

设计、加工、测量三管齐下 实现光学自由曲面“制造自由”

◎本报记者 陈曦

高端装备产业，是稳定经济的重要一环，在经济和产业链上起着承上启下的作用。俗话说，眼睛是心灵的窗口。高端装备跟人一样，需要“眼睛”获取外界信息，光学成像系统作为高端装备的“眼睛”，逐渐向高集成、高精度、高性能方向发展。天津大学精密仪器与光电子工程学院房丰洲教授团队经过多年不懈努力，攻克了新一代光学元件自由曲面的设计、加工、测量及应用等一系列技术难题。其成果“自由曲面光学系统制造关键技术及产业化应用”近日获得2022年度天津市科技进步特等奖。

光学自由曲面好用难制

如今，空间遥感、全景成像、虚拟现实、增强显示、激光扫描、智能投影等重点领域都需要依赖高端的光学系统。

“往往越是高端应用需求，光学系统越离不开关键零部件的高精度制造。”房丰洲说。

通过对零部件制造现状的调研，团队发现零部件制造发展呈现4个趋势：精度越来越高、形状越来越复杂、尺度往极小和极大两个极端发展、材料种类越来越多，尤其是新材料层出不穷。

光学自由曲面作为新一代光学元件，在众多新材料中脱颖而出。

“光学自由曲面是一种非回转非对称的光学表面，即任意形状的光学表面。”团队成员、天津大学精密仪器与光电子工程学院教授张效栋介绍，它可以通过局部调整对像差进行针对性的补偿，使得原本需要使用十几片传统元件的透镜，现在使用二三片自由曲面就可以实现，并且成像质量可以达到近乎完美，还可同时满足光学系统的高性能轻量化和小型化要求。

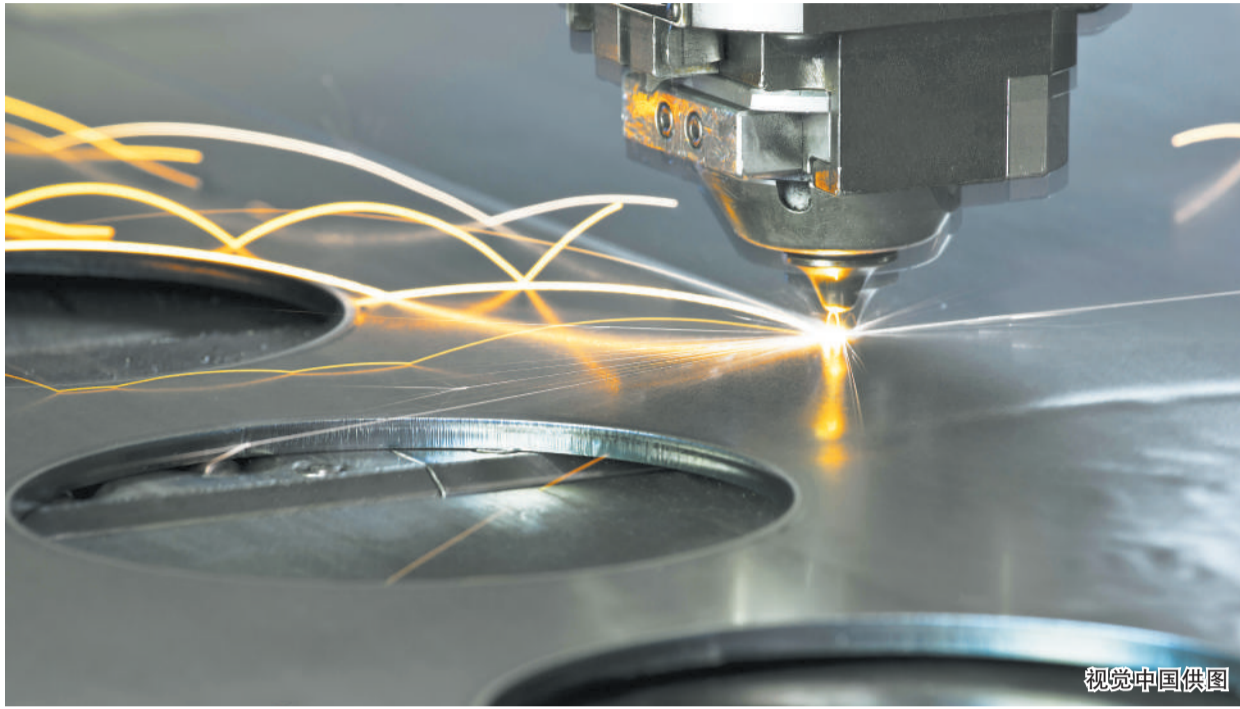
但这种“自由随性”的光学表面也是一把“双刃剑”，非常难以“驾驭”。“光学自由曲面在光学设计、加工机理、加工工艺和方法等全流程环节都异于传统光学元件，尤其对精度要求更高，导致其超精密加工极其困难。”张效栋感叹说，这也使得光学零部件高精度制造极其困难。

