张学军李龙响团队 LAM综述
大口径光学元件先进制造

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/43000.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

张学军李龙响团队 LAM综述 大口径光学元件先进制造。 Light: Advanced Manufacturing 综述解读

中国科学院长春光机所张学军院士、李龙响团队

大口径光学元件先进制造

大口径光学望远镜是精细天文观测等领域的基石，光学元件的尺寸和精度是决定望远镜性能的核心要素。

聚焦大口径光学元件先进制造，中国科学院长春光机所张学军院士、李龙响研究员团队在 Light: Advanced Manufacturing 发表长篇综述（图1），以国际重大望远镜项目为典型案例，系统梳理大口径光学元件的加工与检测技术。文章对比了当前主流的整体单镜与拼接镜制造路线，综述了光学加工和检测中的核心技术方法，展望了大口径光学元件纳米级精度、批量化一致性、自动化智能化等光学制造发展方向。

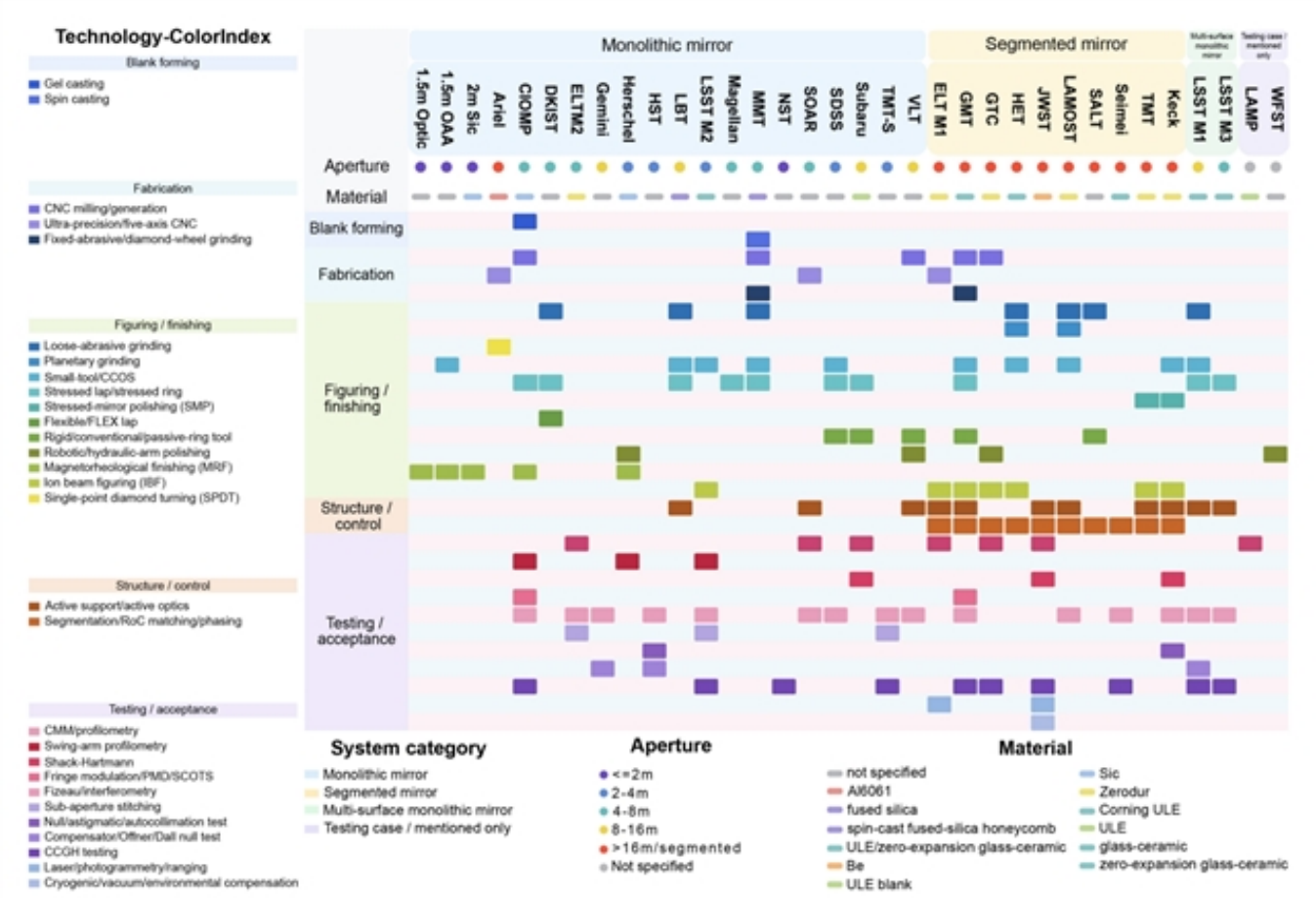


图1 光学加工及检测技术综述案例汇总示意图

观测需求驱动：大口径光学元件的技术演进与制造挑战

大口径望远镜通过提升集光能力和角分辨率，支撑暗弱目标和精细结构的观测。地基与空间望远镜面临不同工程约束，前者主要受重力、热环境、风振和大气扰动等影响，后者则更关注轻量化、发射条件和在轨稳定性等，由此形成不同的结构设计与加工检测路线。

从GTC、Keck到正在建造的39.3米E-ELT，地面光学望远系统不断刷新着光学加工、检测、装调等极限；空间望远镜虽能摆脱大气干扰，但必须兼顾轻量化、发射振动、真空低温以及在轨波前稳定性等，从2.4米的哈勃望远镜到6.5米可展开拼接式詹姆斯·韦伯望远镜，对镜体轻量化、光学元件制造精度、光学元件几何参数一致性等关键指标的要求不断提升。如图2所示，整体单镜与拼接镜等不同望远镜主镜架构模式的提出，催生了与之匹配的光学加工与检测技术路线。

