

从蛛网觅灵感，新型水凝胶打造具身人机交互系统

■本报记者 叶满山

在人工智能浪潮之下，传统触屏、语音、视觉交互方式的短板日益凸显。柔性穿戴传感技术作为下一代人机交互的核心载体，凭借贴合人体、感知灵敏的优势备受关注，而水凝胶因其类皮肤特性、优异生物相容性，成为柔性传感的理想材料。

近日，中国科学院兰州化学物理研究所（以下简称兰州化物所）润滑材料全国重点实验室功能润滑材料课题组联合多家单位开展跨领域协同攻关，创新融合类芬顿反应与光固化3D打印技术，研制出高性能石墨烯-铁离子动态配位海藻酸钠-聚丙烯酰胺水凝胶材料，并基于蜘蛛捕猎仿生原理设计十字形传感贴片，打造出低约束、高精度的新型具身人机交互系统。相关论文发表于《先进功能材料》。



光固化3D打印不同结构的GFSP水凝胶。兰州化物所供图

解开行业多年死结

长期以来，高性能双交联水凝胶光固化3D打印制造存在诸多技术壁垒，一方面传统制备工艺导致材料机械柔顺性与传感性能无法同步提升，另一方面高密度传感阵列带来穿戴束缚、舒适度下降等问题，两大难题严重制约着柔性穿戴传感领域的产业化进程。

“目前主流的高性能双交联水凝胶普遍采用‘釜内一步’制备工艺，这套流程应用到光固化3D打印时会暴露出明显缺陷。”兰州化物所研究员王金清向《中国科学报》细数了当下行业面临的两大核心技术难题。

据了解，为保障打印结构完整，工艺会被迫提高初始交联密度，水凝胶变硬，失去类皮肤的柔软特质。同时，石墨烯等主流导电填料具备吸光特性，会抑制光聚合反应。这就导致研发时要么舍弃导电填料牺牲传感性能，要么放弃打印精度、机械柔顺性和传感性能始终处于对立状态。

除了材料本身的矛盾，传统传感阵列的布设模式也让穿戴体验陷入僵局。王金清表示，人体关节运动复杂多变，需要多维度信号采集，行业内普遍采用高密度传感阵列来补足感知维度。

研究发现，大量传感单元与线路叠加在穿戴设备上，不仅会增加机械约束和穿戴负荷，限制

人体正常生理活动，密集布线还容易引发信号串扰，增加硬件成本与数据分析难度，舒适性、实用性与信号稳定性难以兼顾。

两大痛点叠加，让优质柔性水凝胶传感器迟迟无法走出实验室。

面对行业共性难题，团队没有沿用传统改良配方、优化设备的常规思路，而是从化学反应机理入手，以异丙苯基二茂铁六氟磷酸盐作为光引发剂，将类芬顿反应与光固化3D打印技术深度融合，构建起同步触发自由基与阳离子双重光聚合反应的全新机制。

依托该技术，团队成功制备出GFSP系列水凝胶材料。在动态响应性能上，材料响应时间仅14.22毫秒，恢复时间为21.56毫秒，毫秒级的反应速度可实现人机交互实时联动。

“我们终于实现了水凝胶可打印性、机械柔顺性与传感功能性三者的协同优化，从材料根源上解开了行业多年的死结。”王金清说道。

设计灵感来自蜘蛛捕猎

解决材料难题后，团队将目光投向传感器结构设计，力求摆脱高密度阵列的束缚，在轻量化、

低约束的前提下保证信号采集的完整性。

自然界的生物特征往往是科技创新的灵感来源。这项研究的仿生设计灵感源自蜘蛛依靠蛛网远程感知猎物振动的生存机制。

“蜘蛛依靠蛛网传递振动信号，即便猎物距离较远，也能精准判断位置与状态。人体皮肤和人体筋膜、肌腱同样具备力学传递能力，关节运动产生的形变可以传递到手臂、手背等非关节区域。”王金清解释，基于这一思路，团队提出低约束穿戴式仿生传感策略，摒弃将传感器密集贴在关节处的传统方案，转而设计可布置在平坦皮肤区域的感知单元，利用人体自身组织传递力学信号。

经过多轮仿真模拟与实物测试，团队最终选定十字形结构打造LCWHSP（低约束可穿戴水凝胶传感贴片）。十字形是多维传感器领域的经典构型，四个传感臂可分别响应不同方向的应变信号，团队将这一结构移植到柔性水凝胶体系中，赋予单片传感器单点多维感知能力。

