

## 高技术前沿

海洋覆盖地球表面的71%，人类却依然对海洋了解甚少。据《科学进展》杂志刊发的研究报告，深海海底仍有约99.999%的面积尚未探测。这片深蓝世界如同一个巨大的“水下宝库”，隐藏着无数未解之谜。

“能否像给海洋做CT扫描一样，清晰看透深海奥秘？”这曾是几代海洋科学家的梦想。如今，深海无人自主探测技术的突飞猛进，让这一梦想逐渐照进现实。

前不久，在国防科技大学牵头举办的第三届国防科技高地论坛上，多位院士专家围绕“深海无人自主探测”等主题进行了交流研讨，“透明海洋”这个概念由此走进大众视野。就像医疗CT扫描能够清晰呈现人体内部结构一样，新一代深海无人自主探测技术拧动了让海洋变得“透明”的智能钥匙，加速了人类揭开深海奥秘的进程。

# 深海无人自主探测技术：让海洋变“透明”

■ 朱家华 陈 敏

## 深海探测的“智能鱼群”

想象一下，在数千米深的漆黑海底，智能探测器如同训练有素的鱼群，正在自主执行探测任务。有的负责大范围巡航扫描，有的专注于局部精细观测，有的承担中继通信任务……它们形态各异、功能互补，较好地完成了深海探测任务。这不是科幻电影中的场景，而是当今海洋探索的真实写照。

深海无人自主探测技术的核心，就是给海洋配备一个“智能感知系统”。这个系统由3大关键部分组成：首先是担任“侦察兵”的无人潜水器家族，其中包括续航能力惊人的水下滑翔机、机动灵活的自主无人潜航器以及可进行精细作业的遥控无人潜航器等，它们能够在深海高压和低温环境中运行；其次是作为“顺风耳”的声学探测设备体系，如多波束测深系统、侧扫声呐、合成孔径声呐、多普勒声学剖面仪等，它们通过发射和接收声波信号来“看清”周围环境；最后是扮演“大脑”的人工智能系统，如具备自主学习能力的现代深海探测器AI搭载系统，负责处理海量环境感知数据并做出智能决策。

这套系统的工作原理颇具巧思：声波在水下传播时，遇到不同物体会产生不同的回声，就像蝙蝠利用声波导航一样；探测器通过分析这些回声信号，构建出海底的三维图像；人工智能系统分析采集到的数据，给出人类所需要的报告。

与传统探测方式相比，这种新型探测技术具有显著优势：打破人工操作的局限，可以24小时不间断工作；克服单一设备的不足，形成多平台协同作战能力；突破数据处理的瓶颈，实现智能实时分析。这就像从“单兵作战”升级为“智能化集团作战”，探测效率和精度都得到了质的飞跃。在海底资源勘查中，传统方法需要数月才能完成的区域调查，现在借助智能探测集群只需数周甚至几日即可完成，且数据质量和图像分辨率大幅提升。

这套智能系统还具备自我优化和演进能力。每次探测任务结束后，系统都能对整个过程进行复盘分析，总结经验教训，优化探测算法。这种持续学习的能力使得探测系统越来越“聪明”，越来越适应复杂的深海环境。



从“盲人摸象”到“明察秋毫”

深海无人自主探测技术的发展历程，是一部人类不断突破认知边界、挑战环境极限的奋斗史。

在早期，受限于技术手段，人类对深海的探索可谓“盲人摸象”，只能获取局部、模糊的信息片段，难以窥见海洋全貌。这一局面直到20世纪中叶才迎来转机——随着第一艘无人遥控潜航器问世，人类迈出了走向深海的关键一步。尽管这些早期设备仍需通过缆绳与母船连接，活动范围有限，但它们为后续技术发展奠定了重要基础。

进入20世纪80年代，国际深海探测开始向无人化、自主化迈进。1986年，

美国伍兹霍尔海洋研究所与法国研究所合作，通过有缆遥控水下机器人“小杰森”，成功对“泰坦尼克号”沉船进行了首次探查。此次探测证明了无人平台在极端深海的作业能力。1996年，美国“自主海底勘测者”自主无人潜航器在东太平洋某海域获得海底熔岩流的声磁图像。在之后的数年里，它完成了200多次下潜作业，标志着无人自主探测技术正在海洋调查与探测等领域发挥重要作用。

