

引用格式：朱煜. 自主创新驱动下的高端装备制造突围路径——以高端光刻机工件台研发与产业化为视角. 中国科学院院刊, 2025, 40(5): 879-887, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250414004.

Zhu Y. Breakthrough path of high-end equipment manufacturing driven by independent innovation—From perspective of R&D and industrialization of high-end wafer stage of lithography machine. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(5): 879-887, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250414004. (in Chinese)

自主创新驱动下的高端装备制造突围路径

——以高端光刻机工件台研发与产业化为视角

朱煜

清华大学 机械工程系 北京 100084

摘要 文章围绕高端光刻机工件台的研发与产业化展开研究，深度剖析中国高端装备制造业的发展状况与核心挑战。研究发现，我国高端装备制造业虽有规模扩张与技术创新成果，但在核心技术自主可控方面存在不足，面临技术创新与基础能力的双重瓶颈。通过分析光刻机工件台的自主创新实践，包括核心技术攻坚、基础能力突破、产业链协同和产学研支撑体系构建等方面，总结出高端装备制造业突破技术封锁的内在规律。进而，提出高端装备研发的通用方法，涵盖自主创新的双轮驱动路径、产业链协同创新生态、制度保障体系构建，以及创新体系的协同演化规律。文章揭示了技术跃迁、能力建构和制度适配的三重核心规律，为后发国家实现技术赶超提供了“中国范式”，对保障国家产业安全、推动制造强国建设具有重要参考价值。

关键词 高端装备制造，光刻机工件台，自主创新，产业发展

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20250414004

CSTR 32128.14.CASbulletin.20250414004

1 研究背景

1.1 全球高端装备制造业竞争格局与中国的需求

当前，全球高端装备制造业竞争态势日趋激烈，发达国家通过构建严密的技术壁垒维持其产业主导地位。

以半导体制造设备领域为例，美国通过立法手段联合盟友实施技术封锁，荷兰在极紫外光刻机等关键设备上对中国实施严格出口管制。这种技术垄断格局使得中国在高端数控机床、集成电路制造装备等战略性领域面临严峻挑战。在此背景下，实现高端装备制

修改稿收到日期：2025年5月13日

制造业的自主可控发展，已经成为关乎国家产业安全和经济安全的重大战略课题。

1.2 光刻机工件台：“卡脖子”技术的代表性产品

作为半导体制造装备的核心子系统，光刻机工件台的技术水平直接决定了光刻机的精度和产率。光刻机市场霸主荷兰阿斯麦（ASML）公司在工件台技术领域已建立起完整的技术体系和专利壁垒，而中国在该领域长期处于受制于人的状态。光刻机工件台技术研发涉及超精密机械、超精密位移测量、超精密运动控制等多个学科领域的深度融合，其技术复杂度代表了现代装备制造业的最高水平。本文选择光刻机工件台作为研究对象，不仅因其集中体现了中国高端装备制造业面临的共性技术瓶颈，更因其突破经验对其他关键装备的自主创新具有重要的参考价值。

1.3 自主创新：破解技术封锁的系统性路径

实践表明，高端装备领域的核心技术突破无法通过传统的技术引进方式实现。在工业机器人、高端数控机床等多个领域，尽管中国市场规模庞大，但关键功能部件仍严重依赖进口。近年来，国内科研团队在光刻机关键子系统研发中取得系列突破，通过原创性的总体方案设计、测控技术的创新突破，以及关键材料零部件的自主研发，初步探索出了一条自主创新的可行路径。本文旨在通过对光刻机工件台创新实践的深入分析，系统总结高端装备制造业突破技术封锁的内在规律，为构建自主可控的产业技术体系提供理论支撑和实践指导。

2 中国高端装备制造业的发展现状与核心挑战

2.1 发展现状与政策支持

近年来，中国高端装备制造业呈现出规模扩张与技术创新并进的发展态势。在智能制造装备、航空航天装备、海洋工程装备等重点领域，产业规模持续扩大，技术创新能力逐步提升。长三角、珠三角和京津

