

超越人眼！机器人有了“超级仿生眼”

■本报记者 刁曼萱

随着具身智能和机器人技术的快速发展，机器人需要在复杂任务中实时、快速定位追踪目标，识别障碍物等，这就对其视觉系统提出了更高要求。然而，现有机器视觉系统往往难以兼顾成像精度、探测效率与功能集成。

为破解上述难题，哈尔滨工业大学（深圳）集成电路学院教授秦敬凯、材料学院教授徐成彦团队开发出一种基于高密度波导耦合型像元的神经形态人工眼系统。该系统具备超密集像素、高探测效率、感内计算及超越人眼的焦点自适应能力，如同为机器人装上“超级仿生眼”，有望为构建既能捕捉图像，又能理解动态三维环境的人工视觉系统提供新思路。近日，相关研究成果发表于《自然－传感》。

破解不可兼得的难题

人眼是一套高精度且复杂的成像系统，能在一个紧凑的器官内集成宽视场、高分辨率和高效视觉处理功能。长久以来，科学家一直尝试在具身机器人和交互式智能视觉系统中复刻人眼的功能，但实现这一目标并非易事。

主流平面视觉传感技术长期面临“高像素密度”与“高探测灵敏度”不可兼得的难题。“一方面，像素小了，接收的光就少，信噪比随之变差，图像噪点增多；反之，像素大了，分辨率又上不去，图像就模糊；另一方面，像素结构如同一块块‘小瓷砖’平铺在芯片上，需要绝缘隔离，会占用大量横向面积，难以进一步缩小。”秦敬凯对《中国科学报》解释。

针对这一难题，研究团队另辟蹊径，仿照人类视网膜结构，开发出超密集波导像素阵列器件。他们将光敏材料垂直排列在微小的垂直光波导周围，创造出类似人眼的视杆细胞和视锥细胞

的细长像素，将原本“躺着”的像素改为“站立式”，使光线能够沿着垂直光波导纵向滑行，在无需增加平面尺寸的情况下更高效地收集光信号。

这一设计有效化解了高光电探测效率与像素小型化之间的矛盾。

研究团队实现了在2×2厘米阵列上的全范围平均像素为7000 PPI（即每平方厘米784万个像素，折合约每平方毫米78400个像素）的超高集成密度，超过了人眼视网膜非中心凹区视锥感光细胞的平均密度（通常为每平方毫米1万至5万个）。

此外，该阵列拥有超高探测率，达到10⁴ Jones的比探测率。这意味着在黄昏、路灯下、仓库角落等昏暗场景中，依然能实现清晰成像，有望应用于巡检机器人、夜间自动驾驶等场景。此外，这些像素还表现出固有的视觉记忆能力，能够模拟关键的突触功能，并在传感器内部处理视觉信息。

看得清、读得懂、调得动的人工眼

攻克了“像素如何又密又灵”的难题后，团队又将目光聚焦到“眼球如何又广又准”的挑战上。

秦敬凯解释，平面传感器无法像人眼那样自然形成广角视野，通常需要集成多镜头系统或增加计算摄影算法，补偿光学畸变。另外，尽管人眼能够在远近物体间重新对焦，但视网膜本身无法改变形状。“这意味着，在任何观测条件下，图像都不可能做到完美贴合复现，随着视野变宽、焦距拉长，图像边缘的地方就会慢慢模糊、变形。”

为此，研究团队进一步将超密集波导像素阵列器件集成至曲率可调的球形人工眼系统中。与形状固定的人眼视网膜不同，这种带有超密集波导耦合像素的人工眼系统，可以动态改变自身形状，更好



研究团队开发的神经形态人工眼系统。受访者供图

匹配焦面，从而减少光学畸变，并在各种观察条件下保持清晰的三维视觉。

“人工眼是一个高度耦合的系统，一个很小的时序偏差或光路误差，都可能在最终结果中被放大。”秦敬凯说，“我们只能坚持‘逐级定位、逐项收敛’。”

研究显示，该人工眼实现了110度视场角，同时将场曲率降低了45.7%。“这意味着机器人不用拼命转脖子也能感知两侧来车、侧后方挥手的人；边缘清晰表明测距、避障更准。”秦敬凯说。

