

储能新研究——液态金属电池

如今，全世界储能领域研究有许多重大进展。有些新材料正处于由示范转向商业化初期的阶段，如钠离子电池、液流电池、固态电池、金属空气电池等；有些已经实现大规模商业化，如锂离子电池。而液态金属材料因其优异的物理、化学特性，被应用于消费电子产品、新能源汽车产品、储能产品、耳机等领域，并在医疗器械、智能制造、高端体育器材及航空航天等展现出广阔的应用前景。

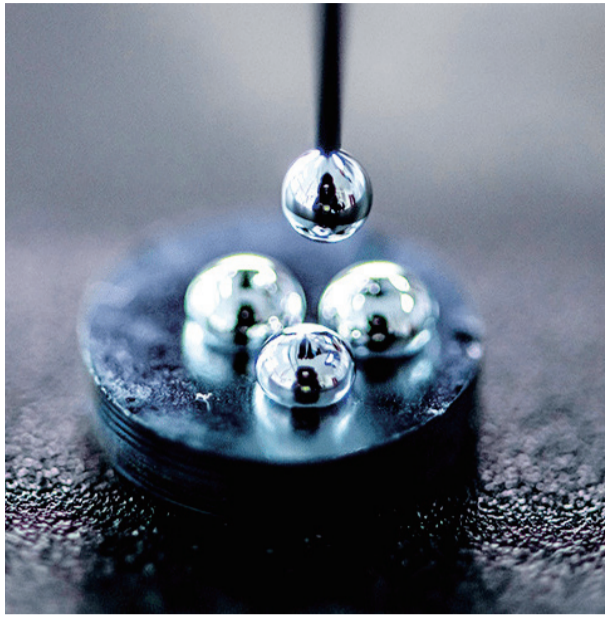
液态金属可看作由正离子流体和自由电子气组成的混合物，是一种不定型金属。液态金属电池（LMB）作为新兴的电化学储能技术，是由三层液体组成的电化学电池，负极用镁（后改用钙），正极用铈，电解质为熔盐（ $MgCl_2:NaCl:KCl:50:30:20mol\%$ ）。

液态金属电池由于液态电极摆脱了传统固态电极材料的循环寿命短、热失控等问题，以及液态电极独特的传质与反应动力学特性，让它具有大容量、高功率等优点。除此之外，电池还具有结构灵活、成本低、制造方便、循环寿命长等优势，因此这类电池在储能方面有着非常广阔的前景。

近年来，随着储能行业的发展，越来越多的公司和研究者开始关注液态金属电池技术，因此其负极和正极都得到较大的扩展。如LMB的负极可采用低电负性、低密度的碱金属或碱土金属（锂、钠、镁、钙、钾等），正极可采用较高电负性、较高密度的金属或金属类金属（铈、镧、铊、铋、铅等），电解质则采用低成本、高电导率、高安全性、密度介于正负极之间的二元或多元熔融卤素无盐。

电池放电过程中，负极金属（如钙）失去电子，被氧化进入电解质中，再经由电解质迁移至正极，进一步与从外电路传导至正极的电子结合，并与正极（如铈）发生合金化反应，形成钙-铈合金；充电过程则与之相反。

在工作温度下，正、负极和熔盐电解质



实验室中正在进行测试的液态金属材料。

均处于液态，三者由于密度的不同自动分层。得益于独特的液-液界面，其动力学传输特性极为优异，即便在 $2A/cm^2$ 的高电流密度下也能保持较高的能量效率运行。由于使用的是液态金属电极，完全消除了枝晶生长的问题，全液态结构使得其在充放电过程中电极结构具有高的自愈性、使得液态金属电池寿命很大及安全性能很高，因此可以长期安全运行，预计电池寿命可以达到 15~25 年。

据现有研究，液态金属电池技术可以使其电池续航系统持续 4~24 小时并且比锂离子电池便宜。研究还表示，这些电池可以在任何气候条件下安全运行，无须空调辅助，在最小退化率情况下，可以使用 20 年以上。