冀等区域已形成具有明显集聚效应的产业集群，展现出较强的发展活力。然而，与国际先进水平相比，我国高端装备制造业仍存在明显的结构性差距，特别是在核心技术自主可控方面面临严峻挑战。

为促进产业高质量发展，国家已构建了较为完善的政策支持体系。从中国制造强国发展战略到《“十四五”智能制造发展规划》，一系列顶层设计为产业发展指明了方向。通过国家科技重大专项实施、创新平台建设、金融财税支持等多措并举，形成了推动产业创新的政策合力。创立科创板等措施也为高端装备制造企业提供了重要融资渠道。这些政策措施有效提升了产业创新能力，但在资源配置和政策协同方面仍有优化空间。

2.2 技术创新与基础能力的双重瓶颈

尽管中国高端装备制造业在规模和创新方面取得了一定成绩，政策支持也为产业发展奠定了基础，但不可忽视的是，在迈向产业高端化的进程中，仍面临诸多深层次问题。中国高端装备制造业在取得规模扩张和技术创新进展的同时，面临着技术创新与基础能力的双重瓶颈。如前文所述，虽然产业规模有所扩大，技术创新能力也在逐步提升，但在核心技术自主可控方面，仍存在严峻挑战。这主要体现在4个关键领域。

（1）核心技术对外依赖与基础研究薄弱。中国高端装备制造业在核心技术自主可控方面面临严峻挑战，关键领域对外技术依赖程度较高。特别是在半导体设备、高端数控机床等战略性产业，核心技术和关键部件仍主要依赖进口。造成这一局面的深层次原因在于基础研究投入相对不足，原创性技术储备较为薄弱。例如，在半导体制造设备领域，中国在光刻机、刻蚀机等关键设备的核心技术上仍与国际先进水平存在较大差距。要解决这一问题，需要进一步加强基础研究投入，提升原创性技术储备，同时借鉴其他国家的成功经验，探索适合中国国情的技术创新模式。

(2) **材料、工艺、部件的系统性短板。**在基础材料、核心工艺和关键零部件等领域存在明显的技术短板。这些基础能力的不足直接制约了整机装备的性能提升和可靠性保障。以高端数控机床为例，其关键零部件如主轴、丝杠等仍依赖进口，严重影响了中国数控机床产业的自主可控发展。因此，加强基础能力建设，突破关键核心技术，是中国高端装备制造业实现自主可控发展的关键。

(3) **产业链协同效率不高。**当前，集成电路产业生态面临供需对接不畅的突出问题，一方面难以适应高端装备“小批量、多品种”的制造特点，另一方面更突出表现为“三不用”的协同困境——国产零部件不愿采用国产材料，国产装备不愿使用国产零部件，下游制造企业不愿采购国产装备。这种上下游之间的信任缺失导致产业链协同创新机制难以建立，配套企业与整机厂商的合作多停留在简单供应层面，缺乏深度技术协作，严重制约了国产化替代进程和整体创新效率的提升。要打破这种信任缺失的局面，需要建立信任机制，加强行业标准建设，推动产业链上下游企业之间的深度合作。

(4) **制度环境与人才瓶颈。**在创新投入方面，存在“撒胡椒面”式分散投入的情况，导致资源分散、支持强度不足等问题。人才结构性矛盾突出，复合型人才缺口大，特别是同时精通机械、控制和材料的跨学科人才极度匮乏。更值得关注的是人才流失问题，集成电路行业领军人才流向互联网等新兴领域的比例很高。这些制度性因素导致创新成果转化效率不高，制约了产业竞争力的提升。因此，需要优化人才政策，吸引和留住高端装备制造业的优秀人才，为产业创新发展提供有力的人才支撑。

这些挑战相互关联、彼此影响，构成了一个复杂的系统性难题。要破解这一困境，需要从技术创新、产业协同和制度环境等多个维度协同发力，构建系统性的解决方案。

3 光刻机工件台的自主创新突破实践

要破解上述产业链协同困境，急需探索切实可行的自主创新路径。光刻机工件台的研发历程为此提供了极具价值的实践样本。作为光刻机中技术难度和复杂度最高的核心子系统之一，工件台的突破不仅需要攻克单项技术难题，更需构建从基础研究到产业应用的完整创新生态。通过剖析这一典型案例，可以提炼出具有普遍意义的自主创新方法论。