结合器件内部的图像去噪和动态光学补偿功能，该系统不仅提高了人工神经网络在图像识别的准确性，还实现了96.1%的高精度三维运动跟踪，让人工眼看得清、读得懂、调得动，使人工视觉向生物眼睛的适应性和智能性迈进。

历时3年的多学科合作

“这项研究历时3年，涉及光电材料学、微电子技术、光学、机器视觉和仿生生物学等多个学科，是一个典型的多学科交叉研究项目。”秦敬凯回忆，团队

遇到的最大挑战便是如何将单个性能优异的器件变成一套人工眼系统。

一方面，神经形态光电器件同时兼具感知、存储和处理功能，传统读出方式并不完全适用；另一方面，让人工眼根据目标距离实时调焦、同步改变传感器曲率，需要光学、机械、电路、控制和算法等多领域协同合作。

在开发出超高密度波导耦合像素阵列和人工眼系统后，徐成彦、秦敬凯团队联合南方科技大学副教授周非迟团队开展合作，解决了高精度视觉与控制算法的难题。“我们希望解决的核心问题是，不仅要让人工眼‘看见’目标，还要让它知道应该如何调整自己，才能持续‘看清’目标。”周非迟表示。

徐成彦介绍，该人工眼拥有广阔的应用前景：在人形机器人与具身智能领域，该技术可提供兼具超高分辨率、110度广视角和动态焦点适应的微型主视觉，实现昏暗环境下的精准抓取与避障；在特种感知领域，该技术具备接近夜视级的弱光探测能力，适用于夜间安防、井下巡检及卫星等极端环境；在医疗微创设备中，其曲面贴合、低功耗感内处理的特性，可用于眼镜内置视觉传感、视网膜假体和超小口径内窥镜。

总体而言，该技术让机器在与与人眼相近的体积内，拥有看得更细、更暗、更广且能理解运动的能力。目前，团队正在积极推进该技术的产业化工作。

未来，团队将重点优化人工眼的硬件集成与基础性能，探索可量产、可部署的系统性原型。同时，进一步推动人工眼从“机器视觉”到“生物视觉”，挖掘高像素素集成人工视网膜的应用，做成可植入、可贴附、可主动调焦的仿生视觉和传感界面，探索临床应用。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s44460-026-00119-y>

发现·进展

中国农业科学院蔬菜花卉研究所

泛素化“天平”决定昆虫抗性与繁殖能力的平衡

本报讯（记者李晨）自然选择如何驱动生物演化？昆虫对化学杀虫剂的抗性提升与繁殖力下降此消彼长，其关键的分子“开关”究竟藏在何处？近日，中国工程院院士、中国农业科学院蔬菜花卉研究所研究员张友军团队系统揭示了泛素化修饰介导害虫抗药性演化权衡的精细分子机制，首次将泛素化这一基础细胞过程与昆虫杀虫剂抗性演化及其生殖适合度代价直接关联，找到了拨动这个“天平”的关键角色。这项发表于美国《国家科学院院刊》的研究成果，深化了对昆虫泛素化系统的认识及其在适合度过程中的作用，并为可持续害虫防治策略提供了新见解。

烟粉虱是被冠以“超级害虫”的世界性农业害虫，也是我国设施蔬菜的主要害虫。连续多年的抗性监测表明，田间烟粉虱对新烟碱类杀虫剂产生了高抗性，但其抗性演化几乎总伴随着适合度代价。

深入研究发现，E3 泛素连接酶 TRIM37 通过泛素化级联通路，调控转录因子 CREB 的稳定性，进而同时驱动解毒基因 CYP6CM1 过表达（赋予新烟碱类抗性）和卵子发生关键基因 Vasa 抑制（导致生殖力下



烟粉虱成虫。中国农业科学院蔬菜花卉研究所供图

降）。在抗性烟粉虱中，TRIM37 表达下调导致分子开关 CREB 蛋白累积，一个分子事件同时撬动了“生存”与“繁衍”两端，从而介导烟粉虱抗药性及其生殖代价。

美国国家科学院院士 Fred Gould 评价称：“该研究极具创新性，并显著深化了我们对遗传抗性机制的理解。”研究逐步揭开了田间烟粉虱如何形成新烟碱类杀虫剂的高抗性及其为了生存所付出代价的“分子面纱”，为后续的抗性治理和新农药研发指明方向。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1073/pnas.2536664123>