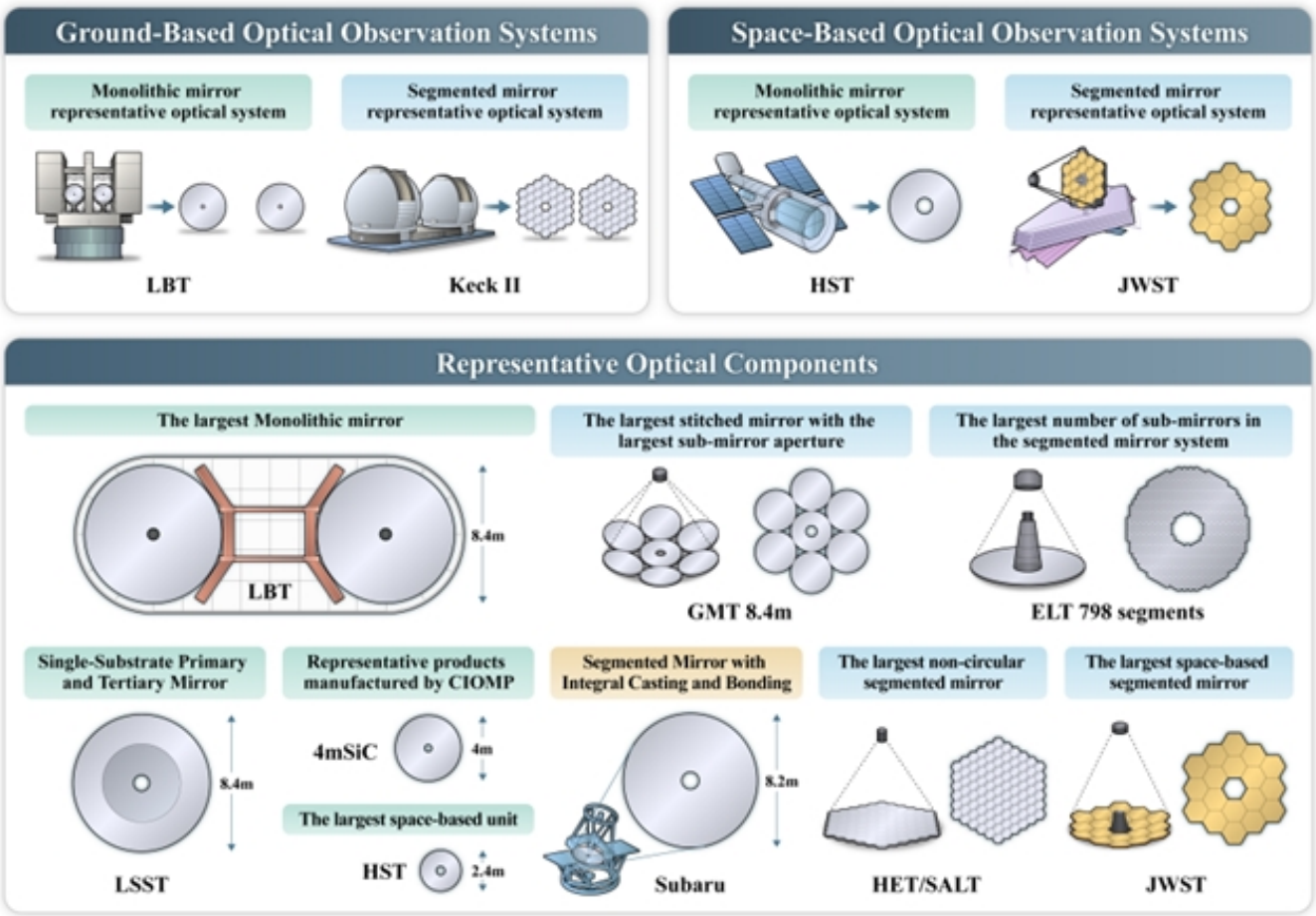


图2 地基与空间光学观测系统及代表性光学元件

制造体系：从表面成型到精密修形的多工艺接力

大口径光学元件制造是一条由材料、结构、工艺、装备和测量等共同构成的工程链条。镜坯与支撑决定加工基础，成型与磨削建立基本曲面，精密抛光逐级压缩表面误差，检测反馈则持续指导加工材料去除策略的修正，光学元件的精度正是在多种技术的连续接力中逐级提升。