3.1 核心技术攻坚

光刻机工件台的研发历程深刻印证了自主创新与技术预研的战略协同价值。2001年，ASML公司推出全球首台双工件台光刻机。2003年，在业界对该技术仍有诸多质疑时，清华大学IC（集成电路）装备团队（以下简称“团队”）基于对技术代际跃迁的前瞻研判，申请国内首个双工件台发明专利，开创性地跳过了单工件台研究阶段。2年后，团队注意到平面电机在双工件台方面的独特优势，开展了探索性研究，并于2006年发表国内首篇相关学术论文。这一探索性研究为后续技术跨越奠定了基础。至2008年，团队成功研制出首台缩尺双工件台实验装置，虽仍沿用“直线电机+气浮导轨”架构，但为后续双工件台自主创新提供了重要支撑。

2009年集成电路制造相关国家科技重大专项（以下简称“国家重大专项”）启动时，团队面临重大技术路线抉择。彼时，ASML公司已推出磁悬浮平面电机架构的第二代产品，性能较前代显著提升。若延续既有技术路径，团队将面临“研制完成即落后”的困境。尽管平面电机路线在理论、技术和工程实现层面存在巨大挑战，但面对国家重大战略需求，团队深刻认识到必须打破“研制—落后—再研制”的恶性循环，毅然选择该技术路线。通过创新性的双工件台方案和一系列关键技术突破，团队发明了气/磁浮平面电机双工件台架构、8电机冗余驱动的微动构型、基于

零相位误差跟踪前馈和变增益反馈相结合的控制方法、超稳定动态平衡体系，成功研制出中国首个平面电机双工件台样机。

工件台测量反馈系统的突破路径同样体现了自主创新和战略预判。2009年，ASML公司推出新一代光刻机双工件台系统，其测量反馈系统采用了平面光栅位移测量技术，立即引发团队高度关注。当时，国内主流技术仍固守双频激光干涉测量，团队于2010年率先启动平面光栅技术的预研工作，超前布局下一代测量体系。2011年，团队成功研制出国内首台平面光栅干涉仪原型，并创造性提出零差条纹锁定干涉扫描光刻方案，有效解决了大尺寸光栅制造中的条纹畸变难题。这些工作为2017年国家重大专项启动平面光栅位移测量系统研制奠定了研究基础。专项启动后，经过艰苦攻关，团队突破一系列关键技术，发明了创新的外差式平面光栅干涉测量技术，开发出异形米级平面光栅超精密制造工艺体系，提出工件台全位姿皮米精度实时解算算法，构建了平面光栅系统的高可靠集成方案，实现了尖端光刻机亚纳米精度、高动态位移测量技术突破。

双工件台和平面光栅方面的自主创新取得了重大效果，国产光刻机在总体架构上追平了ASML公司，并且具备自主知识产权，实现了技术架构的跨越式发展。双工件台与平面光栅的双重突破，不仅验证了自主创新路径的可行性，更揭示了高端装备突围的核心逻辑：在技术代际切换的窗口期，唯有通过前瞻布局与持续预研，才能突破路径依赖，构建自主可控的技术体系。双工件台架构创新打破了技术封锁，平面光栅测量技术突破进一步实现了从跟跑到并跑的跨越。这些实践表明，战略预判是技术突围的起点，自主创新是破解封锁的关键，而长期投入则是成果落地的保障。同时，这一过程也凸显了在自主创新中，勇气和决心是推动技术突破的重要力量。将战略预判、自主创新、长期投入与坚定决心相结合，就是实现技术突