相较于传统高密度传感阵列，十字形仿生结构的优势十分突出。王金清介绍，以手势感知为例，单点多维感知模式让传感器数量减少80%以上，繁琐的布线、多通道信号采集模块也随之精简，从物理层面消除了穿戴笨重、线路缠绕的问题。

同时，贴片不再贴合关节褶皱处，肢体活动时不会发生摩擦、拉扯与受到限制，搭配全柔性材料与厚度仅0.02毫米的超薄柔性基底，电极，实现了真正的“无感佩戴”。此外，该贴片结构简单，用户可自行粘贴、反复使用，大幅降低使用门槛与应用成本，兼顾了实用性与经济性。

依托GFSP水凝胶材料与十字形仿生贴片，团队进一步整合信号采集硬件、深度学习智能分析模型以及多场景应用模块，搭建起一套完整的具身人机交互系统。经过大量样本测试，该系统对静态手势、动态连续手势的识别准确率达到98.6%。

在实际演示中，使用者仅凭简单手势，就能流畅操控虚拟游戏中的角色躲避障碍、发出指令，也可远程操控智能机械臂完成抓取、抬升、旋转等精细化作业。交互过程实时、稳定、精准。

除此之外，凭借捕捉关节微摩擦、微弱振动的能力，这款传感器还衍生出多元应用潜力，例如，可在骨关节炎早期筛查、术后康复监测、运动损伤预警等医疗健康领域发挥重要作用，为居家健康监测、个性化康复训练提供全新技术方案。

从实验室向产业化过渡

从化学反应机理创新到仿生结构设计，再到整套交互系统搭建，该项目历经近四年持续攻关，基于材料化学、力学、电子工程、生物医学工程、软件工程等多学科深度交叉融合取得了成果。

王金清坦言，研发之路充满挑战。初期团队尝试传统两步法工艺时，频繁出现打印结构残留、材料硬化、导电填料导致固化失败等问题，数十种配方、工艺参数反复调试均收效甚微。

“当我们第一次利用新体系成功打印出完整的石墨烯复合水凝胶时，所有人都备受鼓舞。那一刻我们知道，方向走对了。”王金清说，而当十字形贴片顺利采集到手势信号、精准控制外部设备时，大家真切感受到，实验室里的化学反应真正落地为改变交互方式的实用技术。

当前，该技术已完成核心原理验证、样机测试，并申报多项发明专利与软件著作权，构建起初步的知识产权体系，整体处于从实验室研发向产业化过渡的关键阶段。

谈及后续规划，王金清介绍，团队计划优先推动技术在三大领域落地示范：一是工业领域，应用于无人机、工业机器人远程操控，赋能高危作业场景；二是医疗健康领域，落地运动监测、关节康复、心血管健康监测等民生场景；三是消费电子领域，结合虚拟现实/增强现实设备完成沉浸式交互体验。

王金清认为，柔性皮肤式电子、多模态隐式交互、具身智能闭环系统，将成为未来人机交互的核心发展方向。持续探索新型仿生低约束传感结构，将进一步减轻穿戴生理负担，搭建大规模多模态数据库与自适应算法，打造适配全场景的具身交互引擎。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1002/adfm.76031>

“奖状”遥感飞机首飞四十周年 我国航空遥感系统实现从引进改装到自主创新跨越

本报讯（记者高雅丽）近日，由中国科学院空天信息创新研究院航空遥感中心主力的航空遥感系统国家重大科技基础设施创新发展研讨会在京召开。恰逢我国第一代航空遥感系统“奖状”遥感飞机迎来首飞四十周年重要节点，本次会议系统总结航空遥感基础设施建设发展成效，探讨领域创新突破与未来发展新路径。

1986年6月28日，两架国外引进改装完成的“奖状”遥感飞机在北京良乡机场正式首飞，填补了我国先进航空遥感平台空白。经过改装建设，“奖状”遥感飞机可搭载可见光、红外和微波等多波段传感器，是国内首套、同期规模与技术水平顶尖的航空遥感系统，可适配大范围资源普查、应急救援、遥感科学试验、空间科学研究等多元任务。