中国科学院天津工业生物技术研究所等

生物制氢从经验试错走向精准设计

本报讯（记者赵宇彤）中国科学院天津工业生物技术研究所研究员黄聪与东莞理工学院研究员刘倩合作，聚焦传统生物制氢过程中微生物群落高度异质、产氢效率不足及规模化调控困难等关键问题，提出人工智能(AI)与生物技术(BT)融合驱动的生物群落数字化设计新范式，为推动生物制氢由经验优化向精准设计转变提供了新思路。近日，相关研究成果发表于中国工程院院刊《工程(英文)》。

氢能是重工业、远距离交通和化工等难电气化领域的重要脱碳路径。生物制氢可在温和条件下将秸秆等有机废弃物转化为氢气，兼具低碳、资源化与环境友好优势。其中，暗发酵无需额外光能或电能，具备连续运行潜力，但仍存在底物预处理成本高、碳阻遏、菌群稳定性不足、挥发性脂肪酸积累、气液传质受限等问题，实际产氢率通常仅达到理论值的40%至60%。

AI与BT的融合朝着生物制氢从经验优化到数字化、可预测设计迈出重要一步。AI可结合机器学习、基因组尺度代谢模型、多组学数据及非线性降维方法，解析微生物群落中代谢网络、能量分配、基因调控和种间互作的复杂关系；扩散模型等方法

还能模拟单细胞代谢噪声并预测高阶网络效应。BT则通过高通量筛选、定向代谢网络重构、合成微生物群落构建及培养环境调控，减少对基因编辑的依赖，构建稳定、高效的产氢菌群。

研究提出“数字细胞—数字微生物群落—数字系统”的研究范式，以多组学、热力学与酶学约束建立细胞模型，再结合AI预测和实验反馈优化群落组成及反应过程，目标是设计仅含2~5种微生物、氢产率超过理论值60%的简化菌群。技术经济分析和生命周期评价结果表明，AI与BT结合有望在降低生物制氢成本与碳排放方面发挥重要作用，未来制氢成本有望降至每千克3.5美元以下。

需要指出的是，该技术的产业化应用仍面临多重挑战：一是高质量、多维度数据相对不足，制约模型训练与预测精度；二是算法在复杂工况下的鲁棒性仍需提升；三是实时监测与自动化实验平台尚不完善；四是在规模化过程中，抑制物积累、底物组成波动及菌群生态漂移等问题可能影响系统稳定性和产氢效率。

相关论文信息：
<https://10.1016/j.eng.2025.09.027>

广东江门发现樟属新种——簇序樟

本报讯（记者朱汉斌）中国科学院华南植物园研究员王瑞江团队在广东江门发现樟属新种——簇序樟。近日，相关成果在线发表于《植物钥匙》。

广义樟属约有250种，广泛分布于亚洲热带、亚热带至西太平洋地区，是森林生态系统的关键组成类群。近年来，我国在贵州、云南发现贵州樟和华樟两个樟属新种，目前国内记录约50种。广义樟属主要依据果期花被片宿存与否、叶序和叶脉类型及芽鳞有无等形态特征，划分为樟组和桂组。其中，樟组以果期无宿存花被、叶互生、离基三出脉或羽状脉、叶腋常具腺窝、芽具鳞片等特征与桂组相区别。

2024年9月，中国科学院华南植物园的邓双文博士在广东江门古兜山

省级自然保护区，开展广东省植物多样性全域调查及粤港澳大湾区生物多样性调查时，采集到一种形态独特的樟属植物。研究团队综合形态学、分子系统学和物候学证据，确认其为樟组新种，并命名为簇序樟。

簇序樟形态上与黄樟近似，其主要特征为叶片先端圆钝，圆锥聚伞花序着生于当年生枝顶端芽下方的苞片腋内，螺旋状互生，呈伞房状，或组成花序枝生于叶腋。目前，簇序樟仅见于广东江门古兜山省级自然保护区。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.3897/phytokeys.278.199869>