破的有效方法论。这一方法论为光刻机技术生态的全面自主化奠定了基石，更为中国突破其他“卡脖子”领域提供了可复制的创新范式。

3.2 基础能力突破

光刻机工件台的自主创新必须突破基础能力发展瓶颈，但这一进程长期受制于特殊市场生态与技术封锁的双重压力。在市场化层面，分散的应用场景难以聚合有效需求，基础材料、零部件和工艺的研发面临投入产出失衡的困境；在技术层面，国外企业凭借先发优势构筑专利壁垒，通过控制关键材料供应和精密加工技术实施封锁。这种复合型障碍导致国内产业链陷入“研发高风险—市场低收益”的恶性循环。

面对复杂挑战，国家重大专项创新性地构建了需求聚合与风险共担机制。通过国家战略牵引整合碎片化需求，依托专项资金的杠杆效应撬动产业链协同，形成“基础研究—技术转化—商业应用”的闭环体系。在此框架下，清华大学与北京华卓精科科技股份有限公司（以下简称“华卓精科”）联合团队（以下简称“联合团队”）联合上下游企业，针对3个关键领域展开攻关。

（1）基础材料方面。高性能堇青石陶瓷已经替代微晶玻璃成为当今最先进光刻机工件台的关键基础材料，其制备和加工技术长期被日本垄断，严重制约了中国光刻机工件台的发展。面对国外的技术封锁和禁运，联合团队与国内企业通力合作，突破了原料合成、毛坯成型、无缺陷烧结工艺和精密光学加工等一系列关键技术，开发出高性能堇青石结构件。这一成果不仅打破了国外技术垄断，还使中国成为全球少数掌握超低膨胀陶瓷量产技术的国家之一，大幅提升了光刻机工件台的性能。

（2）基础零部件方面。超薄吸盘作为光刻机工件台的关键零部件，对精度、硬度和热稳定性的要求极高，国内在这一领域的制造技术滞后。为解决这一问题，联合团队与上游的材料制备企业和下游的精密加

工企业联合进行工艺开发，通过创新设计和工艺优化，突破了导电率可控材料制备、吸盘凸点高效、高精度加工和吸盘面形超精密抛光等关键技术，成功开发了高性能超薄吸盘。这一成果不仅降低了进口依赖，补上了国产光刻机工件台的一块短板，还进一步扩展到进口光刻机超薄吸盘的国产维修维护领域，提升了中国集成电路制造的自主可控能力。

(3) 基础工艺方面。平面电机磁钢阵列作为光刻机工件台的核心部件，其制造涉及高精度磁钢装配、磁场均匀性控制，以及大面积表面高精度加工等技术难题。这些技术长期以来属于国外企业的专有技术(know-how)，对中国光刻机工件台的研发形成了技术壁垒。为突破这一技术瓶颈，联合团队通过创新研发，成功开发出智能纠错工装系统，发明了周期磁场一致性控制技术，掌握了表面保护层的精密加工工艺，攻克了高效、高安全性和高精度装配工艺，最终成功制备出高性能的磁钢阵列，大幅提高了工件台的性能和可靠性。

通过以上基础能力的突破，中国在光刻机工件台的研发和制造中取得了显著进展，为实现光刻机工件台的自主可控发展奠定了坚实基础。这些突破不仅提升了光刻机工件台的性能和可靠性，还为光刻机产业链的协同发展提供了有力支撑。在更广泛的高端装备制造领域，基础能力的突破同样具有重要意义。面对国外的技术“封锁”和“禁运”，通过长期的科研投入、跨学科合作和国家政策支持，即使在技术垄断的领域，也能够实现自主可控的发展。

3.3 产业链协同

在核心技术攻关过程中，联合团队通过建立高效的产业链协同机制，成功打通了从基础零部件到整机集成的全链条创新路径。这一机制的核心在于充分发挥国家重大专项的统筹协调作用，构建起“供应商—研发联合体—整机厂—终端用户”“四位一体”的协同创新体系。

在微晶玻璃方镜的国产化过程中，面对国外供应商交付周期严重滞后的困境，联合团队与整机厂商密切配合，通过优化设计方案显著降低了加工难度。在国家重大专项的协调支持下，国内4家重点企业（包括承担国家重要任务的大型国企）共同参与攻关，最终有3家成功突破关键技术，实现了这一核心光学零件的自主可控。这一案例充分体现了国家重大专项在整合产业资源方面的关键作用。