随着经济社会发展，国土测绘、生态监测、现代农业、冰冻圈科学研究等对航空遥感提出更高要求，多载荷共轨观测、长航程、多窗口、大范围协同探测成为刚需。我国于“十一五”适时启动重大科技基础设施航空遥感系统建设项目，选用具有自主知识产权的新舟60客机作为飞行平台，打造新一代国家级航空遥感平台。

新一代国产航空遥感系统投入运行后，持续产出重大科技与应用成果，例如实现田间基础设施精细化识别，提升洪涝、地质灾害隐患排查精度，支撑山水林田湖草沙一体化保护修复等。

在我国北方广袤的农牧交错带和东北冷凉区，每年十月秋收过后，大片耕地便进入长达半年的“休眠期”。冬春时节，裸露的土地不仅白白闲置，更成为北方沙尘天气的重要沙源地。

与此同时，全国优质饲草却面临着约5000万吨的刚性缺口。一边是土地资源的巨大浪费，一边是草畜平衡的现实压力，有没有一种作物能在这片冬闲田上既固土防沙又产出饲草？

近日，在内蒙古通辽市召开的“第六届科尔沁沙地冬黑麦+轮作复种模式研究与示范现场观摩会”上，来自全国各地的草业专家、农技推广人员和种植大户围着一片即将收割的冬黑麦田开展了讨论。

北方多茬作物的关键拼图

冬黑麦并非新鲜事物，但把它作为一种系统的复种模式推向北方农业生产一线，却是近年来国家牧草产业技术体系岗位科学家、中国农业大学教授王显国团队认真做的一件事。

王显国告诉《中国科学报》：“冬黑麦是个配角，但它能给很多主角搭戏。它能让整块地在冬天不空着，第二年一返青就猛长，把时间窗口硬生生抢出来。”他所说的抢时间，指的是北方耕地从“一年一熟”向“一年两收”的尝试。

传统上，由于积温和无霜期的限制，北方大部分地区只能种一季春播作物。冬黑麦凭借极强的耐寒性——强冬性品种可耐受零下27℃至零下30℃的极端低温——可以在第一年秋季播种，安全越冬。第二年5月底至6月初收获一茬饲草，然后立即接茬种植青贮玉米、大豆、鲜食玉米、向日葵甚至高粱或谷子。这样一来，冬闲田被

按图索技

新策略实现高效太阳能海水淡化

本报讯（记者甘晓）近期，中国科学院过程工程研究所（以下简称过程工程所）研究员杨乃亮与深圳大学教授王丹团队联合提出一种“高分子穿插束纳纳米颗粒”的三维集成策略，利用高分子链锁扣中空多壳层结构(HoMS)，构筑出3D光热架构，在实验条件下实现了每小时每平方米面积38.14千克的光热界面蒸发速率，并集成光伏-光热耦合系统，通过户外试验装置实现了从海水淡化到农业灌溉的初步探索。相关研究成果日前发表于《先进材料》。

此前，研究团队已开发出基于HoMS的二维蒸发膜材料，蒸发速率达每小时每平方米面积4.02千克，刷新了纪录。在此基础上，团队进一步攻克了材料宏量制备与三维集成核心难题，采用次序模板法，在过程工程所廊坊工程试验基地进行放大，通过20升水热釜与多温区隧道炉精准调控，实现了非晶五氧化二钨/碳复合中空多壳层材料百克级稳定量化制备。随后，该材料在海水加速老化试验中，实现了30天无颗粒脱落。

据介绍，该复合结构在微米尺度上呈现“纳米森林”形貌。试验数据显示，通过多重光散射与吸收通道，全太阳光谱吸收率达90.2%。同时，纳米限域效应重构水分子氢键



廊坊工程试验基地的光伏-光热海水淡化设备及灌溉试验田。科研团队供图

网络，使水蒸发能耗降低45.7%，蒸发速率较前期的二维薄膜提升了8.5倍。

研究团队进一步开发了户外试验装置。在自然光照下，该装置日产淡水20.16升，可满足约10人的基本饮水需求，水质符合世

界卫生组织饮用水标准。装置所产水已成功用于5平方米农田的全年灌溉，菠菜、玉米、白菜等多种作物已完成一个全生长周期。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1002/adma.73756>

