液态金属机器：变形只是开始

本报记者 佘惠敏

前沿技术

科幻电影《终结者》中的液态金属机器人让许多观众印象深刻：这种由特殊液体金属组成的机器人，可以随心所欲地变成所触及的任何人或事物，受到攻击后能像液体一样重新恢复原貌，还可以无孔不入地穿越常人难以穿过的狭小孔隙到墙壁的另一面再重新组合。如今，这个科幻电影中的酷炫幻想正在变成现实。

近日，清华大学医学院和中科院理化技术研究所联合研究小组，在《先进材料》上刊发了一项新成果“自驱动液态金属机器”，为液态金属机器人的研制迈出极为关键的一步。《经济日报》记者为此专访了项目负责人、清华大学医学院教授、中国科学院理化技术研究所双聘研究员刘静。

图① 刘静（左四）课题研究小组部分成员合影。
图② 刘静（左一）在指导学生试验。
图③ 刘静（左四）在给课题研究小组成员讲解问题。（资料图片）

会变形的机器人

人们最熟悉的液态金属是水银，它易蒸发形成有剧毒的汞蒸汽，因而限制了实际应用。其实，液态金属是个大家族，比如金属镓及镓系不同配比制成的镓铟合金或镓铟锡合金，它们没有水银的易蒸发和有毒性这些坏毛病，因而成为科学家实验室中的宠儿，正在展现出种种奇妙的应用。

刘静的实验室中就出现了这样一幕：电解液中，一滴液态镓金属球可在吞噬一点铝后，以每秒5厘米的速度移动，且形态可随槽道宽窄自动变化，蜿蜒前进。如果有多个液滴，还能像小火车一样在狭道中鱼贯而入，也能在宽处合而为一。如果有外加电场，在溶液中加正负极，液滴就会向正极定向运动。

能“吃”食物（铝燃料）、进行“代谢”（化学反应）为自身提供能量驱动自身运动、根据环境变化进行变形，液态金属机器这一系列非同寻常的习性已相当接近一些自然界简单的软体生物。这种“仿生型液态金属软体动物”，就是刘静研究组在世界上首次发现的一种独特的现象和机制——10摄氏度以上即为液态的金属镓铟锡合金，可在“吞食”少量铝后，以可变形机器形态长时间高速运动，无需外部电力。这为研制液态金属机器人奠定了理论和技术基础。

“液态金属自驱动效应，跟材料有关。”刘静说，刚开始“液态金属机器”并没有外部动力，等“吞食”铝片后，在电解液里形成原电池反应，会产生电力和气泡推动液态金属前进，就能自行运动了。如果液滴个体很小，在微米级别，就可以靠气泡的反作用力推动。如果液滴个体比较大，在毫米、厘米级别时，气泡的作用微乎其微。这时，铝与液态金属组成短路原电池，形成内生电场，这会改变液态金属表面电双层的分布，诱发液态金属表面张力出现不均衡，进而产生较大推动力。“液态金属表面张力是液体里最高的，是水的近9倍。由于它既是液体，又能导电，就可以在电双层表面张力作用下运动。表面张力会让液态金属向球形发展，在内部形成漩涡。从流体力学来说，是非常独特的，像风火轮一样内部出现大回环，又像坦克一样用轮子带动履带。”

吞噬自身体重1%至10%不等的铝，就能支撑这个液态金属软体动物以每秒5厘米的速度运动1个多小时，这样的发现，未来可用于研制实用化智能马达、血管机器人、流体泵送系统、柔性执行器乃至更为复杂的液态金属机器人。

有趣的是，铝做“食料”，是一个学生犯懒的意外发现。

早在一年半前，课题组就发现利用电可以控制液态金属的变形和运动，也就是“电驱动”。液态金属可在电场作用下实现各种大尺度变形，比如从一张面积很大的薄膜收缩成小球，或反之。在电场作用下，液态金属还会出现高速自旋并在周围流体中诱发出漩涡，以及实现定向运动等。这是一个很重要的发现，但课题组并未满足，“自驱动”成为他们的下一个目标。

进一步实验中，液态金属表面生成的氧化膜，妨碍了实验的继续进行。去除氧化膜有3种办法，用酸或碱溶液溶解氧化物，或者采用加电将氧化物还原处理。当时，按照实验室的推进计划，清华大学医学院生物医学工程系博士生张洁和姚又友需要在中性溶液环境中进行实验，所以就只考虑加电还原去除氧化层。要加电，实验者需要中止实验去取直流电源——而此时张洁犯了个懒。“看到桌子上有铝箔纸，我心想铝比较活泼，跟液态金属接触的话，理论上可以直接让液态金属表面发生还原反应去除氧化层。我试着撕下一片铝箔纸，让它与液态金属接触，没想到过了一会儿，铝与液态金属接触处开始冒出大量气泡，液态金属竟然欢快地跑了起来！”

