

# 存算一体排序架构为智能硬件加速

■本报记者 李惠钰

在智能驾驶中,城市道路上数百个交通参与者的风险排序需控制在毫秒级别;短视频推荐系统,每天要从亿级视频中快速排序以匹配用户感兴趣的内容;训练大语言模型时,千万级参数的优先级评估更是家常便饭。这些场景都指向一个核心——排序加速。

由北京大学集成电路学院教授杨玉超、人工智能研究院研究员陶耀宇组成的团队,在国际上首次实现了基于存算一体技术的高效排序硬件架构,解决了传统计算架构面对复杂非线性排序问题时计算效率低下的问题,将为具身智能、大语言模型、智能驾驶、智慧交通、智慧城市等人工智能(AI)应用提供更高效的算力支持。相关研究成果近日发表于《自然-电子》。

**排序加速：  
存算一体架构中难啃的“硬骨头”**

排序,作为 AI 系统中最常用、最耗时的基础操作之一,广泛应用于自然语言处理、信息检索、图神经网络、智能决策等领域。

论文通讯作者陶耀宇表示,在传统的冯·诺依曼计算架构中,处理器与存储器分离的特点导致数据被频繁搬运,严重制约了计算速度和系统能效,因此融合存储与计算的存算一体架构是突破硬件性能的必由之路。而排序加速是存算一体架构中难啃的“硬骨头”。

例如,在智能驾驶场景中,车辆在高速公路等简单环境中,只需对周边几辆车的行进路线进行排序,就能判断是否会对自身安全

产生影响,耗时可控制在毫秒级别。但在复杂的城市环境中,风险可能来自周边的数百个乃至更多的各类交通参与者,排序的复杂程度和硬件延迟就会大幅提高。

再比如,在抖音、小红书等短视频平台的大规模检索与推荐系统中,对用户点击、评分、相似度计算后,常需要对海量的候选内容进行快速排序,找出最相关项。因此,排序性能直接影响系统的响应时间和可扩展性。

另外,在大语言模型训练、机器人路径规划、强化学习搜索等场景中,快速评估多个决策或行动的优劣并排序,也是必不可少又极为费时的步骤。

然而,在传统计算架构下,大规模的非线性排序难以由端侧或边缘设备高效完成。这一过程消耗大量时间与功率,极大制约了具身智能、智能驾驶等新兴技术的发展与普及。

陶耀宇表示,近年来,存算一体已经在矩阵计算等规则性强的数值计算中取得显著成果。然而由于排序存在逻辑复杂,操作非线性,数据访问不规则,缺乏通用、高效的硬件排序原语等诸多障碍,目前国际主流的存算一体架构均无法解决大数据排序问题,这一难题成为制约下一代 AI 计算硬件发展的核心卡点问题。

**攻克多个核心技术难题**

在 AI 系统中,排序通常作为数据预处理或决策中间环节存在,一旦执行效率不高,就会成为整个系统的主要瓶颈。团队围绕“让数据就地排序”的第一性原理目标,在存算一体架构上攻克了多个核心技术难题,实现了排