冬黑麦：北方冬闲田里“配角”的逆袭

■本报记者 李晨



观摩会现场林辉草业基地待刈的400亩连片冬黑麦田。受访者供图

有效利用，一块地一年产出两茬作物，土地利用效率大幅提升。

国家牧草产业技术体系首席科学家、中国农业大学教授王显国团队认真做的一件事。王显国告诉《中国科学报》：“冬黑麦是个配角，但它能给很多主角搭戏。它能让整块地在冬天不空着，第二年一返青就猛长，把时间窗口硬生生抢出来。”他所说的抢时间，指的是北方耕地从“一年一熟”向“一年两收”的尝试。

传统上，由于积温和无霜期的限制，北方大部分地区只能种一季春播作物。冬黑麦凭借极强的耐寒性——强冬性品种可耐受零下27℃至零下30℃的极端低温——可以在第一年秋季播种，安全越冬。第二年5月底至6月初收获一茬饲草，然后立即接茬种植青贮玉米、大豆、鲜食玉米、向日葵甚至高粱或谷子。这样一来，冬闲田被

推广面积约4万亩，辐射范围已经从通辽的核心示范区扩展到内蒙古西部的鄂尔多斯、中部的呼和浩特，以及辽宁、吉林、黑龙江的部分地区。该技术入选2025年中国农业农村重大科技新成果和内蒙古自治区“六新”科技成果。

推广路上的几道“坎儿”

然而，冬黑麦复种模式在展现出诱人前景的同时，也面临着多重现实困境。

全国畜牧总站正高级畜牧师闫敏指出，草产业长期以来缺乏纳入国家国民经济统计体系的官方通道，在政策话语体系中仍然处于“重要但边缘”的位置。此前，苜蓿等多年生牧草在非粮化政策收紧后种植面积锐减的事实，至今仍是行业的隐痛。

冬黑麦的优势恰恰在于它与粮食争地，但它终究逃不过市场的检验。王显国说：“这两年草价有点低迷。种完冬黑麦卖给谁？在国内饲草市场它算个新手，大家还不太了解它。”

这番话道出了冬黑麦推广中最核心的瓶颈——下游市场的承接能力和价格周期的波动。在通辽市开鲁县林辉草业基地，负责人刘林依靠种养结合的自用消化和稳定的订单渠道，能够将冬黑麦干草卖到每吨1600元的价格。但对于普

通农户来说，如果没有确定的销路和政策兜底，多种一茬就意味着多一茬的成本和风险。

技术本身的精细程度也是一道门槛。内蒙古民族大学教授张玉霞详细讲解了冬黑麦播种的时间窗口：在通辽地区，最佳播种期是9月15日至9月30日，最晚不能晚于10月1日；如果选择芽越冬路线，则要在10月25日至11月5日之间播种。而最忌讳的是10月中旬，此时幼苗刚刚出土却没有积累足够的营养，越冬死亡率会急剧攀升。

内蒙古民族大学副校长红梅指出：“这种精确到旬的农事要求，对于习惯了粗放经营的北方农民来说，是一个不小的挑战。”示范基地内就有一块地因为播种偏晚导致苗弱、整齐度差成了“反面教材”，这直观地说明了技术执行的重要性。

此外，冬黑麦若走收籽粒的路线，收获期要拖到7月中旬，此后能够接茬的作物极少。因此，目前产业化的主力方向仍然是收饲草。在5月下旬至6月上旬收获，对于老茬作物的更新，冬黑麦还可以通过免耕播种的方式介入，既能确保地表覆盖，又能提升老茬田的饲草产量。

目前，内蒙古自治区已启动冬黑麦轮作复种模式重大技术协同项目，鄂尔多斯市乌审旗对冬黑麦复种模式的种植补贴达到了每亩200元；辽宁省也在新一轮补贴奖励政策中将冬黑麦纳入了补贴范围。

集装箱

中广核广东太平岭核电2号机组首次并网发电

本报讯（记者朱汉斌 通讯员朱丹）记者从中国广核集团有限公司（以下简称中广核）获悉，7月4日9时16分，中广核广东太平岭核电项目2号机组首次并网成功，发出第一度电，标志着粤港澳大湾区首个“华龙一号”核电基地的第二台机组正式具备向电网输送电力的能力，向着投产目标迈出关键一步。

太平岭核电项目2号机组于2020年10月15日开工建设。并网后经现场确认，机组运行状态良好，各项技术指标符合设计预期。后续将按计划开展系列试验，进一步验证机组性能，预计2026年下半年正式投产发电。