原来镓铟锡不是不会自己动，只是过去没“吃”东西跑不动。这个意外发现被报告给导师刘静，随后实验室开展了一系列全面探索。

无穷尽的想象力

这个发现看似偶然，其实也必然。对液态金属的研究，是刘静团队十几年的长期工作。这种“兵无常势，水无常形”的材料，在刘静的手下，已经变幻出许多不同的功用。

刘静笑称，镓基液态金属是被埋藏在深海里的矿藏，在10多年前还是一个比较冷门的研究方向。这种室温下的无毒液态金属，兼具金属的导电性和液体的柔性，可以勾起他无穷的想象力。

关于镓的想象力早在10多年前就开始发散。2002年的一天，刘静冒出一个念头，如果将镓引入到计算机CPU散热中会怎样？他带领团队开始进行大量试验，现在这个想法早已成功，并从实验室走向市场。

市面上的主流CPU散热技术经历了3代变革。第一代“翅片风冷”主要依靠铜、铝等金属的导热来实现散热；第二代“热管”则采用相变吸热、毛细回流的热展开方式；第三代以“水冷”为代表，采用水对流传热来实现热展开过程。这3代散热技术在面临极端高热流密度散热问题时，都存在不易克服的瓶颈。如水冷管道内易发生沸腾相变，会导致严重的系统稳定性问题，且其驱动需借助机械泵，使得硬件设备较大。镓合金则不同，它导热系数是水的60倍至70倍，捕获热量的能力比水强悍得多；沸点高达2000℃，抗击极端温度的能力异常强，且性质稳定、无毒。“液态金属芯片冷却是第四代技术，现在已经变成产品了，而且是批量化进入市场。”

想象力的魔盒打开后，刘静团队用液态金属创造了一个又一个世界首次。

“镓合金室温下像墨水，能不能让它像钢笔画画一样写出电路板呢？这激发了我关于液态金属印刷电子学的一系列想法。”刘静团队在这个想法基础上，做出了一系列的开拓性技术：纸上印刷电路及液态金属3D打印技术、“梦之墨”技术、皮肤电路直接绘制技术、可植入式医疗电子在体内3D打印、液态金属电子手写笔、可在任意表面制造电路的雾化打印方法……一直到去年问世的世界首台全自动液态金属个人电子电路打印机，实现了全球科学界与工业界的一个梦想：随时随地实现电子电路所见即所得的直接打印。有了这台机器，你可以从网上下载电路设计方案，打印出你想DIY的目标机器的核心电路。

刘静的想象力并没有局限在机器领域，他还想拿镓铟锡合金这种好用的材料来修补人体。去年，课题组在世界上首次应用液态金属“缝合”了牛蛙断裂的坐骨神经，这刷新了对人体神经连接与修复难题的认知。

“信号传导效果与未受伤的神经几乎一样。”刘静说，实验表明，液态金属充当了几乎完美的“桥”，使牛蛙一侧坐骨神经在遭受刺激时所产生的电信号，准确无误地传递到另一侧。也就是说，液态金属起到了导电传输的作用，可以传送生物电信号。

镓铟锡合金的3个优点让刘静决定尝试将其用于神经修复：第一，这种合金在常温下呈液态，无毒性，借助注射器就能钻进神经管道中“搭桥”，操作起来十分方便；第二，它具有杰出的导电性能，是水的100亿倍，能保证断裂的神经末梢在液态金属的连接下快速联通，其电导率也显著优于纳米材料溶液等热门的神经修复材料；第三，它很稳定，很难与体液、周围器官组织发生反应，因此在X光、CT的照射下，呈现出极高的影像对比度，如果神经生长恢复良好，便可把液态金属从体内抽离，不留一丝痕迹。

不只是神经连接修复，液态金属外骨骼、可注射金属内骨骼、血管造影……都是他们开发出的液态金属的生物医学“新功能”。

站得高才看得远

“这样的材料多能性确实罕见，是大自然的馈赠，如何发挥它的功用，是研究者要做的事情。”在刘静的心目中，镓合金应该还有更多神奇的功用未被发现，想象力无穷尽，科学发现也就不会有尽头。

