器的自主研发与制造能力薄弱，应用于光刻机等高端制造装备的二维光栅更是缺失。从位移传感器产品的核心性能角度看，大行程（超过5 m）、高精度（优于±5 μm）封闭式光栅，圆光栅编码器（精度优于±1″）等高端产品被国外企业垄断。

国产超硬车铣刀具的精度和使用寿命等，与国外先进水平相比差距明显。金刚石砂轮结合剂的耐磨性较低，细粒度金刚石砂轮的磨削加工精度低、加工质量不稳定。抛光工具的平坦度较低，使用寿命较短，缺陷率较高。超高纯胶体SiO_2等高端原材料需要进口。

（三）光学元件超精密加工中的测量方法与装备

在机床精度测量方面，激光干涉仪、电容传感器在超精密机床的几何误差测量中应用广泛，但需要配备多类标准件，成本高且操作复杂；快速在机误差测量的仪器、测量方案、测量标准等亟需发展。通过试切法、误差敏感性分析来识别机床几何误差在实际应用中较为流行，深入研究误差溯源分析算法并提高分析效率成为热点。辨识超精密机床的几何误差与加工表面性能之间的关系及响应机理，集成机床精度检测装置以匹配自适应 / 智能制造装备的研制需求，是机床精度检测技术的主要发展方向[15]。

光学元件离线检测设备主要依赖进口，如超精密接触式检测设备方面的泰勒霍普森、蔡司、马尔等品牌，干涉检测设备方面的 ZYGO、QED 等品牌。针对非球面、自由曲面的超精密测量是光学元件检测的难点，相应检测技术发展表现为通用化、高精度两类方向：前者要求在不对系统进行明显调整的情况下，快速自动地进行不同种类光学表面的检测；后者要求尽可能地提高检测精度，用于检测超高精度非球面（面形误差为纳米 / 亚纳米量级，补偿器精度、系统误差的校正精度是关键）。

在光学元件在位测量方面，虽然提出了加工 – 测量一体化理念，成功用于光学元件的精密加工过程并取得了原创性成果，但在位测量、加工 – 测量一体化受测量原理、集成机理、技术难度等方面的制约，很难满足多尺度、高精度、高频响、动态测量、多参量的测量需求。三维复杂结构表面具有广泛应用，相应微表面形貌的测量不仅涉及粗糙度或瑕疵，而且与轮廓、形状偏差、位置偏差密切相关。未来，在位测量需兼具高速性、实时性、高分辨率、大测量纵深、宽测量范围。实现在位测量高精度信息获取、高效率数据处理，关键在于融合局部测量 / 全局测量不确定度评定、测量单元与运动单元、多源异构数据的测量分析理论与评定方法。

三、高端光学元件超精密加工技术与装备发展趋势

（一）精度与尺寸极端化

极大尺寸、极小尺寸、极高精度的光学元件，市场需求趋于迫切：① 大口径非球面光学元件广泛应用于遥感卫星、空间望远镜、地基天文望远镜等精密光学系统，其单体主镜口径为 3~7 m；② 微结构光学功能元件在三维成像、光学聚焦、测量、冷却、减阻、润湿等方面应用广泛，相应结构尺寸可达微 / 纳米级；③ 在面形精度、表面完整性要求进一步提高后，超精密加工过程中的材料去除量降低至微米、纳米，甚至原子量级。此外，原子及近原子尺度制造[16]将能量直接作用于原子，通过构建原子尺度结构实现特定功能与性能，是新一代制造技术的趋势之一，对革新高端光学器件制造具有积极意义。

在光学元件尺寸和精度极端化的背景下，需要优化已有研究规划，适时布局以极端精度与尺度制造为代表的新一代制造技术。立足微观力学、机械制造的学科背景，积极推动机械、物理、化学、材料等学科交叉，着力开展以下基础研究：纳米及近原子尺度超精密加工的材料去除与迁移机理、光学材料多能场辅助的超精密加工新原理与新方法、光学材料超精密加工亚表面损伤的产生机理与抑制方法、光学元件近零损伤表面形成机理与工艺、复杂曲面光学元件高效超精密加工工艺，为高端光学元件超精密加工关键技术突破、先进加工工艺与装备开发筑牢基础。

