液态金属双流体机器人

叶姣^{1,2,3}, 陈建业³, 刘静^{1,2,4*}

1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学未来技术学院, 北京 100049;

3. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074;

4. 清华大学医学院生物医学工程系, 北京 100084

* E-mail: jliu@mail.ipc.ac.cn

收稿日期: 2018-11-16; 接受日期: 2019-01-22; 网络版发表日期: 2019-03-21

国家自然科学基金(批准号: 91748206)和中国科学院前沿科学重点研究计划资助项目

摘要 自20世纪以来, 机器人不断被广泛应用于生产制造、生活服务等诸多领域. 传统刚性机器人受自由度限制, 难以适应非结构化动态未知的复杂环境, 而柔性机器人由于自身的灵活性以及对环境的适应性, 在近年来引起广泛关注. 室温液态金属兼具金属和流体的良好特性, 如优良的导热性、导电性、流动性以及低毒性; 同时, 这类材料由于自身的柔性, 在机器人领域的应用备受关注. 典型的液态金属驱动方式主要有电驱动、磁场驱动和化学驱动, 然而, 它们大多需要在溶液环境中进行. 从新的角度出发, 本文提出了一种基于镓基液态金属双流体驱动的滚动机器人, 通过液态金属在螺旋管中的运动实现对装置重心的改变, 由此推动整个装置实现快速地滚动前行. 这种双流体驱动方式利用液态金属密度大的特点, 使得相应的液态金属机器运动摆脱了之前所依赖的溶液运行环境. 本文针对基于镓基液态金属的双流体驱动, 包括热驱动和化学驱动, 从理论上分析了这两种不同的动力源工作方式, 具体设计了原型实验装置. 所开展的一系列概念性实验澄清了影响装置运动的各种因素, 证实了双流体驱动方法的可行性和良好前景, 可望为室温液态金属在机器人领域的应用提供一种新的思路.

关键词 液态金属, 双流体, 滚动机器人, 热驱动, 化学驱动

1 引言

随着机器人技术的不断发展和完善, 机器人被广泛应用于生产制造、生活服务等诸多领域. 传统机器人主要由刚性结构组成, 它们能够精确高效地实现设定的任务, 但这种机器人灵活度有限, 在环境适应等方面仍存在不足, 尤其在一些动态未知非结构化的环境下, 刚体机器人往往很难满足实际需求. 随着人们

对机器人性能要求的增加, 如灵活性高、多自由度等, 国内外陆续开始了对柔性机器人的研究.

研发柔性机器人的灵感大多来源于生物, 它们模仿自然界的蠕动、爬行、游动、跳跃等运动方式. 滚动, 也是自然界一种高效的运动方式, 很多动物都能蜷成团滚动, 或是躲避天敌, 像穿山甲、金轮蜘蛛等. 因此, 不少学者研究了基于滚动运动的仿生机器人^[1~3]. 其主要原理是通过形状记忆合金(shape mem-

引用格式: 叶姣, 陈建业, 刘静. 液态金属双流体机器人. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 619–626

Ye J, Chen J Y, Liu J. A liquid metal robot driven by hybrid-fluid (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 619–626, doi: [10.1360/N092018-00388](https://doi.org/10.1360/N092018-00388)

ory alloys, SMA)的变形来改变整个装置的重心,从而实现滚动运动。但SMA驱动运动存在响应时间长、运动速度慢等特点,为此,本文提出了基于镓基液态金属的双流体驱动方式,通过双流体的方式改变重心,实现装置的运动,其运动速度可达SMA驱动的10倍左右。

除了运动方式,人们也在探索不同的制造机器人的柔性材料,比如弹性聚合物^[4]、SMA^[5,6]、电活性聚合物^[7,8]、介电弹性体^[9]等,但它们都存在着变形能力有限的缺点^[10],另外,弹性聚合物往往还需要气泵等装置,不能实现独立运动^[11]。近年来,液态金属由于在室温下呈现液态,自身具有能任意变形的能力,很多学者开始从事液态金属运动的研究,希望将之用于柔性机器人。其中,亟待解决的便是液态金属的驱动方式。目前室温液态金属运动的驱动机制可归纳为如下3种。

(1) 电驱动。Sheng等人^[12]发现液态金属在电场诱导下能产生巨大的形态变化,自旋以及相应的平面运动。Yao和Liu^[13]提出液态金属驱动的小车,实现了液态金属驱使机器运动。Tan等人^[14]发现对于微小的液态金属液滴,也能实现电场控制。

(2) 磁场驱动。磁场驱动的液态金属是磁流体的一种,其制造过程通常是将液态金属和磁性粉末相混合。有研究将液态金属裹上铁粉^[15],用外加磁场牵引液态金属前行。也有实验报道将液态金属与镍粉^[16]或其他磁性材料^[17]相混合从而实现磁性制动。