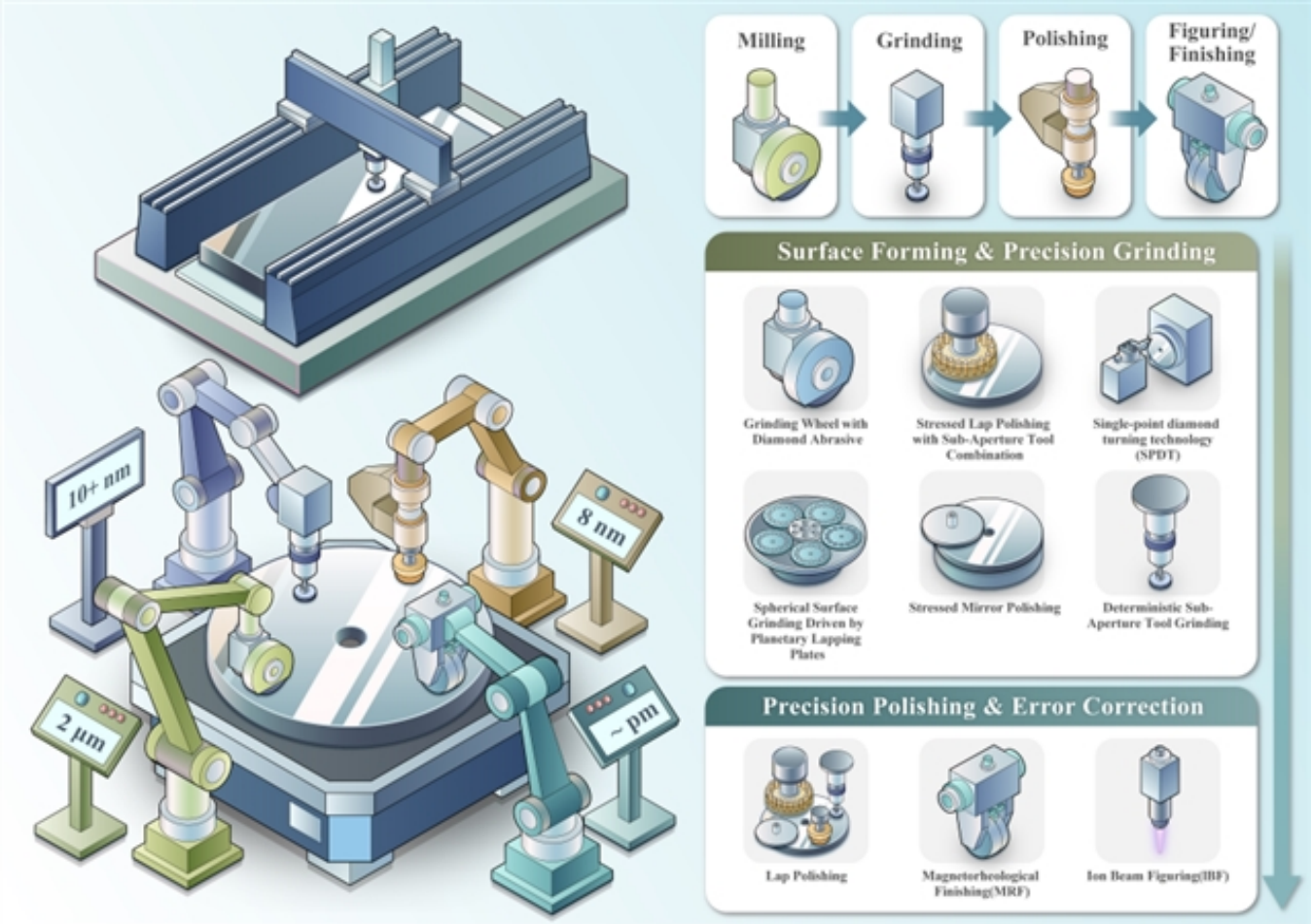


图3 大口径光学元件制造全流程集成化工程链示意图

表面成型与磨削：效率与精度的初次平衡

表面成型与磨削需要在高效去除材料、控制亚表面损伤、提升面形精度和保留后续加工余量之间取得平衡。砂轮等固着磨料适合大口径光学元件曲面粗成型，松散磨料研磨等则适合快速抑制砂轮等固着磨料磨削引起的刀痕及亚表面破坏层。两类工艺需依据材料和曲面特征选择衔接点；拼接镜还需同步控制子镜曲率、边缘效应等问题。

精密抛光阶段：从整体面形到局部残差的逐级收敛

抛光阶段，材料去除由大量去料转向确定性修正，形成检测—修正的迭代闭环。应力盘等大尺寸工具适合修正需要较大材料去除量的整体低频误差、平滑中高频误差等，磁流变抛光和离子束修形等方法更适合修正需要较小材料去除量的面形误差，进行最终精度控制。大口径光学元件先进制造不存在万能工艺或万能方法，真正有效的路线是根据材料、曲面、误差尺度和应用等要求和现实工况，对不同技术、不同方法进行充分组合和协同。

制造装备体系：从专用机床到集成化制造平台

大口径光学元件的加工装备，正经历从单一功能机床到跨尺度、多工具和多装备协同的技术体系变革。超精密成型、研磨、抛光、确定性修形等装备正在逐步与运动控制、环境补偿、在线计量