（二）形状与性能一体化

激光核聚变装置、飞行器光学导引头等光学元件的服役性能，既取决于几何精度，也受到表层材料物理、化学、机械性质变化的显著影响。例如，激光核聚变装置未能实现预期的“点火”目标，重要原因在于加工缺陷抑制水平不能满足系统对辐照损伤的要求。紫外光学元件高性能超精密制造及其抗强激光损伤特性，实际上成为制约激光核聚变装置能否成功研制的瓶颈。

以加工精度作为单一评价指标，已不再满足高性能光学元件的制造要求，需要综合使用几何精度、表面完整性指标对加工质量进行全面评价。超精密光学元件加工由以往的几何形状与尺寸精度要求，提升为以性能要求为主、性能与几何参数一体化的精密加工要求，此即高性能制造[17,18]。需要建立面向使役性能要求的形状 – 性能一体化加工理论、方法以及工艺技术体系，为解决高性能光学元件的制造难题提供新方案。

（三）加工工艺复合化

高端光学元件苛刻的服役条件以及极高的性能要求，对革新光学制造技术提出迫切需求。高端光学元件表面形状复杂化、表面结构多样化和微细化，对加工效率、加工质量的要求更高，也提出了绿色低碳的环境要求。当前主流的加工技术具有局限性，如加工效率偏低、加工精度低不足、表面质量难保证、加工可达性差、环境污染风险高等，高质、高效、绿色的先进超精密加工技术成为研究趋势。

采用多能场辅助或者两种以上加工工艺复合方法，可取长补短并发挥各自优势，克服上述局限性。未来研究重点有：探索新型加工工具材料，建立新型复合加工系统，深化复合加工机理研究，拓展复合加工技术应用。复合加工技术朝着高精度、微细化方向发展，成为高端光学元件超精密加工的重要趋势；针对性开展超精密复合加工理论与技术创新研究，切实提升光学制造技术水平与市场竞争力。

（四）加工与检测一体化

超精密光学制造突出表现在高精度、高性能、高效率的叠加，加工与检测一体化是解决相应难题的主要手段，针对制造中物理、化学过程的智能化调控更显重要。制造装备、工具、工艺、检测设备等面临变革，如制造工具需在多传感器参与的感知调控下具备材料去除、添加或改性功能。在检测方面，提高精度是关键，在位、高效、稳定仍是主要目标，支持实现高质量综合评价的多物理量检测成为新发展方向。

在超精密加工与检测一体化方面，重点研究内容有：在线、在位测试与评定新原理和方法，加工装备精度的在线检测模型和系统，超精密加工机床精度指标的测试与评定系统，高精度自由曲面及微细结构测量的新原理与新方法，新型模块化、可重组、多功能测试装备技术，超精密测量误差多源分离新方法。超精密加工测量的发展趋势表现为：高精度、大量程测量，形状和位置精度的同步测量，多物理量检测表征，高性能检测的计量。

（五）装备与工艺智能化

受高端光学系统的需求牵引，复杂面形或难加工材料元件的加工效率和精度不断突破，衍生出的高端光学元件产品在通用领域得到更多应用。在通用领域中的应用规模拓展后，高端光学元件的规模化、定制化制造需求凸显，从而提出了制造设备的高效率、高精度、智能化加工要求。在世界工业新一轮技术浪潮驱动下，智能制造成为制造业的主导趋势[19]；工业强国采取积极行动，促进制造业在智能制造、智慧化生产等方向的革新发展[14]。

目前，高端光学系统的光学元件较多采用定制化的设计生产模式，根据客户特殊需要“量身定制”解决方案；生产制造企业需掌握设备生产工艺，将智能制造技术运用到细分市场产品，进而为各类产品创建自动化解决方案。着眼未来，智能制造装备企业应围绕市场需求，构建高度自动化的生产过程，对各种制造对象、各类制造环境具有良好的适应性。装备与工艺智能化发展，将融合数字孪生、大数据、人工智能等信息技术，全面提升并高效运用控制、传感、精密制造、识别等关键技术。

