

无惧高压低温极端环境

# 软体机器人进4070米深海

## K 热点透视

在4070米深的幽暗海山区，一条长约32厘米、翼展宽约18厘米、重量仅670克的“软体鱼”正在灵活巡弋。这条特殊的“鱼”，是哈尔滨工程大学船舶工程学院教授李国瑞课题组的最新研究成果——电液驱动深海软体机器人。近日，这项研究成果以“塑化电液软体机器人深海自主翱翔”为题发表于国际学术期刊《科学·机器人》上，并同时登上《科学》官网首页的专题报道页面。

### 将电场力转化为驱动力

深海作为地球上最大的未知疆域，是人类探索生命起源、进行资源勘探和研究气候演化等关键问题的前沿阵地。但探索这片幽暗深渊绝非易事，其高压、低温等极端环境时刻挑战着人类科技的极限。同时，如何平衡高昂的探索成本、装备的可靠性与深海脆弱生态的保护，也是横亘在科研人员面前的难题。

2022年，李国瑞课题组从麦克斯韦“电致流动”这一经典物理现象中获得灵感，开启了电液驱动深海软体机器人的研究。团队利用静电场控制介电液体有序流动，成功把电场力转化成了柔性电液单元的驱动力。

课题组设计的柔性电液单元由薄膜外壳、柔性电极和内部的介电液体组成。在电场力作用下，介电液体定向流动，能精确驱动柔性电液单元产生可控的形变。团队系统研究了这种柔性电液单元在高压、低温条件下的力电耦合变形效果，让机器人具备了良好的大变形能力。

不过，深海的高压和低温会让软材料变硬，这将严重影响柔性电液单元的变形力和机器人的机动性。针对这个瓶颈，团队发现了柔性电液单元介质的液—固塑化机制，提出了“电液、塑化介质一体化”解决方案。这个方法既能保证



电液驱动深海软体机器人 ■ 受访单位供图

柔性电液单元产生大变形，又能维持其弹性，突破了深海高压和低温对于柔软材料的双重限制，显著提升了机器人在极端环境下的机动能力。

### 可适应深海复杂环境

这款电液驱动深海软体机器人的机身集成了控制电路、传感器、电池等元件。课题组对机器人的软体驱动器、光学传感器、电子元件和软基座等进行了力学优化，使得机器人在深海高压环境下，体内的应力状态更稳定。更巧妙的是，柔性电液单元内部的介电液体能与深海海

水压力自动平衡，使机器人可以适应全海深的压力环境，不用额外的耐压外壳就能承受全海深的静水压力。

机器人通过自带的小型化能源控制系统驱动柔性电液单元协同工作。当软基座中的电子器件产生高压电信号时，柔性电液单元会在电压信号的作用下，产生类似“流体静力骨骼”的变形模式，让机器人在深海中实现直行、转弯等多种运动轨迹。

此外，这款软体机器人还集成了微型深海光学感知系统，能在深海极端环境下实时感知自身运动状态和周围环境。

为了进一步证实该机器人在深海实地探测作业中的可靠性，在广东智能无人系统研究院、广州海洋地质调查局、浙江大学、中国船舶科学研究中心等单位的联合支持下，课题组研发的深海软体机器人先后在南海的海马冷泉区、海山区等海域开展了多次海试验证。

2024年6月13日深夜，团队研制的深海软体机器人在南海3176米深度完成布放。海试影像显示，机器人在深海复杂水流环境下完成了复杂轨迹运动、近底感知探测、自主姿态调控、返航等一系列任务，证实了它在深海极端压力和复杂流动环境下的可靠机动性和感知能力。

同年7月4~6日，这款深海软体机器人在海马冷泉区完成了多次布放，成功实现了约1369米深海环境下的低扰动探测任务。随后，机器人搭载“海星”号6000米级深海ROV，在约4070米深度的海山区开展了航行试验，探索了深海潜水器和小型深海软体机器人协同作业，实现大范围、低扰动深海探测的可行性。

此外，为了验证这款软体机器人与水下环境的生态融合性，课题组还利用它开展了海洋生态环境和群落的原位、近距离行为观测。“经过多次海试的严苛考验，这款软体机器人展现出良好的机动性、可靠的极端环境适应性和低扰动探测能力，有望为深海生态监测贡献力量。”课题组核心成员沈鹏说。