检测、数据驱动等深度融合。不同光学制造方法进行集成化组合应用，形成集成化光学制造平台，正是大口径光学元件制造先进性的体现之一。

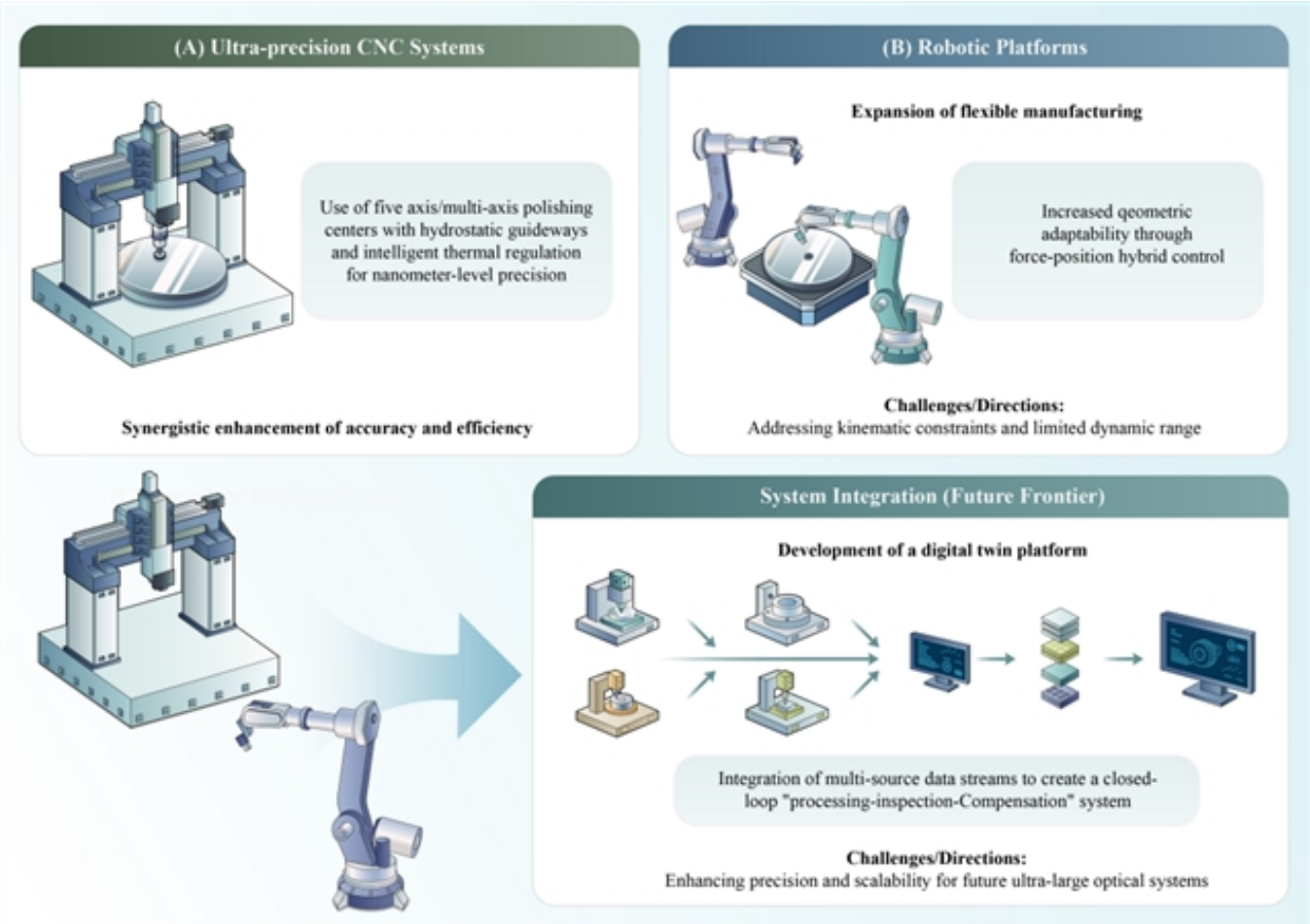


图4 大口径光学元件制造设备示意图：分类与未来发展趋势

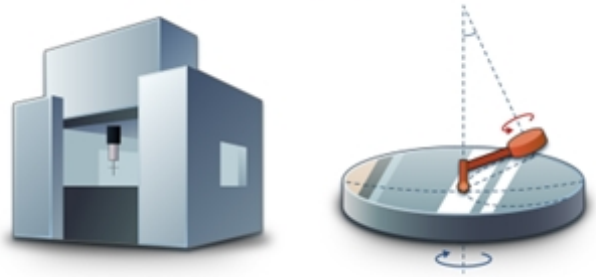
检测体系：全流程检测驱动的闭环误差控制

高精度的光学加工依赖于高精度的光学测量，不可能制造出无法测量的东西（If you can’t measure it, you can’t make it）。大口径光学元件各阶段的测量结果将为加工方法选择及加工参数规划提供定量依据，光学检测应具有与加工阶段相匹配的检测精度、动态范围和测量稳定性。如图5所示，随着镜面由粗加工进入精抛光、确定性修形等流程，检测方法也随之由大动态范围亚毫米／微米级测量，转向纳米级高精度测量。