四、面向2035年我国高端光学元件超精密加工技术路线图研究

研究和编制高端光学元件超精密加工技术路线图，可直接支撑我国在此技术方向的中长期发展规划、技术攻关、理论探索。本研究依托相关咨询项目，集聚领域内院士、专家、学者的集体智慧，重点完成两方面工作：① 开展广泛的文献调研，与航天、航空、船舶、兵器、光学应用、机床制造等领域的企业和科研院所实地调研相结合，全面把握我国高端光学元件超精密加工技术方向的发展态势和需求情况；② 组织召开了近20次研讨会，面向86位本领域专家开展问卷调查，精准研判高端光学元件超精密加工技术方向的发展趋势，形成我国技术发展布局建议。

以2035年为目标节点形成的高端光学元件超精密加工技术及装备发展路线图（见图1），包含7个方面的内容：应用需求，发展目标，重点产品，数控系统、关键功能部件和刀具，测量方法与装备，光学元件制造共性关键技术，应用示范工程。

（一）应用需求

1. 深入实施制造强国战略的需要

国家“十四五”规划纲要提出，深入实施制造强国战略。高端光学元件作为制造业的核心基础零

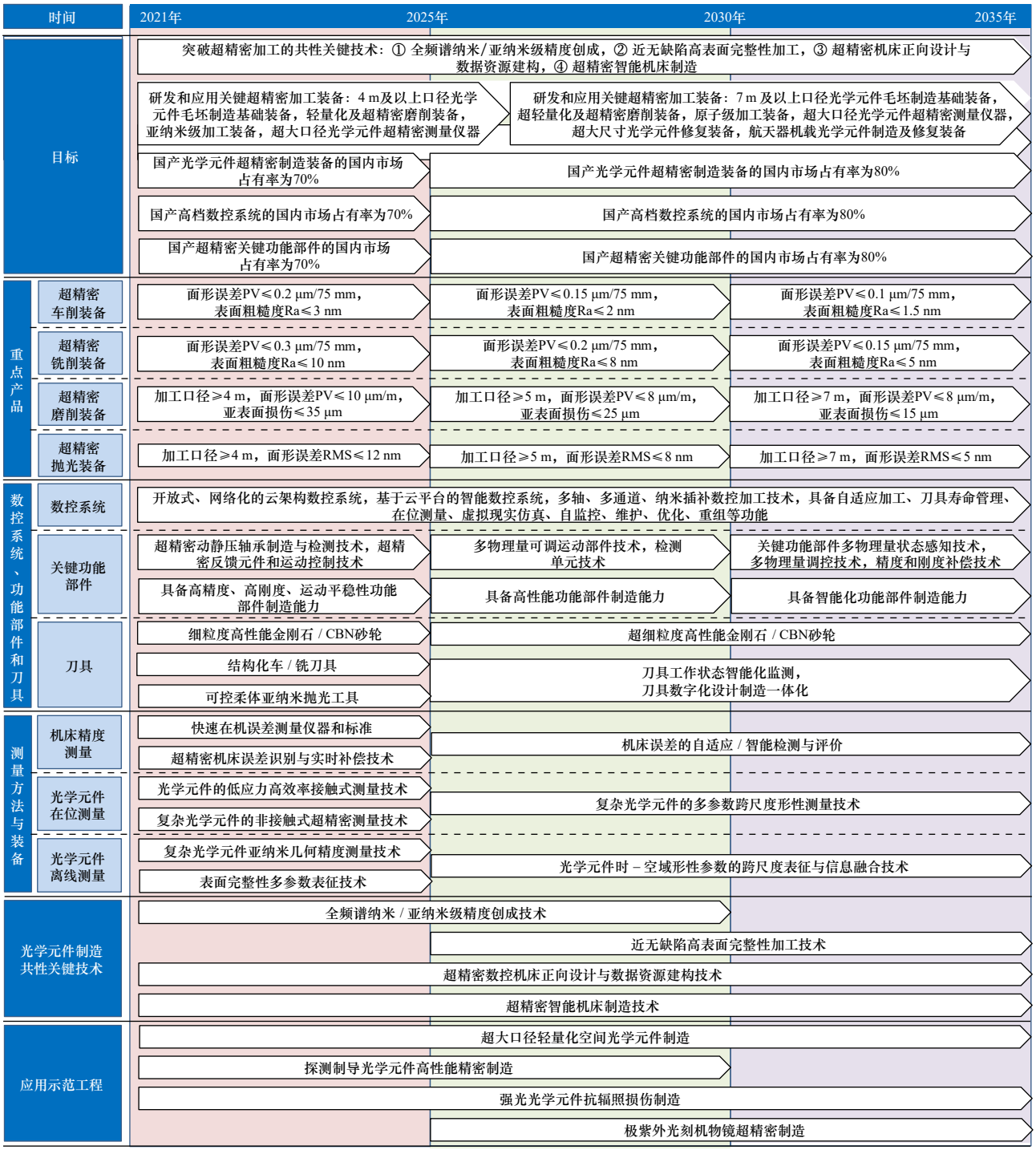

图1　高端光学元件超精密加工技术及装备发展路线图

注：PV表示从峰到谷；Ra表示轮廓算术平均偏差；RMS表示均方根；CBN表示立方氮化硼。

件，其制造技术研究对加强产业基础能力建设、推动制造业优化升级意义重大。X射线望远镜、极紫外光刻机、激光核聚变装置、自由电子激光装置、同步辐射装置等高端装备列为科技前沿领域和重大基础设施，关键光学元件的性能决定了这些高端装备的性能，而当前的制造水平不足以匹配光学元件的高性能制造需求。

2. 产业发展需求

消费电子、半导体制造、智能工业机床、红外热成像仪、车载镜头等产品，大量应用光学元件和

组件。2021 年，我国光学镜片、镜头、模组等元器件的市场规模为 1568 亿元[20]；技术更新速度快，相应市场规模将进一步扩大。国内从事高端光学元件精密制造的企业，数量较少且产品集聚在中低端，在高分辨率定焦、大倍率变焦、超高清、光学防抖、安防监控一体机镜头等中高端光学镜头制造方面的核心技术薄弱甚至部分缺失。开展高端光学元件高性能超精密制造基础理论与关键技术研究，突破国内市场格局并高质量“走出去”，是国内企业和科研机构的发展亟需。

