



液态金属驱动的新型机器人

中国科学技术大学精密机械与精密仪器系智能机器人实验室与澳大利亚伍伦贡大学和苏州大学组成的联合研究组经过两年多的研究，突破多项技术难题，取得了液态金属机器人研究系列进展，研制成功液态金属驱动的功能性移动机器人。

随着科技的发展，机器人对人类的生产生活帮助越来越大。传统机器人结构仿照人类或者四肢动物肢体，具备刚性连杆以及多自由度关节，在工业制造、农业生产、医疗保健、勘探勘测以及安防等领域得到了广泛的应用。然而在某些特殊场合，比如强调人机交互的服务场合、狭小空间以及柔性表面场合等，传统机器人表现出了较大的局限性。因此身体柔软、具备强大变形能力的新型软体机器人应运而生。

液态金属——镓铟合金

液态金属是近年来在国际上受到广泛关注的新型功能材料，其呈液态的同时具有金属特性，因此室温液态金属具有独特的表面性质及理化特性，在微纳机电系统、智能可穿戴设备以及靶向载药等方面都展

现出广阔的应用前景。

共晶镓铟（EGaIn）的液态金属合金由 75% 的镓和 25% 的铟组成，其熔点为 15.5 摄氏度，在室温下为液体。该液态金属具有低粘度和高表面张力，类似于汞。然而与汞不同，EGaIn 具有低毒性和可忽略不计的蒸气压，使其在实验室和工业应用中更为安全。镓铟合金作为“液体”，具备柔软、可变形、可拉伸、可重构、可自我修复等特性；作为“金属”，它们具有高的导电性和导热性。研究者通过在溶液中引入表面张力的梯度，发现了它们前所未有的驱动行为，利用其在微机电系统中实现了“软发动机”，例如在微流体中可以作为泵或者搅拌器使用。

液态金属具备许多独特的优点，如简单的制造工艺，没有传统的移动部件，易于维护和相对低的功耗。之前液态金属在

机器人中的应用主要局限于对液态金属液滴本身在电解液中的各种操控，以及利用液态金属的相变特性实现机器人结构的变刚度性能，尚无利用液态金属的功能性机器人报道。中国科学技术大学精密机械与精密仪器系智能机器人实验室与澳大利亚伍伦贡大学和苏州大学组成的联合研究组在组建之初就从机器人运动出发，希望实现由液态金属驱动的移动机器人。

将液态金属液滴作为柔性轮， 承载以及驱动小车

研究组将液态金属液滴作为柔性轮，承载以及驱动一个小车，通过改变施加在液滴上的电压大小改变表面张力梯度，诱导产生马兰戈尼（Marangoni）效应，从而使液滴运动，并带动小车运动。

为了实现在二维平面下可控的自由运

动功能，研究组使用 16 个液态金属液滴组成 4x4 的阵列作为柔性轮，提高承载能力和运动灵活性。为了使液态金属液滴之间保持相对固定的距离，采用 3D 技术打印了液态金属轮架，液态金属从轮架上的空隙注入，从而承载起轮体结构。在轮架的四面布置了 4 对石墨电极，其中 x 方向的两对电极为同向正负，y 方向的两对电极为异向正负。集成电源、加速度传感器、主控芯片、液态金属轮阵列、轮体支架和电极为一体，研制出非拖线的液态金属驱动的小车；通过对液滴产生的力的理论计算和仿真，可以获取小车单向速度与电极电压之前的关系，与实验获取结果比较接近。通过一个简单的前馈模型，就可以实现液态金属轮驱动的小车在二维平面内的可控运动。该小车无任何机械传动，具有运动平滑柔顺、无噪声、低振动、效率高、成本低廉、易于制造等特点。