液态金属电池按照负极金属可分为镁基电池、锂基电池、钙基电池、钠基电池等。

镁基电池首次验证了 LMB 的体系，由于其工作温度高（700°C）、开路电压低、成本相对较高，因此不具备实际应用价值。

锂电池具有较高的能量和功率密度，且锂基熔融卤化物盐离子电导率高，同时锂（熔点 180 °C）和锂基卤化物共晶盐较低的熔点，使得锂电池可以在较低的运行温度下工作，因此锂成为一种具有吸引力的 LMB 负极选择。

钙基电池成本很低，同时钙的充放电过程为双电子转移，因此有望实现更高能量密度，但钙的熔点较高（842 °C），同时钙在其熔融卤化物中具有较高的溶解度，直接采用钙作为负极构建的电池无法正常工作，因此需要构建钙-镁合金作为负极来降低负极的熔点和抑制钙在熔盐中的溶解。

钠基电池整体成本远低于锂电池。并且由于金属钠熔点较低（98 °C），构建低温体系方面相较于钙基电池更具有优势。钠在熔融氯化钠盐中溶解度较高，导致电池自放电严重，材料利用率低，难以稳定运行较长时间，距离实际应用尚有较大的难度。

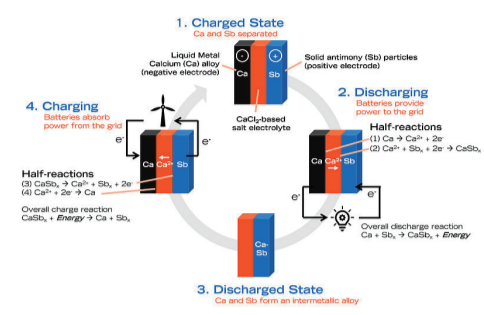
对于 LMB 正极材料，在铈基正极的研究初期，通常采用正极合金化的方法降低



液体金属电池产品示意图。

LMB的工作温度以及成本。如针对传统铅基电极运行温度高，材料利用率低的问题，2014年《自然》报道了基于合金化电极设计思路的新型铈基钙电池体系，将工作温度从 700 °C 降至 450 °C，有效推动了液态金属电池的实用化。

对于铈基正极，研究主要集中于熔盐电



LMB 的结构及其充放电过程示意图。

解质的优化设计，以达到降低工作温度的目的。

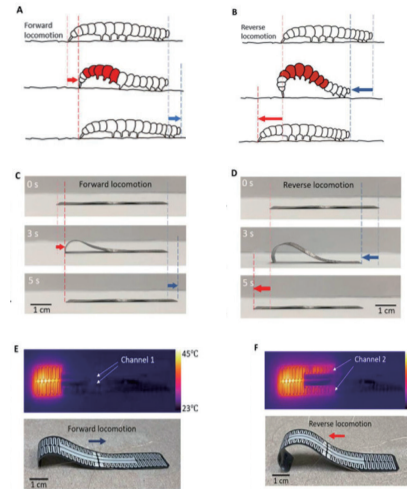
对于铈基正极，针对铈在熔盐电解质中的溶解导致电池的低库伦效率以及容量的衰减问题，采用合金化方法抑制其溶解，但是该体系循环稳定性仍需进一步提升。

目前，越来越多的液体金属电池体系被用于电网规模的储能。在 LMB 工作温度范围内（200~600°C），其能量密度和材料成本已经分别达到约为 100~200Wh/kg 和 60~300 美元/千瓦时，满足产业化初期的基本要求。部分高温液态金属电极已初步实现商业化，新兴的中低温/室温液态金属电极尚处于研究初始阶段，仍面临着循环稳定性、经济性等多方面挑战。

液态金属除了应用在储能电池领域外，凭借其极佳的电性能 and 热学性能，在电学性能和热学性能要求较高的行业也成为首选，如电子器材制造及散热器、生物医疗、航空航天等领域。