目前，团队正开展小型化深海软体机器人的驱动、感知、通讯一体化集成及群体智能等方向的探索。

李国瑞表示，未来，团队将持续突破极端环境下柔性装备的材料耐久性、系统可靠性、智能化水平等关键挑战，为深海柔性装备探测作业拓展更广阔的应用空间。比如，可以利用群体化的深海软体机器人低扰动地融入深海生物群落或矿区进行原位探测；也能利用深海软体机器手实现脆弱样本的无损采集、精细操纵与安全交互等。

朱虹

磁悬浮空气压缩机降低能耗、AI算法提高产量……

# 创新技术勾勒生物发酵产业未来图景

一排排排磁悬浮空气压缩机静音运转，巨型不锈钢发酵罐的智能控制系统闪烁不停，形似乐器的超精流体分离设备快速将细胞破壁分离……这些场景勾勒出中国生物发酵产业的未来图景。

日前，2025第15届国际生物发酵系列展(上海)举办。作为亚洲规模最大、专业性最强的生物技术行业盛会，500多家参展企业集中展示生物发酵领域的前沿技术、创新产品及解决方案，全面呈现生物发酵技术全产业链的发展趋势，为我国乃至全球生物发酵产业高质量发展注入新动能。

### 规模持续增长

“十四五”时期，我国提出从大力夯实生物经济创新基础、培育壮大生物经济支柱产业等方面发展生物经济。在国家产业政策的支持和引导下，生物发酵产业取得长足进步。数据显示，2024年，生物发酵产品产量达3400万吨，同比增长5.0%；出口量约881万吨，同比增长20%。2025年上半年，生物发酵产品产量达1646万吨，同比增长约4.7%；出口量约449万吨，同比增长3.3%。

技术创新为生物发酵产业发展注入新活力。智研咨询发布的《2025—2031年中国生物发酵行业市场全景调研及前景战略研判报告》显示，2016年~2024年，我国生物发酵专利数量累计达13710件。

拥有授权专利367项的南京磁谷科技股份有限公司，是我国第一家磁悬浮流体设备制造企业。本届展会，这家企业携全新升级的磁悬浮空压机A+系列与磁悬浮冷水机组亮相。展台前，技术专家现场讲解：“发酵工艺对压缩空气质量要求严苛，传统空压机容易因润滑油混入导致染菌，且能耗高、维护频繁。我们的磁悬浮技术空压机A+系列比传统空压机节能约20%，做到了100%无油、低噪声、易安装、免维护，可以帮助企业提升生产效率。”

作为一家从事生物制剂和发酵用化学品研发、生产、销售的高新技术企业，江苏博扬生物制品有限公司携新研

发的天门冬酰胺酶产品亮相展会，吸引许多客商关注。企业副总经理尚宁介绍，油炸食品因其独特风味和诱人色泽，受到消费者喜爱。但是，高温油炸过程中产生的2A级致癌物丙烯酰胺对身体有害。针对这一痛点，公司研发了新型酶制剂，可用于烘焙、油炸食品的发酵环节。“这款产品在50℃~95℃的有效温度下，可以减少热加工食品中潜在致癌物丙烯酰胺的生成，并不影响食品口感。”尚宁说。

### 当前仍存堵点

在肯定成绩的同时，也要清醒地看到，当前我国生物发酵产业发展仍面临一些问题。

目前，在整个生物制造产业中，我国仍主要依赖有机合成、植物提取、石油化工等传统制备方式，能耗高、污染大。例如，可降解材料单体二元羧酸的生产过程高度依赖化学方式，生产过程中会产生大量废水、废气与固体废弃物，亟待对制造方式进行转型升级。

同时，原料体系单一是我国生物发酵从业者面前的另一大难点。业内人士介绍，在我国生物制造项目中，超九成项目以玉米淀粉等粮食基原料为主，致使原料成本占比超六成，因此亟待加快非粮食原料路线的突破。

在本届展会的安琪酵母股份有限公司展台，工作人员介绍，企业采用云南普洱当地丰富的糖蜜等非粮原料替代传统玉米浆，并进一步提高了生产线产能和产品质量。

未来，如何通过基因编辑技术改造微生物，突破粮食依赖路径，实现木质纤维素、有机废弃物、二氧化碳等非粮原料的高效利用，还需要我国科研人员不断突破。

此外，我国生物发酵产业还存在分离难度大、产品经济性欠缺的问题。同时，我国生物发酵产品品类集中于中低端，高附加值产品占比较低，发酵产能结构性过剩问题较为突出。

作为中国膜分离技术领域的领军者，江苏久吾高科技术有限公司携创新膜技术、绿色智能制造解决方案及最



一家生物发酵企业的研发人员在进行益生菌培养实验 ■ 视觉中国

新成果亮相展会。“我们针对特定发酵产品开发的定制化膜分离工艺，可显著提高目标产物的收率和纯度，并缩短生产周期。”现场工作人员介绍，依托先进的膜孔结构设计，公司的各式膜产品均可实现纳米级物质的精准分离，保障产物的纯度。