3. 国防装备发展需求

对地观测卫星、精确制导飞行器、高能激光器等装备是国防装备信息化和现代化的重要支撑，大口径空间反射镜、飞行器整流罩、折衍混合光学元件、高能激光组件等高端光学元件是先进装备的关键零件。这些关键零件的制造水平决定了国防装备的设计性能与服役规模。然而，国产高端光学元件的超精密加工技术水平依然无法全面满足先进装备发展需求，有关技术封锁和设备禁运也客观存在，自主攻关高端光学元件超精密加工装备及其关键技术极为迫切。

（二）发展目标

1. 突破超精密加工的共性关键技术

围绕高端光学元件的超精密制造需求，重点突破全频谱纳米 / 亚纳米级精度创成、近无缺陷高表面完整性加工、超精密机床正向设计与数据资源建构、超精密智能机床制造等共性关键技术，支持光学制造技术应用从高精度提升至高性能。

2. 研发和应用关键超精密加工装备

在近期，重点研发应用亟需但未能实现自主供给商品化、属于国外禁运的重大装备，如 4 m 及以上口径光学元件毛坯制造基础装备、轻量化及超精密磨削装备、亚纳米级加工装备、超大口径光学元件超精密测量仪器。在此基础上，进一步提升重大装备性能并扩充种类，如 7 m 及以上口径光学元件毛坯制造基础装备、轻量化及超精密磨削装备、原子级加工装备、超大口径光学元件超精密测量仪器、超大尺寸光学元件修复装备、航天器机载光学元件制造及修复装备。

3. 形成超精密制造领军企业

优化以国家重点实验室、国家工程研究中心、省部级重点实验室为核心的光学元件超精密制造科研体系，引导“产学研”融合发展，推动创新资源整合升级。鼓励重点方向基础良好的企业发展成为专精特新“小巨人”企业，建设示范性智能工厂，实现关键技术的装备应用，提升产业链配套供给水平。发展光学元件超精密制造专业技术服务企业，支持形成良好的制造业生态。

4. 提升机床和单元部件的自主化率及市场占有率

打破我国光学元件加工机床行业“低端混战、中端争夺、高端失守、大而不强”的竞争格局。在国产光学元件超精密制造装备、高档数控系统、超精密关键功能部件方面，国内市场占有率近期目标均为 70%，2035 年提升至 80%。