进入21世纪，深海探测技术迎来质的飞跃。随着材料科学的突破，耐高压合金和新型复合材料的应用，使探测器下潜到千米深渊。这就像为探测器披上了“金刚不坏之甲”，让它们能够在极端环境下正常工作。能源技术的进步，特别是锂电池和新能源技术的应用，为探测器装上“持久心脏”。

我国近年来的技术革命尤为深刻。2017年，我国研制的“海翼”号水下滑翔机在马里亚纳海沟完成下潜任务，最大下潜深度达到6329米，创下了世界纪录。2020年以来，“海斗一号”全海深自主遥控潜水器多次潜入马里亚纳海

沟，成功执行万米坐底作业，完成高清视频传输、深渊海底探测和机械手样品采集等任务。这项成果填补了当时国际上全海深无人潜水器万米科考应用的空白。

更令人振奋的是，多平台协同探测技术日趋成熟。不同功能的探测器扮演着不同角色，就像一支分工明确、配合默契的交响乐团：空中无人机负责广域侦察，水面无人船进行中程监控，水下机器人开展精细探测。这种“天、空、海一体化”的立体探测模式，使人类得以全方位洞察海洋。2020年，我国提出的“透明海洋”立体观探测网构建计划已初见成效。如今，我国构建了世界上最大规模的区域海洋潜标观测网——南海潜标观测网，在国际上首次实现蕴含丰富多尺度动力过程的南海深海盆全覆盖及完整监测观测。

深海无人自主探测技术的发展，不仅推动着海洋科学的研究进步，更为人类可持续利用海洋资源、保护海洋生态环境、维护海洋权益提供了强大支撑。这项技术如同一把神奇的“智能钥匙”，

正在为人类开启通往深海世界的大门，带领我们走向认识海洋、经略海洋的新时代。

## 迈向“透明海洋”的征程

尽管取得了显著进展，深海探测仍面临着诸多挑战。

通信是深海探测的一大难题。在深海中，无线电波无法远距离传播，声波传输存在速率低、延迟大等问题。在深海中通信，就像试图在一个嘈杂的舞厅里清晰对话，信息传递变得异常困难。

能源供应也制约着深海探测的进程。深海探测器只能携带有限的能源工作，就像背着氧气瓶的潜水员，续航时间始终受限。目前大多数水下探测装备也只能连续工作数月，这对于需要长年累月进行的深海探测来说还远远不能满足需求。

此外，复杂海洋环境带来的干扰也不容小觑。变幻莫测的海流、复杂的地形、多变的水文条件，都给探测工作带来了巨大挑战。这就像在暴风雨中试图用望远镜观察星空，环境干扰让探测变得异常艰难。

面对这些挑战，科学家们正在寻找创新解决方案。通信方面，水声通信与激光通信相结合的新型通信系统，给探测器装上了“水下Wi-Fi”，大大提升了数据传输效率；能源领域，海洋能采集技术让探测器从海洋中“汲取”能量，实现更长久的自持工作；人工智能技术的深度应用则赋予了新一代探测器自主决策能力，让它在复杂环境下也能做出最优选择。

可以预见，在不久的未来，我们将建起更加广泛的“智能探测网络”。这个网络由成千上万个智能探测器组成，它们就像海洋中的“神经末梢”，实时感知着海洋的脉搏。通过这些探测器，人类将能实现对全球海洋的持续观测和精准预测，构建起从海底到海面的立体综合观测系统，真正实现海洋状态透明、过程透明、变化透明。

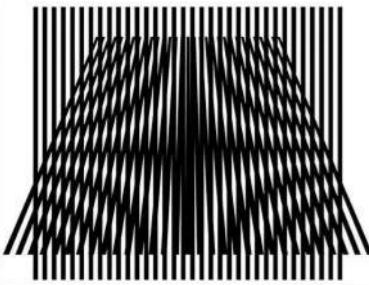
上图：我国自主研制的6000米级深海无人遥控潜水器（ROV）“海琴”号即将被回收至甲板。

新华社发

## 手机拍摄有时为何出现奇怪的“水波纹”——

# 莫尔条纹：神奇的光学现象

■ 吴启隆 付 康



莫尔条纹示意图。

图片由作者提供

用手机拍摄电视机，屏幕上常会出现像水波一样晃动的奇怪条纹。这种条纹叫莫尔条纹——一种两个规律图案叠在一起时，产生的“不规矩”图案。

电视屏幕由密密麻麻的像素点组成，一个挨一个，横平竖直。手机里的图像传感器也是由一排排微小光单元构成，同样是格子，只是密度更高。透过一个屏幕去看另一个屏幕时，不同大小、不同密度的格子很容易错开角度，就像两把齿数不一样的梳子齿