中广核惠州核电有限公司负责人介绍，按2025年国内核电平均利用小时数测算，太平岭核电项目2号机组正式投产后，预计年发电量超90亿千瓦时，能够满足近100万人口的生产生活年度用电需求，每年等效减排二氧化碳超830万吨。

“陪伴型”超仿生人形机器人首发

本报讯（记者刁雯蕙）日前，深圳市优必选科技股份有限公司（以下简称优必选）在深圳举办2026年度全球发布会，发布面向下一个十年的“人机共生”战略，以及全尺寸超仿生人形机器人优世界U1系列产品，包括半身版U1 Lite、高配全身版U1 Pro及高动态全身版U1 Ultra三款产品，并区分男版和女版。

其中，全身版产品男版身高183厘米，重42千克，女版身高168厘米，重35.2千克。男女版都拥有88个自由度及独创双支点仿生颈椎，覆盖人类90%基础动作。U1系列产品搭载了全球首个针对长期陪伴的情感大模型，可识别20余种细粒度情绪，准确率超90%。其仿生慢慢脑架构借鉴认知神经科学，实现500毫秒直觉反应与千亿级参数深度推理的协同。仿生表达驱动系统通过自研控制器将语音-唇形延迟控制在20毫秒内。

据介绍，U1系列的应用场景覆盖日常陪伴、情绪支持、生活美学、社交辅助等消费类场景，以及迎宾接待、养老陪伴、心理疗愈、文旅展览、科研教学、高端家政服务商用类场景。优必选创始人周剑发布了“人机共生”战略。人机共生将分三步演进：先替代高危重复劳动解放人力，再渗透生活提供陪伴服务，最终人机深度融合不分边界。

《全球大语言模型科技安全防范能力测评报告》发布

本报讯（记者沈春蕾）7月2日，在北京举行的2026全球数字经济大会云智算安全论坛上，《全球大语言模型科技安全防范能力测评报告》（以下简称报告）发布。报告由东望科技数据有限责任公司联合上海财经大学数字经济学院共同编制，是全球首份大语言模型科技安全专项测评报告，也是首份大语言模型科技向善导向测评报告。

报告显示，多数模型具备基础拒答能力，直接攻击总体成功率为7.6%，但在前缀注入、场景伪装、情感伪装，以及伪装与示例诱导结合的复合攻击下，部分模型的安全边界明显承压。目前，攻击成功率最高的是场景伪装加上示例诱导，达53.8%；其次是场景伪装、前缀注入、情感伪装，分别为51.3%、43.4%、30.7%；最低的情感伪装加示例诱导也达到了26.5%。

从“能越冬”到“能算账”

面对这些困难，科研人员和推广部门并没有停留在“品种耐寒”这一个卖点。过去6年，他们围绕冬黑麦构建的一整套技术体系，正在逐步回答“怎么种得好、怎么接得上、怎么算得过账”这三个核心问题。

在品种端，国内的育种单位依托从俄罗斯引进的耐严寒种质资源，已经选育出一批适应不同区域的当家品种。通辽市农牧业科学院副院长王振国介绍，吉林省白城市农业科学院的“白基一号”于2023年在吉林省登记。通辽市农牧业科学院培育的“通草一号”和“通草二号”则在2026年1月通过内蒙古自治区审定，填补了当地冬黑麦饲草品种审定的空白。黑龙江省农科院草业研究所选育的“科合3008”也在寒地表现出良好的适应性。

正如王显国所言：“我们不是为了种两茬而种两茬，如果不能跟着茬作物形成系统综合效益，冬黑麦复种体系就无从谈起。”

在栽培端，项目组已经摸索出一套成熟的“茬口衔接表”。不同的后茬作物对应不同的时间预算和管理方案。鲜食玉米、向日葵、高粱、谷子，甚至花生和马铃薯等，都可以在这套框架中找到对应的位置。对于老茬作物的更新，冬黑麦还可以通过免耕播种的方式介入，既能确保地表覆盖，又能提升老茬田的饲草产量。

目前，内蒙古自治区已启动冬黑麦轮作复种模式重大技术协同项目，鄂尔多斯市乌审旗对冬黑麦复种模式的种植补贴达到了每亩200元；辽宁省也在新一轮补贴奖励政策中将冬黑麦纳入了补贴范围。