Testing Technology for Large Aperture Optical Mirrors

Rough Generation Stage

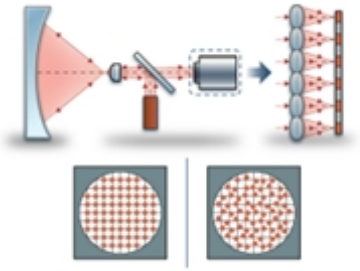
Profilometry



Coordinate Measuring Machines

Swing-Arm Profilometry

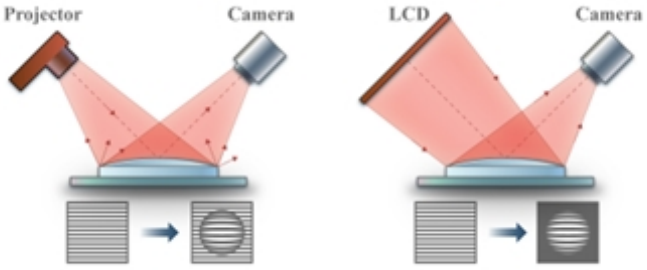
Aperture-Based Metrology



Shack-Hartmann Wavefront Sensing

Polishing and Figuring Stage

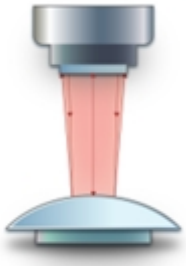
Fringe Modulation Techniques



FPM

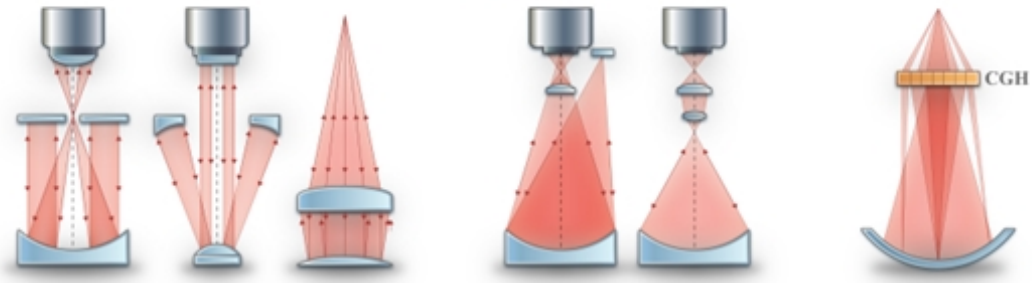
PMD

Non-Null Testing



Sub-Aperture Stitching Interferometry

Null Testing



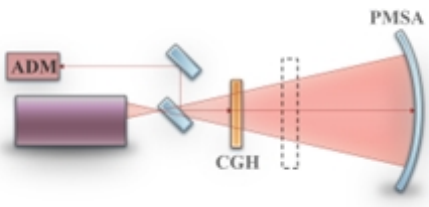
Stigmatic Null Test

Compensator Null Test

Computer-Generated Hologram

Measurement and Alignment of Segmented Mirrors

Measurement of Geometric Parameters



Segmented Mirrors Alignment

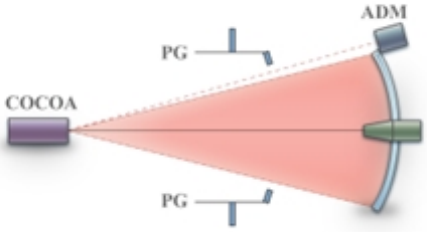


图5 大口径光学元件制造全流程中的各类检测技术

粗加工阶段：大动态范围的光学元件形貌测量

粗加工阶段光学元件面形误差大、表面粗糙度水平低，采用大动态范围的机械式轮廓检测等方法进行光学元件面形误差、粗糙度及几何参数等关键要素测量，为铣磨成型、研磨等光学加工阶段提供定量输入。

精密抛光阶段：纳米尺度的精准检测分析

在抛光阶段，干涉测量成为主要测量方法：零位检测利用补偿器或计算全息图测量非球面／自由曲面等面形误差，子孔径拼接可重构超出单次检测口径的凸面或平面的全口径面形误差分布，白光干涉等则利用干涉原理测量表面粗糙度和部分表面疵病。高精度的光学检测需要有效的误差溯源、精准的误差标定和多种检测方法交叉验证。

总结与展望

大口径光学望远镜的研制依赖于大口径光学元件的高精度制造，铣磨、研磨、抛光等光学加工流程伴随着轮廓测量、光学干涉测量等检测方法，二者密切配合、有机统一，形成了大口径光学元件先进制造技术。未来，随着新一代地基、空间大口径光学望远镜的建造，亚纳米级面形精度控制、批量化一致性、自动化智能化等成为大口径光学元件先进制造的发展趋势。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.104

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：张学军等 来源：《光：先进制造》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发