高精度加工需破“三大难关”

“表面质量、形状误差、应用性能是评价自由曲面加工和应用效果的三个重要参数。”团队成员刘现磊表示，要想驾驭光学自由曲面，就需要先过这三个技术难关。

“表面质量反映了零件表面粗糙程度，犹如触摸皮肤的感觉，越光滑代表表面质量越好。”刘现磊介绍，表面质量差会造成系统性能下降。尤其是在重点领域应用的零部件经常会使用硬脆材料，在加工中易产生碎裂，使得表面质量和应用性能下降，就像一块镜子上如果有裂纹，最终反射出来的影像将会受到破坏。

团队对材料切削去除过程进行了深入分析，在技术上掌握了国际上最高水平的1纳米材料稳定无损伤去除



技术。同时，为了提升制造效率，团队提出了离子注入表面改性方法，通过将离子多次注入材料表面，将易碎裂的硬脆表面变为非晶状态，实现了更大去除量的稳定无损伤去除，刀具损伤显著降低。利用这一技术，团队首次实现单晶硅、锗及磷化铟等光学晶体自由曲面低损伤切削加工。

形状误差在加工中所难免，误差会造成系统成像模糊、存在畸变等问题。常见的平面、球面都具有一个对称轴，即加工参考，而自由曲面不具有特定的几何特征，不具备任何参考。

为解决这一难题，团队设计了自由曲面加工路径，对加工刀具位置坐标进行精确计算，使得刀具沿着曲面形状运动，实现光学自由曲面高精度切削成形。“类似画圆，我们需要精确计算圆上的点，沿着点连线即可得到一个圆。”刘现磊解释。

同时，针对加工中存在的制造误差，团队提出了表面形主动被动测量相结合的精度提升策略，对机床系统误差进行主动补偿，对加工后表面进行在位测量再补偿，使得形状精度提升近10倍，达到亚微米级，也就是一根头发丝直径的1%。

“就像人的眼睛用久了以后可能存在近视、远视等问题，需要佩戴合适度数的眼镜进行矫正一样，自由曲面的表面质量、形状误差和组装精度都会使系统的成像质量下降，即应用性能变差。”张效栋对应用性能难题进行了形象的比喻。

团队为此开发了针对自由曲面形、表面粗糙度、光学性能测量系统，形成了多维度测量体系。同时，光学性能的评测需要比人眼更加客观、精确与稳定的评测手段，团队为此构建了“多维度测量+视觉辅助”这一独具特色的光学性能评测方法，攻克了自由曲面产业化应用中元件装调难题。

产品应用于多个领域

应用自由曲面的设计、加工、测量新技术，团队率先突破了昆虫复眼阵列这一典型自由曲面制造难题。

昆虫复眼由许多小眼组成，可以追踪高速运动的物体，利用此功能，可开发类似于昆虫眼睛的微透镜阵列，用于自动驾驶、工业检测等领域。

“但是微透镜阵列由好多子眼组成，加工路径是连续的，但是子眼之间表面不连续，容易造成加工形状不理想，尤其是子眼交界处会产生类似于‘褶皱’的表面误差。”张效栋介绍，团队通过对加工方法改进和加工路径优化，实现高精度微透镜阵列加工，目前该技术已在自动驾驶领域实现了应用落地。

该项技术不仅解决了新领域中的问题，也使一些传统应用中的难题迎刃而解。“激光打印机很普遍，但扫描模组作为激光打印机内部的精密零件，一直以来被国外垄断。”房丰洲介绍，其中难点在于光学镜片精度要求高但制造难度大，光机有两个关键光学镜片，形状是自由曲面，口径是长方形，长宽比较大，使得超精密加工效率低，跟理想形状偏差较大。