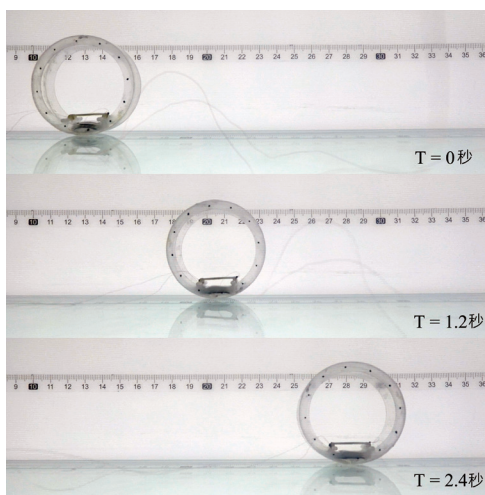
虽然液态金属柔性轮承载和驱动的机器人小车实现了二维平面内运动，但液态金属液滴需要始终浸入在电解液中，这实际上限制了该小车的应用范围，例如在食品和药品相关的工业生产线上，电解液有可能带来污染。液态金属离开电解液会产生氧化现象，其表面会出现一层极薄的氧化膜，从而阻碍了其在电场下产生梯度差诱导的流动。这也是目前液态金属应用中的一大难点。同时，液态金属液滴虽然可以实现电场下的运动，然而驱动力较小，如果想类似于电机驱动机器人在陆地运动，有非常大的难度。

实现陆地平面上的滚动

2010 年研究组成员申请的中国科学技术大学青年创新基金项目“一种基于状记忆合金的新型软体机器人”为上述问题的解决提供了思路，该项目旨在研制一个 SMA 作为轮体的可滚动、蠕动和 Omega

运动的软体机器人，SMA 的变形可以导致机器人轮体的变形，改变重心实现滚动。在此启发下，研究组巧妙地将变重心滚动机器人与液态金属液滴的运动结合，研制出结构简单紧凑、可实现自供能的新型液态金属轮式机器人。

液态金属液滴的持续运动非常重要，研究人员最初设计是环轮体间隔布置电极，使液态金属液滴的运动和电极的开断



液滴运动时序图

配合从而实现连续运动功能。然而经过一年的尝试，发现该方法具有很多缺陷，于是研究组转变思路，设计了一款随液态金属液滴运动的随动电极支架，持续运动的液态金属液滴能够始终保持在随动电极支架之间，推动电极支架在轮缘上滑动。该运动可以持续改变轮式机器人整体的重心，驱动轮式机器人以稳定的速度滚动。

当液态金属液滴在轮式机器人内部以稳定速度移动时，氢氧化钠溶液的粘滞阻力、液滴与轮体内部之间的摩擦以及电极模块与轮缘之间的摩擦等阻力与液滴上的驱动力平衡。为此研究组在轮式机器人的设计中，采用了国家纳米科学中心张晖研究员的超疏水技术处理轮体内表面，能够有效减小氢氧化钠溶液与轮体内表面的粘滞阻力；采用聚四氟乙烯作为电极支架的

滑杆，降低电极和轮缘之间的摩擦力，这些减阻设计对于驱动性能提升十分重要。滚动运动中，滚动阻力通常远低于滑动摩擦，因此，滚动机器人具有较少的功率消耗和较高的速度。

为了研究机器人的运动性能，研究人员对所提出的新型液态金属机器人做了理论建模和实验分析，探索了电解液浓度、施加电压、液态金属体积、轮体结构等参数对机器人运动性能的影响，获得驱动运动的最佳参数匹配。进一步，集成电池系统到轮体的中心作为轮毂，研究人员成功设计了一种以微型圆柱锂电池为动力源的新型液态金属自驱动轮式移动机器人，该机器人能以每秒 1.8 弧度的角速度在非溶液的平面上滚动。

这一创新研究成功克服了以往液态金属驱动装置的运动不能脱离电解液的缺点，极大拓展了液态金属驱动机器人的应用范围。未来研究组将致力于提高该机器人的驱动效率，组合双轮驱动实现机器人的转向以及承受更大负载等功能。研究组期望这种液态金属驱动轮式机器人的概念最终可以演变成一个完全柔软且可重构的机器人，可以适应复杂的工作环境，可在灾后搜救中大显身手，同时，液态金属的自我修复性可以减少故障的发生和定期维护的需要。

致谢：感谢国家自然科学基金项目（项目编号：51828503、51375468、61503270）、国防科技创新特区项目和澳大利亚伍伦贡大学 Vice-Chancellor 博士后基金的支持。

作者：张世武、唐诗杨、李相鹏、伍健、李卫华

（张世武，中国科学技术大学工程科学学院副教授；唐诗杨，澳大利亚伍伦贡大学博士后；李相鹏，苏州大学机器人与微系统中心副教授；伍健，中国科学技术大学工程科学学院硕士研究生；李卫华，澳大利亚伍伦贡大学教授）