（三）重点产品

1. 超精密车削装备

到 2025 年，面形误差 PV≤0.2 μm/75 mm，表面粗糙度 Ra≤3 nm。到 2030 年，面形误差 PV≤0.15 μm/75 mm，表面粗糙度 Ra≤2 nm。到 2035 年，面形误差 PV≤0.1 μm/75 mm，表面粗糙度 Ra≤1.5 nm。

2. 超精密铣削装备

到 2025 年，面形误差 PV≤0.3 μm/75 mm，表面粗糙度 Ra≤10 nm。到 2030 年，面形误差 PV≤0.2 μm/75 mm，表面粗糙度 Ra≤8 nm。到 2035 年，面形误差 PV≤0.15 μm/75 mm，表面粗糙度 Ra≤5 nm。

3. 超精密磨削装备

到 2025 年，加工口径≥4 m，面形误差 PV≤10 μm/m，亚表面损伤≤35 μm。到 2030 年，加工口径≥5 m，面形误差 PV≤8 μm/m，亚表面损伤≤25 μm。到 2035 年，加工口径≥7 m，面形误差 PV≤8 μm/m，亚表面损伤≤15 μm。

4. 超精密抛光装备

到 2025 年，加工口径≥4 m，面形误差 RMS≤12 nm。到 2030 年，加工口径≥5 m，面形误差 RMS≤8 nm。到 2035 年，加工口径≥7 m，面形误差 RMS≤5 nm。

（四）数控系统、关键功能部件和刀具

1. 数控系统

建立开放式、网络化的云架构数控系统，基于

云平台的智能数控系统。云上控制编程处理灵活，开放性良好，支持手机、笔记本电脑、工业计算机、虚拟现实等多种人机交互前端。突破多轴、多通道、纳米插补数控加工技术，实现自适应加工、刀具寿命管理、在位测量、虚拟现实仿真、自监控、维护、优化、重组等功能。

2. 关键功能部件

到2025年，突破超精密动静压轴承制造与检测、超精密反馈元件与运动控制等技术，具备高精度、高刚度、运动平稳的功能部件制造能力。到2030年，突破多物理量可调运动部件、检测单元等技术，具备高性能功能部件制造能力。到2035年，突破关键功能部件多物理量状态感知、多物理量调控、精度/刚度补偿等技术，具备智能化功能部件制造能力。

3. 刀具

在金刚石砂轮方面，近期具备批量生产和应用细粒度、高性能金刚石/CBN砂轮的能力，进一步发展超细粒度、高性能金刚石/CBN砂轮。在金刚石车/铣刀具方面，着重发展复合纳米结构化刀具，解决加工表面中高频误差大、加工效率和精度难以兼顾的难题。在抛光工具方面，近期发展多种可控柔体亚纳米抛光工具，进一步发展刀具工作状态智能化监测、刀具数字化设计制造一体化等技术。

（五）测量方法与装备

1. 机床精度测量

在快速在机误差测量仪器和标准方面，开发新一代测量仪器、方案和标准，破解激光干涉仪、电容传感器价格昂贵，操作复杂等难题。在超精密机床误差识别与实时补偿技术方面，开发误差溯源分析算法，高效识别几何误差；优化机床几何误差在机测量的快速解算方法，实现误差的实时补偿。在机床误差的自适应/智能检测与评价方面，探究技术机理，揭示超精密机床的几何误差与加工表面质量之间的关系及响应机制。

2. 光学元件在位测量

在光学元件的低应力、高效率、接触式测量技术方面，降低接触应力对光学元件的破坏作用，削弱针尖磨损导致的测量精度退化效应，提升接触式在位测量的效率。在复杂光学元件的非接触式纳米/亚纳米精度测量技术方面，突破机床温变、振动、污染条件下复杂光学元件几何精度的超精密检测难题。在光学元件的多模态跨尺度形性测量技术方面，实现面形精度、微观形貌、表面缺陷、亚表面损伤、残余应力等多模态、跨尺度表面特性与使役性能的快速表征。

3. 光学元件离线测量

在复杂光学元件亚纳米几何精度测量技术方面，突破高陡度非球面、自由曲面的全频谱亚纳米精度检测难题。在光学元件表面完整性的多参数、多传感器协同表征技术方面，实现光学元件多参数表面完整性的实时定量准确评价，提升加工缺陷的修复精度。在光学元件时–空域形性参数的跨尺度表征与信息融合技术方面，面向光学元件使役性能要求，形成形性一体化制造能力。