团队和企业一起，通过非圆区域面形分解和路径优化等技术手段，成功制造了打印机芯自由曲面光学系统，被应用于天津市旗领机电科技有限公司激光打印机产品中，实现了激光打印机芯的“全自主开发和国内在该领域的零突破”。

张效栋表示，团队研制的自由曲面光学系统已经在中国航空工业集团、中国船舶重工集团等重点单位、领域得到应用，并获得高度认可。其相关产品在增强显示、激光扫描、智能投影、自动驾驶等国民经济领域成功推广与应用。相关产品也获得美国FC和欧盟CE认证，目前已进军日、韩、欧、美、印等国际市场。相关复杂光学镜头产品占国内市场份额一半以上。

空、天、地协同，为农场黑土地做“体检”

◎本报记者 杨仑

5月上旬，东北广袤的黑土地上春潮涌动，千里沃野，农事正忙。

在黑龙江友谊农场，一场特殊的“体检”正在进行。之所以特殊，是因为“体检”的对象是一块900平方公里的黑土地。

保护好黑土地，是粮食生产中的关键一环。近日，依托于中国科学院“黑土粮仓”科技会战三江示范区项目，中国科学院东北地理与农业生态研究所（以下简称东北地理所）联合中国科学院空天信息创新研究院等16家单位，在友谊农场开展了为期10天的黑土地航空飞行综合观测实验，利用卫星、大飞机和地面采样相结合的办法，完成了这次特殊的“体检”。

给黑土地质量“把脉问诊”

东北黑土区是我国重要的粮食生产基地，粮食产量约占全国的四分之一，粮食商品率高，是保障粮食市场供应的重要来源，是保障国家粮食安全的压舱石。要保护好黑土地，首先要摸清我国黑土地质量本底与时空动态变化，系统诊断黑土地退化成因，才能为黑土地精准保护和可持续利用提供科学依据。

为了这次“体检”，科研人员们筹谋已久，设备也足够“豪华”。在太空中，仅卫星就组织了15颗，过境高达50次；在天空上，首次利用大飞机搭载多种高精尖设备进行多次厘米级/米级高光谱、热红外、激光雷达和合成孔径雷达观测。

而在地面上，由多个单位、近百人组成的大部队蓄势待发。科研人员们分成4个地物光谱采集组、5个地面采样组、9个无人机飞行组 and 3个三维激光扫描组，配置4台便携式光谱仪、5套地面采样设

备、56套地面自动观测设备等百余套高精尖设备……

不仅装备豪华，时间节点的选择也非常讲究。

“东北黑土地耕作土壤春季有裸土窗口期。”东北地理所研究员刘焕军告诉记者。与之前地面采样相比，空天地立体化的检测方式，可以定量监测亚微米、微米土壤理化性质、耕地质量与退化类型、程度，为黑土地种肥水药智能管控精细处方图制作、水土流失防控与小流域综合治理提供科学数据与技术支撑。

为期10天的黑土地航空飞行综合观测实验，实现了土壤有机质、墒情、“破皮黄”、白浆化、土壤质地、侵蚀沟、鱼眼泡及耕地质量米级空间分辨率定量监测。

“对比之前的监测手段，此次实验结合了太空、天空和地面的数据，实验成果摸清测区黑土地土壤与耕地质量家底，诊断黑土地土壤与耕地质量及退化状况，为黑土地保护技术提供时空精准处方，助力保护黑土资源、促进农业现代化和可持续发展。”刘焕军说。

国产航空载荷“大显身手”

在本次黑土地的“体检”中，航空遥感系统作为承上启下的重要环节，承担了区域高分辨率多源遥感数据获取、天地地真实性传递验证等关键任务。

中国科学院空天院航空遥感中心主任潘洁研究员表示，中国科学院空天院航空遥感中心抽调了优势技术力量，发挥了国家大科学装置航空遥感系统多载荷协同观测的能力和优势，根据任务要求优选了多光谱光学相机、高光谱相机和多维度合成孔径雷达等一批先进的国产航空载荷，实现了对示范区全区域的多载荷协同观测。