►簇序樟果期。研究团队供图



工程热物理发展学术论坛在京举行

本报讯（记者陈欢欢）8月25日，中国科学院工程热物理研究所（以下简称工程热物理所）建所70周年暨工程热物理发展学术论坛在京举行。工程热物理所所长陈海生作研究所70周年发展报告，党委书记徐纲致欢迎词并主持会议。中国科学院战略高技术研究局局长朱俊强、空军工程大学教授李应红、中国科学技术大学党委书记舒歌群、清华大学教授吕俊复4位院士分别作大会报告。

工程热物理所的前身是中国科学院动力研究室，由中国科学院院士、世界著名工程热物理学家吴仲华在1956年亲手创建，不久后又开创了工程热物理学科，由此开启中国工程热物理事业的新纪元。朱俊强指出，70年来，吴仲华播下的工程热物理的种子已然长成参天大树。如今，从航空发动机“中国心”到清洁能源体系，工程热物理已成为这些“国之大事”背后的关键科学基石。

中国科学院院士、南方科技大学讲席教授赵天寿表示，70年来工程热物理所从无到有、从筚路蓝缕到在能源动力领域举足轻重，靠的是一代代工程热物理人“工于致热”的执着和“诚以聚能”的情怀。在工程热物理所工作的经历在他心中烙下终身难忘的印记，无论走到哪里都始

终记得要心怀“国之大事”，脚踏实地、精益求精。

中国科学院力学研究所党委书记刘桂菊表示，让人敬佩的是，自1980年恢复建制以来，工程热物理所坚守初心使命、深耕学科建设、培育人才梯队、夯实科研平台，沉淀出深厚的学术底蕴和优良的科研生态，走出了一条立足国情、自主创新、服务国家的特色科研之路。

中国航空发动机集团副总经理吴联合指出，工程热物理所扎根能源动力领域，见证并推动了我国能源动力科技从跟跑、并跑到部分领跑的历史性跨越。尤其是敢于从国家迫切需要、行业当时尚未作为主攻方向的轻型发动机切入，走出一条中国科学院研制系列轻型动力整机的道路，为我国航空发动机事业贡献了不可替代的“工热力量”。

本次会议还设立动力、能源两个分论坛，20余位工程热物理学界专家学者进行报告，围绕能源动力领域基础研究、航空发动机材料与设计与、新型能源技术发展等前沿议题展开深入研讨。此外，大会开幕式上举行了吴仲华先生雕像揭幕仪式、所友会成立揭牌仪式，并颁发了中国工程热物理学会科学技术奖及吴仲华奖励基金奖项。来自国内各研究机构、高校和产业界的500余位代表参加了本次论坛。

“AI+DIY”癌症免疫治疗时代到来

■王月丹

近日，生物医药巨头莫德纳与默沙东联合公布了 mRNA 个性化疫苗(mRNA-4157)联合K药治疗高危黑色素瘤的关键Ⅲ期临床数据。K药是一种抗免疫检查点分子PD-1的单抗药物。结果表明，mRNA 个性化疫苗的应用可显著降低黑色素瘤的复发和远处转移风险。

这是全球首个在Ⅲ期临床试验中取得成功的 mRNA 个性化肿瘤治疗性疫苗。虽然这只是癌症免疫治疗专业领域研究应用的“一小步”，却有望改变人类重大疾病免疫治疗模式，开启人工智能(AI)辅助个性化癌症治疗的新时代。

传统癌症免疫治疗的短板

癌症是仅次于心血管疾病的导致人类死亡的第二大因素，全球每年新增癌症患者约2000万例，因癌症死亡约1000万例。目前，免疫治疗已成为继手术、放疗、化疗之后的第四大癌症治疗手段。以单克隆抗体药物为代表的抗体疗法、CAR-T细胞疗法为核心的细胞免疫疗法，已成为癌症治疗的重要手段。

然而，癌症的发生因素错综复杂，目前尚未被完全阐明。在不同癌症患者体内，癌细胞本身、宿主的免疫系统功能、癌症组织的微环境都有不同的状态和特点。从一定角度看，每个人癌症的发生与发展过程都各不相同。通常情况下，癌细胞的基因突变并非单个基因的突变，而是由基

因组不稳定导致。单个癌组织中往往存在超过3000个基因突变，这一特征被称为肿瘤突变负荷(TMB)。TMB的存在使人们在选择肿瘤免疫治疗靶标时面临困难。基因组不稳定导致的突变在癌组织细胞中持续存在，还会使肿瘤抗原发生改变或调变，使免疫治疗失去目标，产生耐药。