（六）光学元件制造共性关键技术

1. 全频谱纳米/亚纳米级精度创成

复杂光学元件的全频谱纳米/亚纳米级精度创成决定了光刻物镜、空间光学、强光光学等方面的应用水平，研究难度表现在：纳米精度要求稳定实现亚纳米量级的材料去除；复杂形状引起材料去除率变化，需要进行有效补偿；全频段误差、加工缺陷等影响光学性能，要求实现一致收敛和去除。现有光学加工方法较多基于经验，具有不确定性，难以克服现代光学零件加工的性能瓶颈，需要突破异质/各向异性材料纳米量级可控去除、复杂曲面可控补偿修形、弱刚度光学元件确定性去除、微弧度级斜率误差抑制、光学制造装备运动轴性能设计、复杂曲面全频段超精密检测等关键技术。

2. 近无缺陷高表面完整性加工

采用单一物理场的加工方法，很难实现高精度的近零亚表面损伤加工；原子级多物理场纳米加工机理研究匮乏，加工表面容易出现脆性裂纹、加工缺陷、表层物理和化学特性变化。研究多能场复合加工中表面完整性的动态演化过程及其影响因素，辨明实现近无缺陷高表面完整性加工的条件，需要突破面向光学元件使役性能的表面完整性设计、光学元件控域控量控性、表面加工缺陷确定性原位修复、跨尺度表面缺陷无损精确表征、多参数表面完整性多物理场表征等关键技术。

3. 超精密数控机床正向设计与数据资源建构

国产精密 / 超精密光学加工机床的精度、可靠性、稳定性，相比国际先进水平存在阶段性差距，缺乏面向机床使役性能的正逆向设计方法是导致上述差距的重要原因。超精密机床的正向设计，取决于设计资源数据库，机床的精度及刚度与机床结构、零部件精度、控制参数之间的关系模型；需要突破数控机床的功能设计、构型设计，精度设计、静 / 动刚度设计、热平衡设计，包括动力学优化、轻量化设计在内的多学科优化设计等关键技术；构建开放的工艺软件与数据库，集成完备的设计规范与标准、知识库、案例库。

4. 超精密智能机床制造

超精密机床制造技术薄弱，是国产光学加工装备性能落后于进口产品的关键因素之一。提高超精密机床制造水平，需兼顾关键零部件制造与整机装配、智能机床系统与技术的发展：对于前者，需要突破基础结构件低应力制造、高分辨率纳米 / 亚纳米运动伺服进给系统制造、工件台纳米定位与运动协同控制、超精密空气主轴与全约束闭合式油静压导轨制造、自动调平间断式空气隔振系统制造、超精密切削与高效低损伤磨抛工具制造等方面的关键技术；对于后者，需要突破高稳定性智能伺服调整、热变形智能控制、加工状态实时智能导航、五轴加工误差智能调谐、智能实时防碰撞系统、加工过程切削负载自适应智能控制、机床运行状态智能诊断与预警等关键技术。

（七）应用示范工程

1. 大口径轻量化空间光学元件制造

高分辨率对地观测系统、X 射线望远镜等空间装备，以大口径光学元件为核心功能支撑。大口径光学元件材料硬脆、面形复杂、极端轻量化，需要实现全频谱纳米级加工精度，而国产制造装备在口径、精度、效率方面均不能满足要求。建议实施大口径轻量化空间光学元件制造应用示范工程，形成 4 m 口径空间光学元件的超精密高效率磨削、抛光、修形、检测技术与国产化装备。

2. 探测制导光学元件高性能超精密制造

精密复杂惯性器件、高陡度保形光学元件等，较多采用高硬脆性材料，面临共形、气动热、高光谱、高过载等使役环境挑战；通过加工精度、材料特性、结构设计方面的耦合调控，才能获得预期的探测制导性能。建议实施面向使役性能的光学元件设计 – 加工 – 测量一体化制造应用示范工程，揭示极端服役环境下加工精度对服役性能的影响机制，形成探测制导光学元件的高性能超精密制造技术与国产化加工装备。