比如，他们正在试图给液体金属机器人支骨敷皮，让这个柔软的“生物”站起来，实现从“水生”向“陆生”的进化。

“把液态金属用皮肤套装起来，或者用毛细现象将它附着在其他金属骨架表面，它就可以不局限于溶液中，能走出去执行高难度的特殊任务。”刘静的设想里，在救灾中，柔性机器人可以穿过狭小空隙再恢复原形并继续执行任务；在医疗中，柔性机器人可沿血管等人体自然腔道运动，将药物送入靶点，或者直接清扫血管里的垃圾；在外太空探索中，柔性机器人也可以在微重力或无重力环境下执行任务。“如果把电子编程看做是神经调控，液态金属看作‘细胞’功能执行单元，通过电子芯片进行编程并结合一定的材料技术，就可以让液态金属实现可控的变形和组装集成，并实现传统型刚性和硬质机器人无法做到的无缝连接。”

这些想象目前正在一个个踏踏实实的实验中探索其可行性。

“我们在不断尝试，各种声、光、热、电、力等因素对镓合金液态金属自驱动的影响，也在尝试铝之外的其他‘食物’是否可行。镓合金对人体无毒，但铝对人体有毒，所以目前这种自驱动液态金属机器人还不能用于生物实验。”中科院理化所博士生袁彬说。

液态金属机器人需要融合材料学、生物学、机器人、流体力学、电子、传感器以及计算机等多学科的知识，这才是把想象力变成现实的基础。

刘静的学科背景就是一个典型的例子。他本科就读清华大学热能工程系，同时还兼修了物理系的双学位，研究生还在热能系，但研究的课题却不是空调，而是“生物传热”——这让他又不得不学习了很多生物学和医学的知识。

“液态金属的核心问题就两块，物质和能量，都可以归结到工程学和物理学的基础范畴内。”刘静说，做这种前沿性的研究要避免盲人摸象，教育背景和学科背景就应该是综合的。“要冲到最顶上，才不会不识庐山真面目。”

刘静带领的两个科研团队就有着鲜明的交叉融合特色：“中科院理化所实验室在工程热物理、材料和流体方面比较有优势，清华大学医学院小组在电子、生物医学工程方面实力很强。两边的学生经常‘串门’做实验，能有效形成互补。”

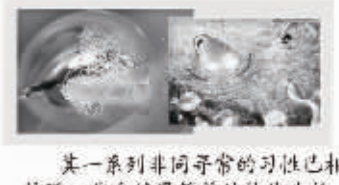
团队工作的实用特色也很鲜明。实验室科研经费主要来源于企业，通过技术转让和课题资助以维持团队运转，目前，已经有6家公司与刘静团队开展合作，实验室迄今已有80项发明专利获得授权。“在我脑海里，从来不觉得基础探索与应用研究是矛盾的。”刘静欣然谈到。

在刘静的设想中，液态金属可以成为新的智能体，也可以仅仅作为人体的一部分取代坏死的骨骼、神经和肌肉。这个新发明引申出“如何定义生命”这样宏大的哲学问题，《新科学家》（New Scientist）杂志在评价刘静团队的最新成果时就说：“液态金属将成为今后科幻电影中人工生命的种子。”

生命与非生命如何界定？生物和非生物能否融为一体？

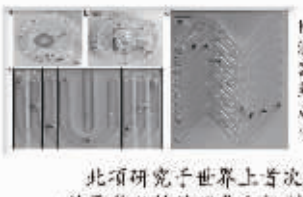
这是科学家们正在探索的课题，你对此有没有兴趣呢？

1、液态金属机器的特点：



其一系列非同寻常的习性已相当接近一些自然界简单的软体生物，比如：能“吃”食物（燃料），自主运动，可变形，具备一定代谢功能（化学反应），因此作者将其命名为液态金属软体动物。

2、液态金属机器的价值：



因为可变形液态金属机器在内台电解液的容器或各种狭缝中自主运动，

此项研究于世界上首次发现了一种异常独特的现象和机制，即液态金属可在吞食少量物质后以可变形机器形态长时间高速运动，从而为研制更为复杂的液态金属机器人奠定了理论和技术基础。

3、液态金属机器的作用：

在迄今所发展的各种柔性机器中，自主型液态金属机器所表现出的变形能力，运转速度与寿命水平等均较为罕见，这为其平添了诸多重要用途。

4、液态金属机器的前景：

自驱动液态金属机器的问世引申了全新的可变形机器概念，引发诸多超越传统的机器变革。这为今后发展高级柔性智能机器人技术开辟了全新途径，具有十分重要的科学意义和实际应用价值。

郎 冰制

科技

机器人将成制造业转型升级的主角

陈庆修

随着技术进步，机器人性能有了显著提升，在高精尖领域及危险环境中，越来越常看到它们的身影。适应智能化以及向互联网转型的大趋势，机器人作为下一个改变世界的技术集成，将掀起新的工业革命，成为制造业转型升级的主角。那些占据技术优势的行业或国家成本将大幅下降，其竞争力也会跃上一个新台阶。