生物催化剂可以更好地促进生物发酵。当前，通过不同方式生产的生物催化剂难以与工业环境和工业原料良好适配的问题，同样需要引起重视。研究表明，在规模化生产过程中，作为生物催化剂的实验室菌种面临环境耐受性差、代谢通量低等问题，使得工程放大的成功率低于一成。

针对这一痛点，本届展会参展商江苏巨能机械有限公司研发的50立方米超大型节能发酵罐，通过新型磁力密封技术实现了无菌环境下的高效传质，使菌种存活率提升至95%以上。但未来，取得技术突破的企业如何以点带面，助力行业整体提升工业适配能力，仍有很长的路要走。

### 交叉融合创新

生物发酵是前沿性基础产业，承载

着实施“健康中国”战略目标任务。从本届展会来看，智能化、绿色化、融合化已成为生物发酵技术发展的新趋势。

AI、大数据与发酵工程的深度融合，正在重塑生物发酵产业的生产模式，推动其从“经验驱动”转向“数据驱动”。

亚波光子(深圳)科技有限公司是一家专注于提供生物、制药、化工和能源过程分析与控制解决方案的企业。他们推出的单通道和四通道在线拉曼分析仪等产品，适用于菌株构建和高通量筛选以及微生物培养、结晶和纯化等生化过程的在线分析和智能控制。工作人员介绍，在蛋白质连续流发酵生产线上应用在线拉曼分析和AI智能化补糖控制技术，可将蛋白产量提升30%。

生物发酵技术与食品、化工、医药、材料、能源等领域的交叉融合创新，正催生出“生物制造”新业态。中商产业研究院预测，2025年中国生物医药市场规模将增至22427亿元，功能食品市场规模将达到3510.34亿元。这一巨大的市场空间为生物发酵产业提供了广阔前景，将推动我国生物发酵产业进入高质量发展阶段。

李均

## K 创新杂谈

chuangxin zatan

工业化是现代化的基础和核心动力。“十四五”以来，我国新型工业化建设稳扎稳打、纵深推进，在规模扩张、创新突破、结构优化等方面取得扎实成效。

9月9日在国新办举行的“高质量完成‘十四五’规划”系列主题新闻发布会上，工业和信息化部部长李乐成介绍，“十四五”以来，工业和信息化系统顶住外部压力、经受风雨洗礼，推进新型工业化持续走深走实，取得了新的历史性成就，为增强国家的经济实力、科技实力、综合国力，提高人民生活质量、生活水平提供了坚实支撑。

工业经济稳健前行，产业格局不断优化，“压舱石”更显厚重。制造业是国民经济命脉所系，是立国之本、强国之基。数据显示，2020~2024年，我国全部工业增加值由31.3万亿元跃升至40.5万亿元，制造业增加值由26.6万亿元稳健增长到33.6万亿元。“十四五”期间，我国制造业增加值占全球份额接近30%，总体规模连续15年保持全球第一，对全球制造业增长贡献率超过30%。产业链供应链韧性提升，产业根基更加牢固。五年来，我国持续推进制造业重点产业链提质行动与产业基础重塑工程，在集成电路、工业母机等“卡脖子”领域，一批关键技术实现突破，核心产品完成工程化、产业化落地，同步形成百余项行业标准、千余项发明专利，产业基础薄弱环节加快补齐，产业链供应链自主性、安全性显著提高。

创新引擎火力全开，发展动能持续增强。创新是工业转型升级的“第一动力”。五年间，规模以上制造业研发投入比重突破1.6%，570余家工业企业进入全球研发投入2500强。在关键领域，我国工业创新逐步实现从“跟跑”向“并跑”“领跑”转变：“嫦娥”探月、“天和”驻空、“北斗”组网夯实航天工业根基，C919大飞机开启商业运营、“爱达·魔都号”邮轮交付运营、CR450动车组下线，标志着高端装备制造能力显著提升；ECMO(体外膜肺氧合机)打破国外垄断，展现医药工业创新实力；量子通信等前沿领域成果落地，进一步拓宽工业创新边界。