3. 强光光学元件抗辐照损伤制造

激光点火装置、高能激光器的强光光学元件服役于强激光环境，因加工缺陷诱导的辐照损伤成为制约相应装备性能提升的瓶颈。建议实施强光光学元件抗辐照损伤制造应用示范工程，揭示微纳米加工缺陷对抗辐照损伤性能的影响及抑制机理，形成近无缺陷强光元件的高性能制造技术和国产化磨削、抛光、缺陷抑制装备。

4. 极紫外光刻机物镜超精密制造

光刻物镜的制造水平决定着光刻机的制程精度，我国在此方向的技术基础薄弱，尚无自主可控的产品可供应用，而进口渠道不可依赖。建议实施极紫外光刻机物镜超精密制造应用示范工程，阐明原子 / 近原子尺度加工机理，形成全频谱亚纳米精度光刻物镜加工技术与国产化抛光、修形、检测装备。

五、我国高端光学元件超精密加工技术与装备发展建议

（一）优化创新体系设置，组织优势资源成立技术联盟

建议设立国家超精密加工技术协同创新中心、光学元件超精密制造技术创新联盟。采取“政产学研用”协同创新模式，积极发挥政府引导作用，形成市场主导的发展模式。强化用户工艺主导的主机研发理念，突出用户工艺应用验证，提升超精密加工机床的工艺适应性。组织企业需求对接、重大项目论证、关键技术研讨，着力解决机床正向设计与资源构建、超精密机床制造、可靠性与精度保持性、纳米 / 亚纳米精度创成、近无缺陷加工等关键技术和瓶颈环节。

（二）加大资源保障力度，布局基础研究和技术攻关计划

在国家各类科技计划中，有层次、有重点地支持光学元件超精密加工技术发展。建议设立“关键

光学元件高性能制造基础”国家自然科学基金重大项目、“光学制造基础”国家自然科学基金重大研究计划，支持突破光学元件高性能制造的基础理论与关键技术。建议接续实施“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项，增设“光学元件高性能超精密制造技术与装备”专题，为超精密数控机床发展提供关键支持。建议“高性能制造技术与重大装备”国家重点研发计划项目加大对光学元件超精密制造技术与装备的支持力度，推动光学制造共性关键技术研发与应用示范。

（三）加强人才培育，构建梯队并扩大队伍规模

机床领域相对“冷门”，在高校中的学科地位被弱化，高端人才流失现象严重，人才梯队建设较为滞后。构建本领域的国家战略科技力量，需要依托创新型领军企业、具有比较优势的科研院所，在培养、引进、用好领军人才、创新团队方面积极作为。建立高端人才引进通道，完善配套政策，运用技术入股、股权激励、成果转化收益分配等机制。培育面向工业创新需求的工程技术人才、基础扎实的应用型研发人才，合理扩大队伍规模。可在各类科技计划中增设定向项目，给与专业团队连续支持，保持研究队伍稳定。

（四）筑牢产业发展基础，培育龙头企业、专精特新“小巨人”企业

建议发布政策并配套保障资源，支持国产超精密机床、高档数控系统、高性能关键功能部件、高性能刀具的产品研发与示范应用，兼顾市场竞争力提升和自主可控能力增强。培育光学制造技术与装备方面的龙头企业，鼓励关联企业发展成为专精特新“小巨人”企业，在财税、投融资、技术研发、产品进 / 出口、知识产权、国际合作等方面给与重点支持。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 15, 2022; **Revised date:** October 8, 2022

Corresponding author: Lin Qijing is an associate professor from the School of Mechanical Engineering of Xi’an Jiaotong University. His major research fields include optical fiber sensing technology and flexible micro-nano devices. E-mail: qjlin2015@mail.xjtu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on Precision Ultra-Precision Machining Technology and Equipment for High-End Optical Systems” (2022-XY-02) and “Research on the Development Strategy of High-End Equipment for Mother Machines” (2022-XY-114)

参考文献

[1] Campbell J H, Hawley-Fedder R, Stolz C J, et al. NIF optical materials and fabrication technologies: An overview [C]. San Jose: International Society for Optics and Photonics, 2004.

[2] 江少恩, 丁永坤, 缪文勇, 等. 我国激光惯性约束聚变实验研究进展 [J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2009, 39(11): 1571–1583.
Jiang S E, Ding Y K, Miao W Y, et al. Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2009, 39(11): 1571–1583.