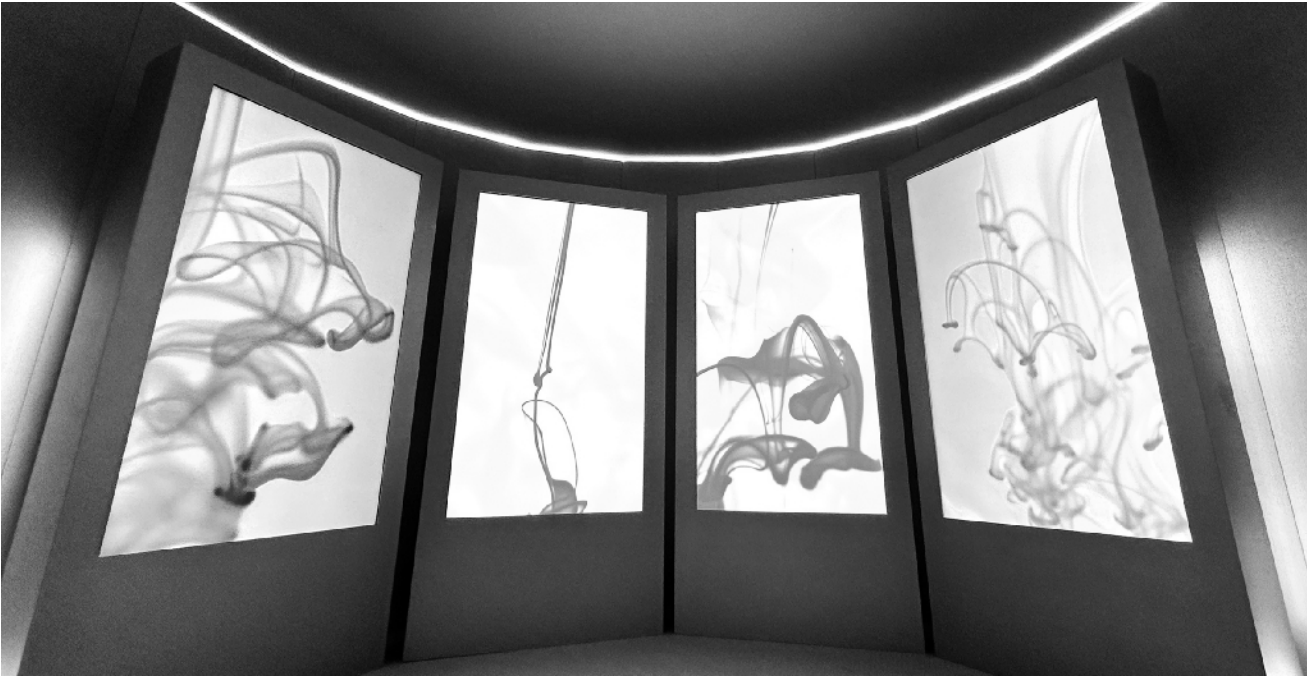
序速度与能效的数量级提升。

据陶耀宇介绍,该工作取得了诸多突破,开发了一套基于新型存内阵列结构的高并行比较机制,开创性引入“亿阻器阵列”,实现了低延迟、多通路的硬件级并行排序电路设计;在算子层面,优化了面向 AI 任务的算法-架构协同路径,同时兼容现有矩阵计算;完成了完全自主设计的器件-电路-系统级技术栈整合。

论文第一作者、北京大学集成电路学院博士生余连风介绍:“排序的核心是比较运算,需要精准实现‘条件判断+数据搬运’。在复杂应用场景中,要对不同因素的优先级进行比较,因此排序的逻辑非常复杂。一般排序过程需要构建支持多级‘比较-选择’的比较器单元,而传统存算一体架构主要面向‘乘加’‘累加’等操作,难以支持这样的复杂运算。我们的工作成功攻克了这一难题,设计了一种‘无比较器’的存算一体排序架构。”

实测结果显示,该硬件方案在典型排序任务中速度提升超 15 倍、面积效率提高超 32 倍,具备并行处理百万级数据元素排序任务的潜力,功耗仅为传统 CPU 或 GPU 处理器的 1/10。在 AI 推理场景中,支持动态稀疏度下的推理响应速度可提升 70%以上,特别适用于要求极高实时性的任务环境。

“正因为排序计算在 AI 中是高频、通用、基础且极难处理的一类操作,攻克这一难题意味着存算一体从‘适合特定应用’走向‘可支持更广泛的通用计算’,为 AI 相关任务构建了全链路的底层硬件架构。”陶耀宇说。



7月5日,上海科技馆与腾讯基金会联合打造的“一平米博物馆”项目“色彩之境”科学艺术疗愈展,在上海市精神卫生中心落地。

该项目以艺术疗愈为核心导向,融合了科学研究与艺术创作,并结合空间设计,营造多维度体验。科学艺术疗愈展对受精神困扰人群具有放松心情、舒缓情绪的积极作用,是医学与人文关怀的创新结合。