机器人已长大成熟。机器人是用途广泛的多功能自动化装备，应用于制造业已有几十年。以往它像个“娇小姐”，身价不菲，能干的活不多。得益于近年来的科技创新，如今机器人性能大幅提升，变得心灵手巧，而且价格更平民化了。新生代机器人能够实现自动控制，以摄像头引导机械手臂，在智能化程度和精细化水平上都有了喜人的变化。

机器人与人工相比，其优势一目了然：

一是机器人效率高，可有效降低生产成本。在韩国，机器人能将劳动力开销降低33%，在日本为25%，在美国则为22%，这将改变长久以来全球工厂为获得廉价劳动力不断迁移的做法。

二是实现人工难以企及的精细化技艺和标准化操作，提高制造装配精准度，生产高附加值产品。当产品需要更新换代时，给机器人重新编程远比对人员进行培训快速高效得多，对于智能手机等更新换代快速的产品生产领域，急需机器人一展身手。

三是可从事危险和危害性工作，达到常人难以企及的境地。

机器人的短处在于，它毕竟是机器不是人，在个性化、亲情性的特色服务领域，机器人即使再先进，也难改变其机器本性。

机器人的使用领域主要限于工厂，那里环境受到精确控制，降低了机器人与人接触的风险和感知周围世界的需要。机器人应用自成体系，需要改变传统观念和管理方式，具备相当高的工程技术水平。机器人的使用情况因地域和行业而不同，这取决于很多因素，包括薪资成本以及劳动力监管规定。

如今，在汽车、电子电气等产品已实现自动化的制造业领域，约有85%的工作可由机器人代劳。化工和金属等行业也会越来越多地运用最新颖灵活的机器人。而目前只有10%的可自动化岗位实现了自动化，发展空间十分可观。按照国际机器人联合会的分析数据，2014年，工业机器人的销售量为20万台，年增长近23%。

机器人制造本身就是很大的产业，发展方向将体现“三个更”：

一是智商更高。机器人的智能性与人脑差距悬殊，假设人脑是一台电脑，每秒可以执行38千兆的命令，而世界上最强大电脑深蓝只能执行这个数字的0.02%。机器人的智能化水平有待提高，模糊处理能力也要有质的飞跃，具备一定的“情商”，更善解人意。

二是灵敏度更好。“手”是机器人的短板，人的手有惊人的精密性，里面有超过1万个“传感器”，这是机器人望尘莫及的。今后的方向是模拟生物神经系统，继续改进机器人传感器和抓取系统，使机器人更灵巧。

三是价格更便宜。工业机器人价格目前下降至13万美元左右。成本结构大致是本体22%、伺服系统25%、减速器38%、控制系统10%以及其他5%。今后，降低减速器和伺服系统成本是关键。

机器人在中国未来发展空间巨大。中国制造业正面临着向高端转变、参与国际分工的新挑战，加之人口红利逐年降低、生产力成本上升，在高精尖领域和危险岗位广泛使用机器人是必然趋势。国际机器人联合会预测，到2016年，我国机器人保有量将超过13万台，成为全球最大的市场。我国目前70%的机器人由外国厂商生产，减速器和伺服电机基本靠进口，价格居高不下，机器人创新及应用空间巨大。

总之，在精细化和标准化的高精尖领域，机器人具有常人难以比拟的长处。在全球劳动力成本上升的时代，机器人必将在众多行业大显身手。当然，机器人无论如何优越，它终究是人制造的机器，正确的态度是扬长避短、造福人类。

（作者单位：国务院机关事务管理局）

科海万象

中国卫星全球服务联盟——

建设天基高速信息通道

本报讯 记者温济聪报道：日前，中国卫星全球服务联盟在北京举行新闻发布会，介绍该联盟2015年重点活动计划，启动在全国范围内广泛征集卫星应用服务解决方案，编撰《中国卫星应用服务解决方案大全》，以此纪念我国卫星通信工程，即“331工程”实施40周年。“331工程”是中国航天技术从试验走向应用的重要标志，大大推进了我国应用卫星和卫星应用开始迈向世界水平的进程。

据了解，该联盟制定了“一带一路、全球化发展和国际化经营”3大战略，紧密依托联盟成员的优质资源和国际合作经验，架设天基新丝绸之路，努力实现中国卫星全球服务。联盟正在新疆、宁夏、海南等丝绸之路核心区及重要支点城市建立卫星应用服务示范项目，为“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”建设提供天基高速信息通道，造福社会，惠及民生。

中国卫星全球服务联盟由航天全产业链的优秀企业、科研机构、学校和个人自愿组成。联盟自2014年组建以来，开展了广泛的国际交流和卫星应用服务推广工作，取得了很好的效果。

本版编辑 童 娜 郎 冰
联系邮箱 jjrbxzh@163.com