尖互相掠过，亮的碰亮的，暗的碰暗的，于是就会出现一道道比原来宽得多的“水波纹”。它并不是屏幕发出的实光，而是两个周期性结构“打架”产生的视觉幻影。

莫尔条纹的名字来自法国人莫尔，最早用来描述丝绸叠在一起出现的云纹，是一种光学现象。今天，物理课本把它定义为“两个空间频率相近的周期性图案叠加后产生的差频现象”。通俗点，就是“密格子+密格子=稀格子”。差频让原本看不见的小尺度信息，被放大成肉眼可见的大尺度图案，于是就有了拍照时的“水波纹”。

不仅仅是拍照，莫尔条纹出没的地方还有很多。印刷厂印彩色照片，印前得检查有没有莫尔条纹，否则成品会凭空出现一片“网纹”。研发高端投影仪、LED大屏的工程师天天跟格子较劲，像素点距、排布角度等，都得特意错开，把莫尔条纹撇出视野。摄影师拍摄建筑幕墙、防盗铁网时，只要背景有细密格子，手机一按快门，水波纹就可能会出现。

## 趣问·新知

# 空芯光纤：“下一代传输媒介”

■ 宣传杨 王书扬

## 新看点

了通信技术质的飞跃。

传输性能的突破最为直观。空芯光纤有效折射率接近真空，信号传播速度较传统光纤大幅提升，时延显著降低。这一特性将为远程手术、自动驾驶等需要低时延的场景提供关键技术支撑。

带宽优势则是另一大亮点。空芯光纤支持超宽谱传输，频谱资源利用率提升超过300%。2024年，中兴通讯基于空芯光纤，完成S+C+L超宽谱同波长单纤双向大容量传输实验，百公里传输速率达到每秒377.6太比特。

功率承载能力同样表现卓越。传统光纤在传输高功率激光时，会因非线性效应和热效应导致信号失真，甚至损伤光纤材料。空芯光纤则凭借其独特的空气导光特性，使得光场与玻璃材料重叠极小，具备更高的激光损伤阈值，从而稳定传输千瓦级的高功率激光。因此空芯光纤在微加工、多光子显微成像等领域有着较大的应用潜力。

空芯光纤所带来的变革是静悄悄的。它不会让我们的生活突然产生翻天覆地的变化，但它可以改变信息世界的“地基”，让数据流动得更加迅速、高效。

## 空中协同操作系统



据报道，西湖大学工学院研究团队研发了一套名为“飞行工具箱”的空中协同操作系统，可实现多架旋翼无人机在“叠飞”状态下的高精度协同作业。相关成果发表于《自然》杂志。

该系统由一架搭载末端执行工具的“工具箱无人机”和一架配有可伸展机械臂的“操作无人机”组成。研究团队通过设计柔性电磁对接机构、气流扰动估计与补偿方法、高精度对接与操作控制技术3个核心技术模块，解决了近距离飞行与高精度操作之间的矛盾，使无人机克服了竖叠式飞行时的下冲气流，在强风中能够实现高精度空中对接。

目前，该系统已实现超过20次的连续对接，并可拓展至“三机协作”等场景。未来，这套系统有望在危险物品抓取、高空建筑清洁等任务中大展身手。

## 科技云

科技连着你我他

■ 本期观察：冯鑫鑫 齐旭聪

## 氢动力多旋翼无人机



近日，由哈尔滨工业大学重庆研究院与陕西同尘和光低温科技有限公司合作开发的青鹤-10氢动力多旋翼无人机，完成液氢能源首次试飞。该型无人机续航里程超300公里，创下国内多旋翼无人机液氢动力飞行新纪录。

青鹤-10氢动力多旋翼无人机具有强环境适应性，可在零下30摄氏度至45摄氏度宽温域持续运行，也可在4000米海拔的环境下飞行。其性能参数远超传统锂电旋翼无人机，续航时间更是传统锂电旋翼无人机的3倍。因此，该型无人机既有旋翼无人机的悬停优势，又能有效替代相同级别的传统锂电垂直起降固定翼无人机。

相关负责人表示，未来将持续推进低温储氢技术的研发，推动氢能 在低空经济领域的规模化与商业化应用。