（航航）

热驱动仿生爬行机器人



美国北卡罗来纳州立大学的研究人员受毛毛虫启发，研制出一种热驱动爬行机器人，通过分布式可编程加热可实现多种爬行模式。

章鱼、蛇、蠕虫、毛毛虫等自然生物具备多模式运动和穿越密闭狭窄空间的能力。软体机器人大多受此启发，在生物医学、外科手术辅助、伪装感知等领域有显著的应用潜力。为模仿毛毛虫的双向运动能力，研究人员设计将银纳米线嵌入双向热驱动液晶弹性体中，构建热驱动双向爬行机器人。其中，银纳米线具有导电性和机械顺应性，用聚二甲硅氧烷/炭黑进行封装后作为加热元件，利用掩膜可实现加热元件的图案化；液晶弹性体与加热元件一起进行等离子体处理，压制成型后作为机器人主体结构。研究发现：通过调整加热元件图案、外部电流大小和驱动频率，可调节机器人的运动方向和运动速度；电流增加时，正向和反向速度都会增加；正向/反向速度先随驱动频率的增加而增加，达到最高值后随频率增加反而降低。机器人能通过高 3 毫米、长 30 毫米的狭窄空间，正向速度和反向速度分别可达 0.5 毫米/秒、0.72 毫米/秒，正向和反向最高分别可弯曲 8.9 毫米、14.5 毫米。

此项研究为设计智能多功能软体机器人提供了新思路，将促进软体机器人在灾后救援、远程感知等领域的应用。

（方楠）

中山大学提出智能操作作用于转运零散颗粒为机器人操作拓展新思路

奶茶里的珍珠、米粒、牙签等属于生活中一种最常见的材料，叫作颗粒材料（Granular Materials）。与这些材料最直接的交互方式就是把它抓起来，但这个过程具有挑战性。

一方面，用力过猛可能会把脆弱的珍珠弄碎，另一方面，用力太轻颗粒又会从指缝中漏出来。抓起一把颗粒，对于人来说都是一件需要对手部精细调控才能成功的事情，因此对于机器人来说就更加困难。现有的机器人软体抓手主要采用有限的几种策略来操作颗粒材料，但如果面对零散的颗粒，这些抓手都会表现得非常低效。

那么，操作颗粒材料为什么这么难呢？这与颗粒材料独特的物理特性密切相关。单独的小颗粒与其他固体物质并无区别，但当小颗粒们聚集起来形成颗粒聚集物时，情况就完全不一样了。颗粒聚集物会在不同的物理条件下，表现出截然不同的物理特性。

如果每个小颗粒是离散的，它们之间并没有相互接触时，颗粒聚集物整体表现出类似液体的特征，能够随着外力或者边界条件的变化而流动；而如果所有的颗粒都相互连接起来，颗粒聚合物则会表现出类似固体的高刚度的特征。