图为展览上,作品《晨曦之光》以流动的身影与人声引导并唤醒观者的行动力。

本报见习记者江庆龄 实习生杨雨辰报道 上海科技馆供图

# 认识山野野美味,探索森林“粮仓”永续之道

■付芳芳 国靖

当下,不少地方的森林食物迎来夏季采收。全国绿化委员会办公室发布的《2024 年中国国土绿化状况公报》显示,2024 年林草产业总产值 10.17 万亿元,同比增长 9.6%,森林食物产量超 2 亿吨,成为继粮食、蔬菜之后的第三大重要农产品。全国经济林种植面积 466.7 万公顷、年产值超 2 万亿元。无论是大兴安岭的蓝莓,还是山野枝头的桑葚或酸甜的野山楂,这些源自山林的舌尖美食,都诉说着一个常被我们忽略的事实——莽莽森林,是一座沉睡的、潜力无穷的“绿色粮仓”。

从菌菇野菜、坚果浆果到粮油香料、药食资源,森林食物已成为丰富我们餐桌、保障食物供给的重要来源。然而,这座“粮仓”并非取之不尽。如何正确认识并科学挖掘,正是我们亟待探索和践行的森林食物资源挖掘与可持续利用之道。

**认识森林食物家族**

我国拥有 34 亿亩森林、8000 多种木本植物,可供开发利用的森林食物资源保守估计有 2000 余种,具有一定产业规模的则有 200 余种。森林就像摆满各种各样的山野珍品且永不枯竭的“自然超市”,每种产品都蕴藏着丰富的营养密码和独特的风味基因。

从被誉为“菌中贵族”的松茸、羊肚菌,到“平民美味”香菇、木耳、平菇、金针菇,这些菌类依赖特定的森林环境和共生关系,提供了多种有益健康的成分。春季限定的香椿芽、竹笋,以及蕨菜、刺嫩芽、马齿苋、枸杞叶等,是都市餐桌上别样的野菜。森林里还有可食的块根、块茎和花卉,能为我们的饮食

增添独特风味。

蓝莓、树莓、沙棘、猕猴桃、五味子,常被称为“超级水果”,富含维生素 C、E 及花青素等多酚类物质,抗氧化能力强。林间不起眼的山葡萄、野山楂、酸枣,也具有天然的野趣风味。

榛子、松子、核桃、板栗等坚果是森林的特产,其中板栗既可作菜也能当粮,与枣、柿并称三大木本粮食。森林还提供了珍贵的食用油。茶籽油、核桃油和橄榄油的健康益处广为人知,文冠果、元宝枫等的种子油也具开发潜力。花椒、八角、天竺桂、山苍子等树木贡献的香辛调料,是中华美食不可或缺的风味来源。

森林孕育了世界上最受欢迎的饮品之一——茶。而清香的金银花、明目的菊花、清热的蒲公英、利尿的车前草,以及滋补的黄精、玉竹、山药等,常被用来泡茶、煲汤、煮粥。椴树、荔枝、龙眼则为蜜蜂提供绝佳的蜜源,使其酿造出风味各异、营养丰富的森林蜂蜜。

森林良好的生态环境为林下养殖禽畜、种植药材提供了理想场所,收获的动物和植物产品更具风味和健康价值。

**科学利用森林食物资源**

森林蕴藏丰富,但要让这些山野美味安全、健康地“走上”我们的餐桌,离不开科学的眼光、系统的行动和创新的智慧。

首先,对森林进行资源调查与科学评价。科研人员和林业工作者需要系统性普查、识别、记录哪些植物、菌类、昆虫等可以被安全食用,评估这些资源的分布范围、蕴藏量、生长规律、营养价值、独特风味成分及潜在食用

风险。只有摸清森林食物清单和资源地图,后续的开发利用才有据可依。

其次,对于珍稀、特有且具有重要开发潜力的物种,收集和保护种质资源至关重要。依托自然保护区、森林公园、科研院所等单位建立国家和省两级原地库、异地库、设施库,形成 3 种种质资源保存体系,加强森林食物资源保护力度。