先进制造加速崛起，数智应用落地见效，产业结构不断优化。“十四五”期间，产业升级步伐加快，细分领域亮点突出。2020~2024年，我国装备制造业、高技术制造业增加值年均增速分别达到7.9%与8.7%，在规上工业中的占比提升至34.6%和16.3%。新能源汽车2024年产量突破1300万辆，产销连续10年居全球首位；船舶工业全球市场份额保持领先。与此同时，产业绿色转型成效显著，6430家国家级绿色工厂建成运营，规上工业单位增加值能耗持续下降，推动产业向高端化、绿色化、智能化方向稳步迈进。

展望未来，中国新型工业化仍面临诸多机遇与挑战，未来需持续聚焦创新驱动、结构优化、绿色转型，不断增强工业核心竞争力，为全面建设社会主义现代化国家提供更有力的产业支撑。

### 王佳楠：以技术匠心护航绿色能源生产

在国家大力推进能源结构转型、发展绿色可再生能源的战略背景下，燃料乙醇作为清洁环保的替代能源，其规模化、高质量生产对保障能源安全、实现“双碳”目标具有重要意义。2023~2024年，中粮生化能源(肇东)有限公司年产能25万吨燃料乙醇及21.8万吨DDGS生产线集散控制系统项目的成功落地，为行业树立了大型生物能源项目自动化控制的标杆。而这一标杆项目的背后，离不开中凯自动化科技有限公司董事兼总经理、项目负责人王佳楠的统筹引领与技术深耕。

#### 临危受命：扛起生物能源自动化“标杆工程”

2022年，中粮肇东燃料乙醇生产线启动自动化升级，该项目涵盖液化发酵、分离干燥、包装码垛等全流程，控制系统规模超3000点，且需满足24小时连续生产的超高可靠性要求。面对工艺复杂、子系统耦合性强、调试周期紧张等挑战，拥有多年工业自动化经验的王佳楠被任命为项目总负责人。

作为中凯自动化的核心管理者，王佳楠凭借多年在工业自动化领域的经验，敏锐地意识到该项目的战略价值与技术难度。在项目启动之初，他主动扛起项目负责人的重担，不仅要统筹公司研发、集成、实施团队的资源调配，还要深入一线与中粮生化团队沟通需求，协调解决从系统设计到现场调试的全流程问题。“燃料乙醇生产是连续性极强的工艺，发酵温度、pH值、营养物添加量的微小偏差，都可能影响乙醇转化率；而DDGS干燥环节的多变量耦合控制，更是直接决定饲料产品的质量。我们必须以‘零容错’的标准，做好每一个细节。”王佳楠在项目启动会上的这句话，成为整个团队的行动准则。

#### 技术攻坚：以“冗余设计”筑牢生产安全防线

针对传统DCS单点故障风险，王佳楠主导研发了“全链路冗余”方案：从控制器、通讯模块到电源系统均实现热备切换，故障转移时间控制在毫秒级。

这一技术突破并非易事。在工厂测试阶段，冗余网络频繁出现同步延迟问题。王佳楠组织技术团队持续攻坚，最终通过优化通讯协议栈参数和引入“心跳包”动态监测机制，将切换稳定性提升至99.99%。此外，他还设计了三级故障自诊断系统，可实时定位从现场仪表到控制层的异常，提前预警潜在风险。

#### 高效推进：以全局视野保障项目如期落地

项目执行过程中，王佳楠始终扮演着“统筹者”与“推动者”的双重角色，确保项目高效推进。项目于2023年8月准时完成系统交货并启动现场安装。自2023年12月液化发酵工段成功调试投运，2024年1月成品工段全面完成调试并投入运行以来，整套系统一直保持安全、稳定、高效运行，有力保障了中粮年产25万吨燃料乙醇和21.8万吨DDGS生产线的连续、满负荷生产。

#### 行业赋能：以项目实践引领技术升级

中粮生化肇东项目的成功，不仅是中凯自动化技术实力的体现，更标志着我国在大型生物能源项目自动化控制系统的成功。作为项目负责人，王佳楠表示，中粮生化肇东项目的成功只是一个起点，未来他将带领中凯自动化继续聚焦复杂工艺流程的自动化控制技术研发，为更多企业提供稳定可靠、高效节能的控制解决方案，以技术创新助力国家能源结构转型与“双碳”目标实现。

从项目启动时的周密规划，到技术攻关中的精准突破，再到现场实施中的高效推进，王佳楠以“技术匠心”与“全局视野”，交出了一份优秀的项目答卷。他的实践不仅诠释了一名电气自动化从业者的责任与担当，更为我国绿色能源产业的自动化升级注入了强劲动力。

张文

新型工业化取得新的历史性成就

任一迪