

# 设计、加工、测量三管齐下 实现光学自由曲面“制造自由”

高端装备产业,是稳定经济的重要一环,在经济和产业链条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。



资料图片

## 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系统,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。

形状误差在加工中在所难免,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。”刘现磊解释说。

## 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,成功制造了打印机自由曲面光路系统,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的突破”。

(陈曦)

## 成果展示

### 智能“手套” 可增强虚拟现实触觉

据英国《新科学家》杂志网站报道,美国科学家发明出一款智能“手套”,可通过向佩戴者手掌中的神经发送电信号,让佩戴者感觉自己在虚拟现实(VR)中抓住物体。

为配合在VR中拿东西的视觉体验,人们经常会佩戴手套,手套会向手掌提供反馈,比如振动或电信号。但手套也会使佩戴者的手指感觉迟钝,使用户在佩戴VR耳机时更难执行灵巧的任务。

芝加哥大学田中雄大团队开发出了一种设备,使用手背和手指上佩戴的电极网来模拟或增强触觉,使手掌和手指不受阻碍地活动。神经刺激会使单个手指感觉好像在触摸什么东西,因为人类的手掌比手背有更多触摸感受器来接收电极发送的电信号。

研究团队在几种VR体验中测试该设备,比如在虚拟攀爬体验中,该设备可让人们在VR中攀爬时能更敏锐地感觉到手掌中的绳索。

团队认为,这种手套在现实的学习任务中也很实用。他们尝试将其用于打碟,在该场景下,这款智能“手套”可提供反馈,指导某人何时将特定的音乐曲目淡入或淡出。

研究人员指出,因为这款手套不会覆盖整个手,所以可一直佩戴,在VR内外使用。他们在2023年计算机系统人为因素会议上介绍了这一最新研究。

(刘震)

### 新疆年内首个 超高压电网工程建成投运

5月14日,据国网新疆电力有限公司消息,凤凰—乌北Ⅱ回750千伏输变电工程于日前正式建成投运。这是新疆2023年投运的首个超高压电网工程。

凤凰—乌北Ⅱ回750千伏输变电工程是落实国家“双碳”目标的重点项目,是乌北—凤凰—乌苏—博州—伊犁输变电工程的重要组成部分,也是乌昌地区750千伏双环网的重要一环。工程起自凤凰750千伏变电站,止于乌北750千伏变电站,线路长度151千米,新建铁塔328基。凤凰—乌北Ⅱ回750千伏输变电工程投运后,将提高伊犁—乌昌输电能力和电网系统安全稳定性、保障乌鲁木齐地区供电可靠性。

该工程线路途经之处地形地貌复杂,有林地、草场、农田、池塘等,作业范围广、施工难度大、安全风险高,高空坠落、机械伤害等危险点并存,是新疆电网基建史上停电持续时间最长、作业规模最大、参建人员最多、三级及以上安全风险最多、管控难度最大、组织管理最复杂的“六最”停电施工项目。

据悉,2023年,新疆续建、新建超高压工程15项,线路长度3158.4千米,变电容量2100万千瓦,建设规模达到新疆历史之最,超高压电网建设驶入“快车道”,预计年内还将投运凤凰—乌苏—博州—伊犁Ⅱ回、凤凰—亚中—达坂城Ⅱ回等8项750千伏输变电工程。

(朱彤)

### 电子耳蜗 可像人耳一样适应噪音

据最新一期《自然·电子》杂志报道,德国伊尔梅瑙工业大学的研究人员设计了一种微型电子传感器,这种传感器模拟人耳中耳蜗的工作方式,可用于助听器或麦克风,能在嘈杂的环境中辨别声音。这种电子耳蜗会根据它接收到的声音音量来调整它对特定频率的敏感度。

如果佩戴者身处一家繁忙的餐厅,它会改变毛细胞对旁人发出声音的频率的反应,这样佩戴者就可听到背景噪音之外的声音。

研究人员表示,这一传感器首次集成了内耳处理声音信号的过程,这使得它比以前开发的装置更高效、更快速。

该传感器长约350微米,宽约150微米,由一条硅片组成,可将声波转换为不同频率的电信号。这条硅片连接到一个执行器,可改变它对不同频率的响应方式。这意味着如果有人从安静的办公室走到嘈杂的街道上,传感器也可适应。

不过,研究人员称,每个传感器只能在一个很小的频率范围内工作,所以需要30到60个传感器才能覆盖人类听觉的范围。

(罗娟爱)

## 新软件精准快速识别和定位蛋白质

冷冻电子断层成像(Cryo-ET)是一种提供细胞环境和封闭生物分子的详细三维(3D)图像的强大技术。由德国马克斯·普朗克分子生理学研究所研究团队开发的一种软件TomoTwin,可在拥挤的细胞中挑选蛋白质。基于深度度量学习的这款新开源工具,使科学家能以高精度和高通量定位几种蛋白质,而无需每次手动创建或重新训练网络。相关论文发表在最近的《自然·方法》杂志上。

TomoTwin软件克服了许多现有工具的障碍:它学会在断层图像中挑选形状相似的分子,并将它们映射到几何空间。在学习过程中,它将相似的蛋白质放置在彼此附近的系统会得到奖励,否则会受到惩罚。

该软件可直接在细胞环境中自动识别和定位蛋白质铺平了道路,扩大了Cryo-ET的潜力。Cryo-ET有可能破译生物分子在细胞内的工作,并进一步揭示生命的基础和疾病的起源。

在TomoTwin软件生成的新图谱中,研究人员可分离并准确识别不同的蛋白质,利用这一点来定位它们在细胞内的位置。此外,该软件的一个优势是,通过取消训练步骤,甚至可在本地计算机上运行。

目前,该软件可在细胞中定位大于15万道尔顿的球状蛋白质或蛋白质复合物。未来,研究团队的目标是定位膜蛋白、丝状蛋白和较小尺寸的蛋白。

(张佳欣)