对比之前的监测手段，此次实验结合了太空、天空和地面的数据，实验成果摸清测区黑土地土壤与耕地质量家底，诊断黑土地土壤与耕地质量及退化状况，为黑土地保护技术提供时空精准处方，助力保护黑土资源、促进农业现代化和可持续发展。

“一架飞机同时搭载了8套大型遥感设备，包含了多光谱、高光谱和P.L.S.C、X、Ka6个微波波段载荷，这些载荷可实现同步对地观测，同步获取多种类型、高现势性、综合客观的科学数据，这样类型的综合航空遥感试验在黑龙江，乃至中国黑土研究试验中尚属首次。”潘洁说。

国家民用空间基础设施陆地观测卫星共性应用支撑平台项目综合实验场负责人陶醉表示，此次空天地综合实验期间，项目组协调国产卫星同步开机观测，涵盖空基系列以及高分系列卫星，累计覆盖测区的同步卫星影像50余景。

黑土粮仓科技会战三江示范区多要素立体监测与模式应用评价负责人、东北地理所副研究员郑兴明认为，此次黑土区空天地综合观测实验充分实现了空天地协同，具有航空飞行载荷全、频次高，卫星充分协同，地面测试参数多的特点，通过融合多尺度、多载荷观测数据，能够有效支撑黑

土地土壤属性、地形地貌、耕地质量等米级分辨率空间制图，服务于农业技术的综合效益评估和适宜推广区划定。

保护黑土地再出“三江模式”

针对黑土地变薄、变瘦等问题，近年来，研究人员提出了一系列保护性耕作方案。

在与三江示范区的科研人员交流中，他们提到最多的就是“三江模式”。

“黑土地保护需要因地制宜，根据不同地域的气候、土地特征出台针对性措施。”东北地理所副所长武海涛告诉记者。

据介绍，三江平原黑土地保护面临的低温冷凉、土壤瘠薄严重、水资源安全压力大、智能化水平有待提升等问题，因此才提出以“秸秆翻埋、深松减障、水土优化、智能管控”为核心技术内涵的“三江模式”。

白浆土旱田障碍消减与地力提升技术，寒地水田地力提升与抗逆丰产技术、水土资源高效利用与优化配置、空天地立体监测、黑土地保护与智慧农业融合发展技术模式的集成示范，为三江平原地区提供了多尺度系统解决方案。形成的白浆土全链条的障碍消减与地力提升技术体系，使有效耕层增加到30厘米，玉米和大豆增产14%以上；阐明基于积温梯度的寒地稻田秸秆还田腐解规律，实现水田增产12%以上；实现综合节水27%，农田退水氮磷净化效率提升35%。

“2023年将在作物全生长期继续推进多次航空飞行综合观测实验，提高黑土地耕地产能与质量监测能力。”刘焕军说。

他预计在未来3年内，“黑土粮仓”三江示范区将建立时空精准的多要素立体监测技术体系，时空精准推广黑土地保护“三江模式”，为我国黑土地立体监测技术体系建设、黑土地保护模式推广贡献样板。

成果播报

人工智能数据分析平台 快速高效巡检抽水蓄能电站

◎本报记者 叶青

近日，我国首个大规模抽水蓄能人工智能数据分析平台——南方电网抽水蓄能人工智能数据分析平台XS-1000D在广州正式投入运行。该平台的投运实现了装机容量为1028万千瓦的7座抽水蓄能电站、34台机组设备的数据智能巡检、状态智能诊断和运维模式变革，标志着我国近四分之一在运装机容量抽水蓄能设备由传统线下人工管理向线上智能管理转变，每年可创造经济效益约1760万元。

2018年起，南方电网启动了人工智能数据分析技术在抽水蓄能领域的研究应用工作。这个平台将7个电站近60个设备系统的31万个测点数据，通过统一标准的数据体系，接入到综合处理单元进行数据采集，再由服务器“上云”，足不出户就可以完成对电站各级设备状态的巡查。系统一旦发现数据出现异常，就可对故障精准排查，实现对设备非正常状态原因的“抽丝剥茧”。基于XS-1000D强大的数据分析功能，技术人员既能快速评估蓄能机组总体状态，又能快速定位风险薄弱的部件环节。