针对某型号高端光刻机平面电机专用线圈的供应难题，联合团队创新性地采取了“工艺反哺”的培育模式。由于该特种线圈用量小、工艺特殊，市场缺乏现成供应商。联合团队不仅自主开发了全套制造工艺，还专门定制生产装备提供给合作企业，通过这种深度协作的方式成功培育出合格的供应链企业。这种模式为其他关键零部件的国产化提供了可借鉴的经验。

在技术路线选择方面，用户需求的深度参与发挥了决定性作用。在某型号光刻机研发初期，联合团队基于现有基础拟采用双频激光干涉仪方案。但在国家重大专项组织的协同论证中，终端用户从实际应用需求出发，坚持推荐更具前瞻性的平面光栅技术路线。这一建议最终被采纳，不仅避免了技术路线的反复，更直接促成了中国在该领域的跨越式发展。

国家重大专项创新实施的“大生产线验证”机制，为产品快速迭代优化提供了重要平台。以干式光刻机工件台为例，在产线验证过程中，联合团队与整机厂、用户工艺部门紧密配合，累计解决各类问题数百项，使设备正常工作时间从初期不足50%稳步提升至90%以上，接近国际先进水平。这种“边验证、边改进”的模式，极大地加速了产品成熟和产业化进程。

通过上述4个典型案例可以看出，光刻机工件台的突破不仅依靠技术创新，更得益于国家重大专项构建的特色协同机制。该机制实现了3个关键突破：①打

破了传统产学研合作中“重研发轻应用”的局限，真正形成需求牵引的研发模式；②解决了单一企业难以协调行业资源的困境，通过国家重大专项实现产业链协同；③建立了快速迭代的产品优化通道，大幅缩短了从实验室到产线的转化周期。这些经验对我国高端装备的自主创新具有重要的示范意义。

3.4 产学研支撑体系构建

光刻机工件台技术的突破离不开国家科技计划的长期稳定支持和产学研协同创新机制的持续完善。这一支撑体系的构建包括3个方面，形成了具有中国特色的技术创新模式。

(1) 在制度支撑方面，国家科技计划的持续投入为技术攻关提供了根本保障。从“十五”期间“863”计划的前瞻性布局，到2008年启动国家重大专项，国家对光刻机技术的支持周期长达20余年。这种长期稳定的投入机制，使得研发团队能够突破一般科研项目的短期考核约束，开展真正需要“十年磨一剑”的硬科技攻关。国家重大专项实施过程中创新的“产业链协同攻关”组织模式，更是有效地解决了高端装备研发中常见的“碎片化”问题：通过专项办公室的统筹协调，实现了基础研究、关键技术攻关、样机研制和产业化的无缝衔接。

(2) 在产学研协同方面，形成了“清华大学技术转移→华卓精科产业化→反哺理论创新”的良性循环。清华大学IC装备团队在超精密机械及测控领域的基础研究成果，通过专利许可和技术入股的方式向华卓精科实现转化。产业化过程中产生的工程问题，如平面电机散热设计、微动台可靠性提升等，又反馈至学校实验室，催生了一批具有国际影响力的理论成果，包括在IEEE（电气电子工程师学会）顶级期刊发表的系列论文。这种“实践—理论—再实践”的螺旋上升模式，不仅加速了技术成熟，更培养了一支既懂理论又懂工程的复合型人才队伍。特别值得关注的是专项实施过程中形成的“三线并进”管理机制：在基

础研究线，保持对平面电机、精密测量等前沿方向的持续探索；在工程研发线，聚焦产品样机研制和性能优化；在产业化线，提前布局供应链培育和工艺标准化。“三线”通过国家重大专项建立的定期会商机制保持协同，确保技术创新既具有前瞻性，又能快速转化为产品竞争力。这种管理模式有效平衡了技术先进性与工程可行性的关系，为其他重大装备的研发提供了重要参考。