更重要的是，每个人的免疫系统与众不同。人体免疫系统识别各种抗原产生相应的特异性免疫应答时，一般都需要其自身主要组织相容性复合体(MHC)编码产物提呈，才能产生抗癌的特异性保护性免疫应答，从而清除癌细胞，发挥治疗癌症的作用。但MHC存在个体差异，这决定了每个人产生抗癌细胞免疫应答时需要的抗原信号不同，而抗原信号正是治疗性癌症疫苗的主要成分。

传统免疫治疗药物均基于特定的肿瘤抗原进行设计和制备，并未考虑不同患者具体的肿瘤抗原差异及其自身免疫系统个体化的适配性差异。而基于传统免疫治疗思路进行个性化癌症治疗，需要个性化设计、制备和应用，无法进行批量生产和大规模应用，成本很高、耗费时间长，一般癌症患者难以承受和等待。

mRNA 个性化癌症疫苗及其优势

mRNA 个性化癌症疫苗是一种基于编码可激发人体自身抗肿瘤免疫应答效应，从而杀伤并清除肿瘤细胞的抗原表位

mRNA 序列的定制个体化治疗性癌症疫苗，属于抗肿瘤主动免疫疗法的范畴。

mRNA 疫苗最大的优势是设计的灵活性。mRNA 疫苗的主要成分是编码癌细胞或病原体特定抗原的 mRNA 序列，当其被 LNP 等载体系统携带进入宿主细胞后，就能在细胞中表达出特定的抗原或抗原表位，激发人体产生特异性抗感染免疫应答，从而清除癌细胞或病原体，发挥治疗癌症或感染性疾病的作用。

mRNA 编码的蛋白质密码系统早已被破译，理论上 mRNA 疫苗可编码自然界中所有可能存在的抗原或抗原表位，并在人体细胞中进行表达并激发保护性免疫应答。因此，利用患者的癌组织基因测序和 MHC 免疫系统测序数据，在 AI 辅助下，能够计算、设计和制备出适合该患者的个性化肿瘤新抗原疫苗，没有癌症种类和人群 MHC 差异的限制性。

同时，mRNA 疫苗的制备工艺成熟且成本较低。mRNA 的合成技术路线比较明确，所需要的制作设备体积较小，试剂种类较少且相对价格较低。甚至连美国企业家埃隆·马斯克都说，将 mRNA 合成仪等设备和试剂进行一定的组合，安装在经过改造的无人驾驶汽车上，就能做成一台移动式 mRNA 疫苗打印机，用于随时随地进行 mRNA 疫苗的制备。

此外，mRNA 疫苗具备极高的安全性。从成分上来说，mRNA 个性化癌症疫苗与之前广泛应用的新型冠状病毒 mRNA

NA 疫苗没有太大不同。据估计，后者全球接种量已达到68亿至75亿剂次，严重不良反应发生率极低，安全性很高。

开启癌症免疫治疗新时代

传统的癌症免疫治疗往往依赖专业医生和大型医疗机构，需要借助大型药企业提供的抗体药物或细胞免疫疗法才能进行，资源和时间成本很高。而 mRNA 疫苗的制备成本低、应用安全性高，治疗花费较低。

此外，传统的癌症免疫治疗靶点和药物品种比较有限，无法匹配癌症患者的具体组织抗原特点和免疫系统个体情况，难以满足个性化、精准化的癌症治疗需求。而 mRNA 疫苗的设计和制备都具有非常好的灵活性，在 AI 辅助下可以合成几乎适合每一位癌症患者具体情况和免疫系统特点的全部疫苗，可以满足癌症患者个体化治疗的要求。在此过程中，癌症患者也有机会在 AI 的辅助下参与自己的癌症个性化精准治疗。不仅如此，即使初次 mRNA 个性化疫苗治疗效果不佳，也能够选择针对其他癌抗原靶点的 mRNA 个性化疫苗，从而有比较充分的时间进行癌症的免疫治疗。

mRNA 个性化疫苗研究和应用的不断进展，开启了癌症患者“AI+DIY（自己动手制作）”免疫治疗的新时代。

（作者系北京大学基础医学院教授）