而在以前，以1台最广泛使用的30万千瓦机组为例，其约有4大类、20套套关键设备部件，年度日常检修项目就多达400余个，约需850人一天才能完成。

“以前我们要对每个电站的每台机组进行定期的状态分析评价，每台机组要到现场去观察和抄录上千条数据，报告撰写工作量巨大，且容易出错。现在XS-1000D可自动生成报告，直接实时告诉我们有哪些异常。”南网储能检修试公司电气一次检修部班长郑清说。这一切的实现正是依托于人工智能数据分析的核心——算法。

针对各类数据分析原理和设备运维需求，技术人员自主研发了49种可自由组合的算法模块。并已在XS-1000D部署了近1000个智能分析算法，形成一系列具有自主知识产权的抽水蓄能电站设备状态智能分析方法，相当于把技术专家的智慧和经验搬上了“云端”。

“每周都会有新增的算法，持续增强‘云端大脑’的分析能力，把员工从重复、机械的劳动中解放出来。”南网储能检修试公司党委书记郭小涛说。

该平台能够基于海量多维数据产出准确的设备状态评价结论，提前预判设备缺陷隐患，将设备数据分析与检修策略制定相结合，使得RCM(以可靠性为中心的维修)分析更全面、更准确，可告知运维人员“设备现在好不好，将来修不修”，助力实现经验决策向数据决策的转变。

凝聚态电池来了 兼顾高比能和高安全

◎本报记者 操秀英

密度高达500Wh/kg(瓦时/千克)，搭载它的电动飞机，甚至可以实现载人航空……近日，在上海车展上，宁德时代发布了凝聚态电池技术。

什么是凝聚态电池？凝聚态电池是针对超高比能化学材料的电化学反应变化，采用了高动力仿生凝聚态电解质，构建微米级自适应网状结构，调节链间相互作用力，在增强微观结构稳定性的同时，提高电池动力学性能，提升锂离子运输效率。

“我们的凝聚态电池和半固态电池不是一个种类。”宁德时代首席科学家吴凯强调，凝聚态电池的正负极均可以匹配各种高比能材料，其不受壳体形态限制，但外壳可以体现其最佳性能。

宁德时代上海车展讲解员表示：“在电化学中，电池的安全性能和正负极材料的能量密度是强相关的。凝聚态电池显著提升了电池的安全性能，并可在保证高比能的情况下具备高安全性。目前我们已开发了6系到9系的凝聚态电池，可以做到电芯解体的情况下也不起火不爆炸。”

拥有更高电池能量密度

吴凯称，凝聚态电池是宁德时代在材料和材料体系创新的最新成果，凝聚态电池聚合了包括超高比能正极、新型负极、隔离膜、工艺等一系列创新技术，使之既具有优秀的充放电性能，又具备高安全性能。

系列创新技术让这款凝聚态电池在高比能、高安全性两方面，突破了长期以来限制电池行业发展的天花板，将激活以高安全和轻量化为核心诉求的全新电动场景。

相比传统锂离子电池，凝聚态电池拥有更高的电池能量密度，其高达500Wh/kg的数值，比目前液态锂离子电池的理论能量密度上限(350Wh/kg)高出42%。

能量密度是动力电池最核心的技术指标。据了解，500Wh/kg还不是凝聚态电池的能量密度上限，随着技术的深入，后续或能达到更高的能量密度。

在安全性上，液态电解质若泄漏，流动的液态电解质可能导致更大范围的短路，产生高压拉弧，导致电池燃烧、爆炸。凝聚态电池连接内部高分子的网状结构则能够自适应调整，保障结构稳定性、热稳定性更好。

今年可实现量产

取决于不同的正负极材料，凝聚态电池的能量密度也不同。“目前我们正在和一家载人飞机公司合作。”吴凯说。

宁德时代方面透露，能量密度较低的车规级凝聚态电池可在年内实现量产。

吴凯坦陈，作为一种全新的产品，凝聚态电池目前的成本略高。“凝聚态电池的研发是为了航空电池的需求，航空电池的需求并不是高性价比，而是轻量化和高安全。汽车不需要这么高的能量密度，我们在做车的研发的时候，会适当调整能量密度，但是主要性能是一致的。”

“对于动力电池来说，安全、性能、成本的全面提升以及平衡是不断追求的目标。”宁德时代有关负责人表示，同时研发中还要考虑到其回收利用的问题，这些方面也是宁德时代接下来研发的重点方向。