(3) 在人才培养方面，通过专项实施形成了独特的人才梯队建设模式。以清华大学IC装备团队为例，在20年攻关过程中培养了上百名硕士、博士研究生和博士后；这些人才既参与基础理论研究，又深入工程一线，毕业后多数成为行业技术骨干。国家重大专项建立的“旋转门”机制，允许科研人员在高校和企业之间双向流动，既保持了学术活力，又确保了工程经验的传承。这种人才培养模式，从根本上解决了高端装备领域“人才断层”的隐患。这一支撑体系的成功实践表明，重大技术突破需要构建3个层面的保障：国家层面，需要建立超越任期的长期投入机制；组织层面，要形成产学研深度融合的创新联合体；个人层面，需构建有利于科技人才长期成长的激励机制。光刻机工件台的突破，正是这3个层面协同发力的结果，这一经验对我国攻克其他“卡脖子”技术具有重要的借鉴价值。

上述实践为我国高端装备制造提供了可复制的创新范式，其核心在于构建技术突破、能力建设、产业链协同与制度保障的协同体系，这一逻辑将在本文第4节展开论述。

4 高端装备研发的通用方法

高端装备制造业的自主创新本质是技术能力、产业生态与制度体系的协同演化过程。我国通过光刻机工件台等领域的突破，形成了具有普适性的创新范式，其核心在于构建“技术突破—能力构建—生态协

同一制度保障”的闭环体系。

4.1 自主创新的双轮驱动路径

技术突破需遵循“预研储备—代际跨越”的演进逻辑。企业需建立技术预警机制，提前5—10年布局下一代技术方向，通过原理验证、工程实现、性能优化三阶攻坚实现跨越。例如，中国光刻机双工件台研发就是通过预判ASML公司的技术路线实现架构创新，验证了预研储备的战略价值。这种模式要求企业保持高强度研发投入，同时通过产学研合作加速技术成熟。

基础能力建设需构建系统性突破路径。针对材料、工艺、部件的“卡脖子”问题，需整合产业链需求，形成“需求聚合—协同攻关—量产应用”链条。材料端通过联合攻关实现高性能材料国产化，工艺端开发智能制造技术解决精密加工难题，部件端建立首台套验证机制提升可靠性。这种系统性突破需打破“重整机轻配套”的路径依赖，将基础能力提升作为技术自主的底层支撑。

4.2 产业链协同创新生态

产业链协同需破解“三不用”困境，构建需求牵引的协同机制。国家层面通过科技计划整合用户工艺参数、装备技术指标与部件研发路线，形成三维需求对接模型。行业龙头企业牵头组建创新联合体，联合高校、材料企业与装备厂商开展跨领域攻关，共享实验数据与工艺包。这种协同网络通过风险共担机制降低创新成本。例如，采用“专项资助+企业配套+首台套补贴”组合模式，激发企业创新积极性。

产品成熟需依赖验证驱动的迭代机制。建立实验室研发、中试基地验证、示范产线应用的三级验证体系，通过实际工况数据优化工艺参数。例如，某高端装备在产线验证中累计解决数百项工程问题，产品稳定性显著提升。同时，建立“问题反哺—标准固化”闭环，将验证经验转化为行业标准，加速技术扩散与市场应用。

4.3 制度保障体系构建

制度设计需平衡长期战略与短期效益。政府设立10年周期专项基金，推行研发费用加计扣除、首台套保险等政策，引导企业将营收的15%—25%投入研发。开放技术路线竞争，实施动态评审机制优化资源配置，避免路径锁定。人才培养方面，构建高校理论培养、企业工程实践、国际交流提升“三位一体”体系，设立跨学科交叉培养计划，破解复合型人才短缺难题。

4.4 创新体系的协同演化规律

技术、产业、制度的耦合关系构成创新生态核心。技术突破驱动产业升级，倒逼制度创新；制度保障为技术持续突破提供支撑，形成良性循环。后发国家可通过“需求规模优势+制度整合能力”实现赶超：庞大的应用场景为国产装备提供验证机会，集中力量办大事的体制能够整合产业链资源，突破单点技术封锁。这种协同演化要求动态调整政策工具，平衡长期投入与市场活力，最终实现从技术自立到产业自主的跨越。