[3] Gopalaswamy V, Betti R, Knauer J P, et al. Tripled yield in direct-drive laser fusion through statistical modeling [J]. Nature, 2019, 565(7741): 581–586.

[4] Schmitt J H M M, Lemen J R, Zarro D. A solar flare observed with the SMM and Einstein satellites [J]. Solar Physics, 1989, 121(1): 361–373.

[5] 李大庆. 慧眼卫星成功进行X射线脉冲星导航在轨实验 [J]. 空间科学学报, 2019 (5): 565.
Li D Q. Huiyan satellite successfully conducts on-orbit experiment of X-ray pulsar navigation [J]. Chinese Journal of Space Science, 2019 (5): 565.

[6] Yao Y W, Chalifoux B, Heilmann R K, et al. Progress of coating stress compensation of silicon mirrors for Lynx x-ray telescope mission concept using thermal oxide patterning method [J]. Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems, 2019, 5 (2): 1–10.

[7] Civitani M M, Parodi G, Toso G, et al. Progress on high-resolution thin full monolithic shells made of glass for Lynx [C]. San Diego: Conference on Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy, 2021.

[8] Levinson H J. High-NA EUV lithography: Current status and outlook for the future [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2022, 61: 1–12.

[9] Martin L, Peter K, Hans-Juergen M, et al. Optics for EUV production [J]. Proceedings of SPIE−The International Society for Optical Engineering, 2010, 7636(1): 1–12.

[10] 张德福, 李显凌, 芮大为, 等. 193 nm投影光刻物镜光机系统关键技术研究进展 [J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(6): 565–581.
Zhang D F, Li X L, Rui D W, et al. Key technology progress of optomechanical systems in 193 nm projection objective [J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, 47(6): 565–581.

[11] 李国杰. “中兴事件”给科技工作的启示 [J]. 科技导报, 2018, 36(13): 1.
Li G J. The enlightenment of “ZTE incident” to science and technology work [J]. Science and Technology Review, 2018, 36(13): 1.

[12] 王磊, 卢秉恒. 中国工作母机产业发展研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 29–37.
Wang L, Lu B H. Research on the development of machine tool industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 29–37.

[13] 蔡锐龙, 李晓栋, 钱思思. 国内外数控系统技术研究现状与发展趋势 [J]. 机械科学与技术, 2016, 35(4): 493–500.

Cai R L, Li X D, Qian S S. Numerical control system: State of art and trends [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(4): 493–500.

[14] 孟博洋, 李茂月, 刘献礼, 等. 机床智能控制系统体系架构及关键技术研究进展 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(9): 147–166.
Meng B Y, Li M Y, Liu X L, et al. Research progress on the architecture and key technologies of machine tool intelligent control system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(9): 147–166.

[15] Geng Z C, Tong Z, Jiang X Q. Review of geometric error measurement and compensation techniques of ultra-precision machine tools [J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(2): 211–227.

[16] 房丰洲. 原子及近原子尺度制造——制造技术发展趋势 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(9): 1009–1021.
Fang F Z. On atomic and close-to-atomic scale manufacturing: Development trend of manufacturing technology [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2020, 31(9): 1009–1021.

[17] 郭东明, 孙玉文, 贾振元. 高性能精密制造方法及其研究进展 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(11): 119–134.
Guo D M, Sun Y W, Jia Z Y. Methods and research progress of high-performance manufacturing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 119–134.

[18] 郭东明. 高性能精密制造 [J]. 中国机械工程, 2018, 29(7): 757–765.
Guo D M. High-performance precision manufacturing [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2018, 29(7): 757–765.

[19] 臧冀原, 刘宇飞, 王柏村, 等. 面向2035的智能制造技术预见和路线图研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 285–304.
Zang J Y, Liu Y F, Wang B C, et al. Technology forecasting and roadmapping of intelligent manufacturing by 2035 [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(4): 285–304.

[20] 前瞻产业研究院. 2022—2027中国光学测试仪器行业市场前瞻与投资规划分析报告 [R]. 深圳: 前瞻产业研究院, 2022.
Prospective Industry Research Institute. Analysis report of optical testing instrument industry market prospect and investment planning in China from 2022 to 2027 [R]. Shenzhen: Prospective Industry Research Institute, 2022.