再次,通过选育优良品种、研发高效栽培技术,如林药模式、林菌模式、仿野生种植,实现规模化、标准化人工种植,既能保护野生资源,又能让更多人吃到安全放心的森林食品。

最后,通过研发先进的保鲜、干燥、提取、发酵等精深加工技术,将鲜美山野菜制成脱水蔬菜包或调味酱,将营养丰富的水果加工成果汁、果酱、冻干粉或健康食品,不仅解决了保鲜难题,还延长了产业链,提高了附加值。

科学利用森林食物资源,既能优化膳食结构、促进营养健康,也为农民开辟了重要的增收渠道,助力乡村振兴,同时还实现了以利用促保护的良性循环,让绿水青山真正成为金山银山。

**森林食物可持续利用的关键策略**

要让森林这座“自然粮仓”的美味取之不尽、代代相传,关键是在于可持续利用。

最根本策略是保护完整的森林生态系统,坚决制止毁林开垦、乱砍滥伐、非法占地等破坏行为。加强天然林保护,建设国家公园和自然保护区,守护食物来源与根本。对于珍稀、濒危、特有的森林食物物种,就地保护其原生境的野生种群是首选;同时建立种质资

**提高计算效率,打造加速引擎**

据悉,该技术可用于智慧交通图像排序系统、金融智能风控评分引擎、边缘监控设备的目标优先识别模块等场景,应用前景广阔。

在相关测试中,该技术展现出高速度与低功耗的显著优势。例如,在智慧交通场景中,系统有望在毫秒级内完成十万级事件优先级评估,为超大规模交通决策、应急响应调度等提供高效的实时算力支持。

当前,随着 AI 技术与物理世界加速融合,算力已从“服务算法”演化为“主导能力边界”的战略资源。“存算一体”超高性能排序加速架构的成功突破,不仅是一次架构创新的胜利,也是将科研成果转化为实际应用、服务国家重大战略需求的重要行动。

陶耀宇表示,该成果未来有望广泛应用于国产智能芯片、边缘 AI 设备、智能制造终端、智慧城市系统等关键领域,为我国在下一代 AI 技术与智能硬件竞争中提供坚实“底座”,也为构建安全、高效、自主可控的新一代智能算力体系提供“加速引擎”。

“根据初步测算,若该技术在智能终端、工业控制、数据中心等核心应用场景中推广,仅在边缘 AI 芯片市场就可形成百亿元级年产值潜力,大幅提升传统算力系统的性能。更重要的是,在社会层面,该技术有望推动新一代智慧交通、智慧医疗、智能制造、数字政府系统更高效运行,释放数据价值,助力新质生产力形成。”陶耀宇说。

相关信息:  
<https://doi.org/10.1038/s41928-025-01405-2>

**发现·进展**

哈尔滨工业大学

## 构建新型纳米机器人 助力心肌损伤精准治疗

**本报讯(记者孙丹宁)**近日,哈尔滨工业大学教授贺强、吴英杰团队从自然界旋转分子马达驱动细菌中汲取灵感,研发出光合磷酸化纳米机器人。该纳米机器人通过旋转生物分子马达 ATP 合酶的能量转化过程,实现光驱动的可编程运动,在动物活体模型中主动迁移至心肌损伤区域,显著提高胞内 ATP 水平,有效重建了局部代谢功能。相关成果发表于《美国化学会志》。

心肌梗死是由心肌梗死、心肌梗死、心肌梗死等心血管疾病导致的心肌细胞受损甚至坏死的表现。恢复和维持细胞的能量代谢是修复受损心肌细胞功能的关键,也是治疗心血管疾病的重要策略。当前临床采用静脉注射 ATP 的给药途径,但 ATP 在体内易分解、易诱发炎症反应、难以进入细胞内部。因此,如何实现 ATP 的靶向递送或在病灶部位的原位合成,已成为心血管疾病精准治疗的技术难题。