5 结论

本文通过剖析光刻机工件台的自主创新实践，揭示了高端装备制造业突破技术封锁的深层规律，构建了“技术—产业—制度”协同演化的创新体系理论框架。研究发现，技术突破需遵循“预研储备—代际跨越”的演进逻辑，通过原理验证、工程实现、性能优化三阶攻坚实现跨越；基础能力建设需整合产业链需求，形成“需求聚合—协同攻关—量产应用”链条；产业链协同需破解“三不用”困境，构建需求牵引的协同机制；制度设计需平衡长期战略与短期效益，建立专项基金、首台套政策、人才特区等精准支持体系。

本文揭示了高端装备自主创新的三重核心规律：① 技术跃迁规律表现为通过“弯道超车”实现代际跨越，如光刻机双工件台研发是通过预判国际技术路线

实现架构创新；②能力建构规律呈现“基础突破—系统集成—生态重塑”的层级演进，基础材料、工艺、部件的系统性突破是技术自主的底层支撑；③制度适配规律要求构建“长期投入—竞争择优—协同治理”制度体系，国家重大专项的需求牵引机制为复杂技术攻关提供了制度范本。

实践表明，实现高端装备自主可控需推进“三化协同”：①**技术攻关专班化**，依托国家战略科技力量组建跨领域攻关联合体，突破精密控制、纳米测量等共性技术群；②**产业链协同生态化**，建立“需求聚合—验证迭代—标准固化”创新闭环，通过大生产线验

证机制加速工艺成熟；③**制度供给精准化**，完善“专项基金+首台套政策+人才特区”政策组合，引导企业将更多的营收投入研发。

面对全球技术格局重构，未来需重点关注3个方向：①人工智能与高端装备的深度融合路径，突破智能控制算法等关键技术；②绿色制造技术对产业升级的驱动机制，构建低碳化创新生态；③全球技术治理格局下的开放创新策略，在“双循环”中提升技术话语权。本文为后发国家实现技术赶超提供了“中国范式”，其理论框架与实践路径对保障国家产业安全、推动制造强国建设具有重要参考价值。

Breakthrough path of high-end equipment manufacturing driven by independent innovation

—From perspective of R&D and industrialization of high-end wafer stage of lithography machine

ZHU Yu

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Focusing on R&D and industrialization of wafer stage of high-end lithography machine, this study deeply analyzes the development status and core challenges of China's high-end equipment manufacturing industry. The study finds that although China's high-end equipment manufacturing industry has achieved scale expansion and technological innovation, there are still deficiencies in the independent control of core technologies, facing the dual bottlenecks of technological innovation and basic capabilities. By analyzing the independent innovation practices of wafer stage, including aspects such as core technology breakthroughs, basic capacity enhancements, industrial chain collaboration, and the construction of industry-university-research support systems, the internal laws for the high-end equipment manufacturing industry to break through technological blockades are summarized. Furthermore, a general method for high-end equipment research and development is proposed, covering the dual-drive path of independent innovation, the collaborative innovation ecosystem of the industrial chain, the construction of an institutional guarantee system, and the collaborative evolution law of the innovation system. The research reveals the three core laws of technological leapfrogging, capacity building, and institutional adaptation, providing a "Chinese paradigm" for late-developing countries to achieve technological catch-up, which has important reference value for ensuring national industrial security and promoting the construction of a manufacturing powerhouse.

Keywords high-end equipment manufacturing, wafer stage, independent innovation, industrial development

朱 煜 清华大学机械系长聘教授。主要研究领域:超精密动力学系统与控制、纳米精度工程与测控技术、集成电路(IC)制造装备等。E-mail: zhuyu@tsinghua.edu.cn

ZHU Yu Ph.D. in engineering, Tenured Professor in the Department of Mechanical Engineering at Tsinghua University. His research focuses on ultra-precision dynamics system and cybernetics, nano-precision engineering and measurement control technology, IC manufacturing equipment, etc. E-mail: zhuyu@tsinghua.edu.cn

■责任编辑:岳凌生