也就是说，这种能够在类似固体和液体两相之间转化的独特性质，让颗粒难以被现有的机器人技术高效地操作或运输。

为了解决这一问题，中山大学张锦绣教授、吴嘉宁副教授基于非洲象利用象鼻尖端摄取颗粒状食物的行为机制，提出了一种智能操作策略，能够高效、快速地转运零散的颗粒状食物。

非洲象是一种食量巨大的动物，日进食量能达到大约 200 千克，其中颗粒状食物（如象草、花生以及颗粒饲料）约占总重量的

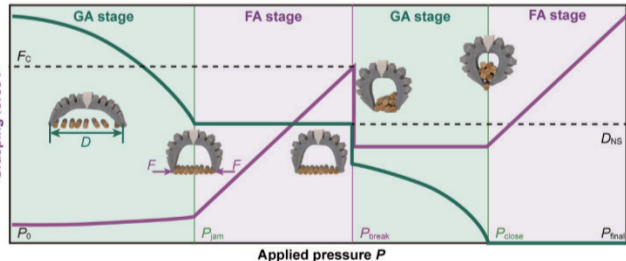
10%，估算下来有 69000 个颗粒左右。

假设大象吃颗粒食物时每次只抓起一个，且一次进食过程持续 2 秒，那么仅吃完这些颗粒状食物就要使用 38 小时，这显然不合理。

为了探究非洲象是如何保证每天如此巨大的进食量，研究团队在广东省清远市长隆国家级世界珍稀野生动物种源基地进行了一系列观测实验，最终确定了非洲象们吃饭的本领。首先，大象利用其象鼻尖端的侧边将零散的颗粒食物扫到一起，随后尖端紧紧地贴在木板上，从两边挤压聚集的颗粒将其夹住，最终将这些食物送入口中。

在整个转运过程中，最关键的阶段就是夹持阶段。大象在夹持颗粒时，颗粒物在象鼻的作用下，经历了多次的液相和固相之间的转换。这种策略建立了能够高度适应颗粒物理性质的场景，使大象在每次取食时能够捕获更多的颗粒物，有可能提高取食效率。

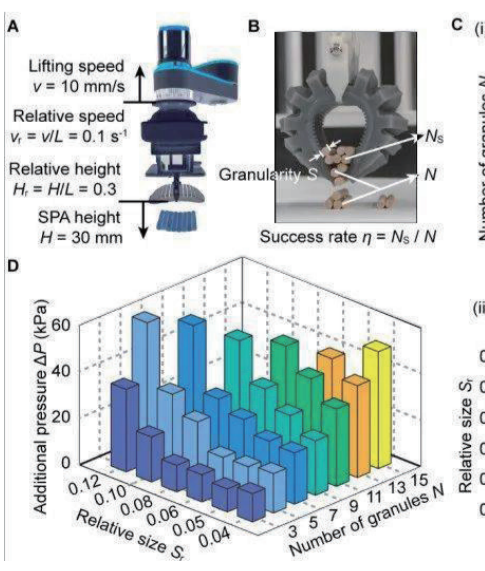
为了将这种智能策略付诸实践，该团队



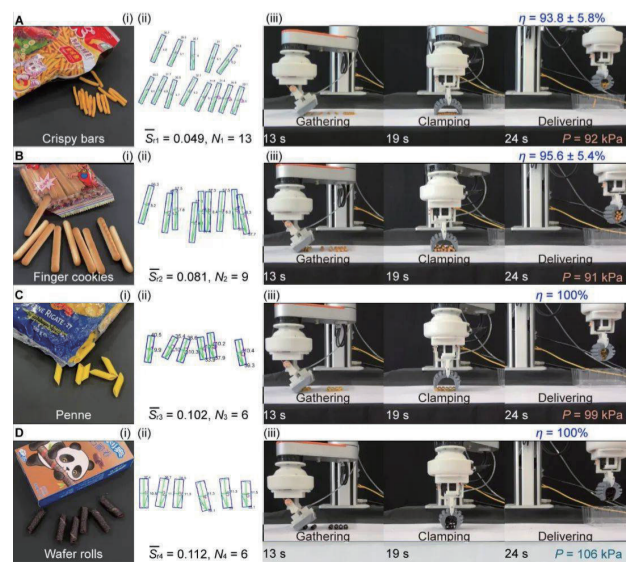
气驱软体抓手及其阶段性运行机制。

设计了一种气驱软体抓手，能利用力驱动和几何驱动两种驱动模式，将零散颗粒进行多次固-液两相间的状态转变后完成抓取。

为了实现成功的抓取，软体抓手需要提供足够的水平抓取力，这一水平力与额外气压相关。通过实验，研究人员发现对软体抓手提供的额外气压越大，能达到的抓取成功率也越高。



最小驱动气压数据库。



气驱软体抓手转运零散颗粒食物。



人工智能副驾驶将提高与人类协同性 打造更安全的天空

设想一下，在一架飞机上有两位飞行员，一位是人类，一位是电脑。两个人的“手”都放在控制器上，但他们总是在关注不同的事情。如果他们都在关注同一件事，人类就能掌握方向盘。但如果人类分心或错过了什么，计算机就会迅速接管。将人类的直觉与机器的精确性结合在一起，在飞行员和飞机之间建立起一种协作的关系。