针对这一挑战,研究团队运用自然界最小的旋转生物分子马达——ATP 合酶作为驱动引擎,构建了一种兼具定向迁移和能量分子 ATP 供给功能的磷酸化纳米机器人。该纳米机器人基于可控分子自组装原理,运用天然类囊体与卵磷脂囊泡共挤出过程中发生的相分离,促使 ATP 合酶非对称嵌入纳米机器人膜表面。这种设计保留了天然类囊体膜的光吸收系统,使纳米机器人能够吸收光能并转化为腔内质子势能,从而驱动 ATP 合酶旋转,触发光合磷酸化反应合成 ATP 能量分子。同时,磷酸化纳米机器人在光照下表现出显著增强的平动扩散效率,最高增幅达 89%。在梯度光场的作用下,磷酸化纳米机器人展现出类细菌的自适应性趋光行为,具备高度可编程性与靶向性。

该自供能、自导航的磷酸化纳米机器人系统,为心血管疾病及其他能量代谢紊乱引起的相关病症精准治疗提供了新策略。

相关论文信息:  
<https://doi.org/10.1021/jacs.5c05904>

中国科学院深圳先进技术研究院

## 研发高分辨实时成像 协同纳米操控技术

**本报讯(记者刁雯蕙)**近日,中国科学院深圳先进技术研究院研究员杨慧团队提出微透镜与原原子力显微镜的耦合方法,通过聚焦离子束技术在微透镜表面沉积金刚石尖端,研发出兼具超分辨成像与精准操控功能的新型原子力显微镜探针系统。该技术将传统原子力显微镜光学成像模块的成像分辨率提升 1 个量级以上,并实现操作过程中 200 纳米银纳米线的实时光学追踪与同步操控。相关研究成果发表于《纳米研究》。

原子力显微镜作为纳米尺度操控的核心工具,在纳米粒子组装、生物分子操控及半导体器件制造等领域应用广泛。然而,现有技术长期缺乏实时、高分辨的在线观测与定位能力,导致操作精度与效率受限。发展超分辨率成像与原原子力显微镜操控的融合技术,成为纳米光学、生命科学、信息科学和工程技术等多学科交叉的研究热点。

研究团队通过微透镜与原原子力显微镜光路系统的深度集成,将微透镜超分辨光学技术引入原子力显微镜体系。新型探针在保持原子力显微镜纳米级力控与运动轨迹调控优势的同时,新增实时视觉反馈功能。实验表明,该平台可在非破坏性观测条件下,同步完成亚微米尺度结构的成像与操控,操作精度较传统方法提高超 50%,效率提高约 200%。

该研究的创新点在于突破“操作盲区”,通过原位、实时的超分辨率视觉反馈,为单分子级生物力学测量、活细胞亚细胞器操控等前沿研究提供全新工具。此外,新型原子力显微镜探针的模块化设计兼容主流商业设备,为生物传感、纳米光学、微纳制造等领域搭建了跨学科研究平台。

相关论文信息:  
<https://doi.org/10.26599/NR.2025.94907397>

中国农业科学院农产品加工研究所

## 解析快速冷却如何 保绿豆凉粉软糯 Q 弹

**本报讯(记者李晨 通讯员万青)**近日,中国农业科学院农产品加工研究所谷物加工与品质调控创新团队,揭示了不同冷却速率对绿豆凉粉储藏期间老化与质构特性的调控机制。相关研究成果发表于《碳水化合物》。

绿豆凉粉是传统的消暑美食,距今已有千年历史。绿豆凉粉色泽晶莹剔透,看似柔嫩,实则筋道爽滑、富有弹性。但作为一种典型的淀粉凝胶类产品,其在储存过程中易老化,导致水分析出、硬度增加,食用品质下降。

研究团队分析了不同冷却速率对绿豆凉粉在 4℃ 储藏 14 天期间老化、微观结构及质构的影响,发现冷却速率显著影响绿豆淀粉凝胶的回生、质构硬度和韧性。快速冷却可以延缓回生过程,保持凝胶的柔软和弹性,而缓慢冷却则会使凝胶变硬变脆。研究还发现,绿豆淀粉凝胶的微观结构决定其宏观质地。快速冷却的凝胶具有更高的孔隙率 and 更松散的网络结构,有利于水分保留,并抑制回生。而缓慢冷却的凝胶则形成更紧密的网络结构,使凝胶变硬变脆。

该研究为通过物理新型加工技术,实现对淀粉基凝胶食品质地特性的精准调控提供了理论支撑。

相关论文信息:  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123915>