这就是麻省理工学院计算机科学与人工智能实验室（CSAIL）的研究人员开发的“空中卫士”系统。现代飞行员需要应对来自多个监视器的大量信息，尤其是在关键时刻，“空中卫士”可以充当主动的副驾驶；这是人类与机器之间的合作关系，其根本在于理解注意力。

但它究竟是如何确定注意力的呢？对人类来说，它使用眼动跟踪，而对神经系统来说，它依赖于一种叫作“突出图”的概念，它能精确定位注意力的方向。这些地图可以作为视觉指南，突出显示图像中的关键区域，帮助掌握和解读复杂算法的行为。“空中卫士”通过这些注意力标记识别潜在风险的早期迹象，而不是像传统的自动驾驶系统那样，只在出现安全漏洞时才进行干预。

该系统的广泛影响超出了航空领域。有朝一日，类似的合作控制机制可能会用于汽车、无人机和更广泛的机器人领域。

麻省理工学院计算机科学与人工智能实验室博士后 Lianhao Yin 是有关“空中卫士”的新论文的第一作者，他说：“我们的方法有一个令人兴奋的特点，那就是它的可区分性。我们的合作层和整个端到端过程都可以训练。我们特别选择了因果连续深度神经网络模型，因为它在映射注意力方面具有动态特性。另一个独特之处在于适应性。“空中卫士”系统并不死板，它可以根据实际情况进行调整，确保人机之间的平衡合作。”

实地测试和结果

在实地测试中，飞行员和系统在导航到目标航点时都根据相同的原始图像做出了决定。“空中卫士”的成功是根据飞行过程中获得的

累积奖励和到达航点的较短路径来衡量的。监护系统降低了飞行的风险水平，提高了导航到目标点的成功率。

麻省理工学院 CSAIL 研究机构成员、液态神经网络发明人拉明·哈桑尼（Ramin Hasani）补充说：“该系统代表了以人为本的人工智能创新方法。我们使用液态神经网络提供了一种动态、自适应的方法，确保人工智能不会仅仅取代人类的判断，而是对人类判断的补充，从而提高天空中的安全性和协作性。”

技术基础与未来发展

“空中卫士”的真正优势在于其基础技术。它采用基于优化的合作层，利用人类和机器的视觉注意力，以及擅长破译因果关系而闻名的液态图灵连续时间神经网络（LTC），分析传入的图像以获取重要信息。作为补充，VisualBackProp 算法可识别系统在图像中的焦点，确保清晰了解其注意力图谱。

要想在未来得到广泛应用，还需要完善人机界面。反馈信息表明，一个指示器（如条形图）可能会更直观地显示监护系统何时开始控制。

“空中卫士”预示着一个更加安全的天空新时期的到来，它为人类注意力动摇的时刻提供了一个可靠的安全网。

麻省理工学院电气工程与计算机科学教授、CSAIL 主任、论文资深作者丹妮拉·鲁斯（Daniela Rus）说：“‘空中卫士’系统突出了人类专长与机器学习之间的协同作用，进一步实现了在具有挑战性的场景中利用机器学习增强飞行员能力并减少操作失误的目标。”

哈佛大学计算机科学助理教授斯蒂芬妮·吉尔（Stephanie Gil）说：“在这项工作中使用视觉注意力指标的最有趣的成果之一，就是有可能让人类飞行员更早地进行干预，并提高可解释性。这展示了一个很好的例子，说明如何利用人工智能与人类合作，通过利用人类与人工智能系统之间的自然交流机制，降低实现信任的门槛。”

（逸文）