(3) 化学驱动。有研究将液态金属表面附着一层 WO_3 纳米颗粒,在过氧化氢环境中通过激光照射,发生催化反应产生氧气来推动液态金属的运动^[18]。由于光化学推动液态金属运动的速度仅有 $80 \mu\text{m/s}$,进一步的工作将 WO_3 纳米颗粒包裹的液态金属放在酸性或者碱性溶液中,实现电化学运动^[19]。Zhang等人^[20]的发现表明,液态金属在水溶液环境中能通过“吞噬”铝将化学能转化为动能,实现自驱动,其运动速度,运动方向也能实现电场调控^[14]。

前面3种驱动方式虽然实现了液态金属的驱动,但液态金属的运动一般不能离开其运动所需的溶液环境,且这类机构的驱动力偏小。

众所周知,液态金属 $\text{GaIn}_{24.5}$ 的密度为 6280 kg/m^3 ,是水密度的6.28倍。为此,本实验室提出一种与前面3种经典液态金属驱动方式不同的策略——基于镓基液态金属的双流体驱动^[21],即通过改变装置重心,实现其滚动运动,并对其运动影响因素加以分析,借助两

种可实现双流体运动的动力来源——热驱动和化学驱动实现了液态金属双流体机器人的驱动运动。

液态金属双流体机器人利用了液态金属的流动性和密度大的特点,使对应机器人装置的驱动运动脱离了溶液环境,实现了装置的独立运行^[21]。在此系统中,滚动装置可以以较大速度前行,为未来液态金属机器人的发展奠定了一定的基础。

2 双流体驱动原理

液态金属双流体运动的原理如图1(a)所示。反应腔中产生气体(若是化学驱动,则去掉金属丝等装置),推动液态金属绕硅胶管运动,造成重心的变化,从而实现装置向前滚动运动。图1(b)是装置未运动时的侧视图,忽略螺旋管的轴向伸长,液态金属的充注量为 L ,受到产生气体的压力为 p ,螺旋管的螺旋半径为 R ,硅胶管的半径为 r ,装置的质量为 M ,充注的液态金属的质量为 m 。当装置开始启动时,液态金属的重心与轴心的距离为 r_0 ,与 y 轴偏离角度为 $\theta=\theta_0$ 。

装置能够运动的条件是重心偏移造成的扭矩大于摩擦扭矩,即

$$k(M+m)g(R+r) \leq mgr_0 \sin(\theta_0), \quad (1)$$

式中, k 是指硅胶管与地面的滚动摩擦系数。

当运动处于平衡状态时, $\theta=\theta_0$,令 $\alpha=L/R$,由于液态金属灌输量一般比较少,认为重心位于灌输段的中线。对重心进行分析,有

$$r_0 = \frac{R}{\alpha} \sqrt{2(1 - \cos \alpha)}. \quad (2)$$

推动液态金属在管道中运动的气体产生方法有两种,一是化学反应产生气体,另一种是物理反应产生气体。针对第一种化学反应(本文是指针对液态金属催化铝水反应析氢的过程),气体的产生与很多因素有关,比如温度、溶液的浓度、合金的组成、比例和大小以及反应的基底等^[22]。故采用实验的方法获得析氢速率。由

$$l = V/A, \quad (3)$$

两边求导有

$$\dot{l} = \dot{V}/A, \quad (4)$$

式中, l 是液态金属在管中运动的距离, A 是管的截面

图 1 (网络版彩图)液态金属双流体机器人原理及其侧视图的受力分析. (a) 液态金属双流体机器人原理图; (b) 侧视图的尺寸受力分析图

积, V 是析氢量, l 为液态金属在管中运动的速度, $\dot{V}$ 即为析氢速率. 当液态金属重力变化产生的驱动力足够驱动装置运动且不超过装置最高点时, 液态金属相对于地面的高度不再变化, 此时液态金属在螺旋管中运动的距离和螺旋管相对地面运动的距离相等, 即液态金属在管中运动的速度就是整个装置前行的速度.

针对物理过程, 需要进行能量分析. 对于整个运动过程, 整理可得

$$\frac{R_{\text{Ni}}}{R} W_{\text{p}} = \Delta U + q_{\text{s}} + \frac{1}{2} (M + m) v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 + mg(y_0 - y_{\text{A}}), \quad (5)$$

式中, 加热功 W_{p} 是只有加热丝部分的加热功用于系统中能量的转化, R_{Ni} 为加热丝的电阻, R 为总电阻, ΔU 是低沸点工质的加热导致的焓变, q_{s} 是能量的耗散, 包括热耗散和摩擦耗功, I 是装置的转动惯量. y 是液态金属的重心.

从式(5)中可以看出, 加热功的耗散主要分为4部分: 低沸点工质内能的增加, 环境的耗散和动能, 机械能的变化, 且相同的加热时间下, 功率和速度的二次方具有线性关系. 简写式(5), 有

$$W_{\text{p}_{\text{Ni}}} = \Delta U + q_{\text{s}} + E_{\text{k}} + E_{\text{p}}, \quad (6)$$

其中, E_{k} 为动能, E_{p} 为势能.

定义能量转化效率为

$$\eta = \frac{E_{\text{k}}}{W_{\text{p}_{\text{Ni}}}} = \frac{W_{\text{p}_{\text{Ni}}} - W_{\text{r}}}{W_{\text{p}_{\text{Ni}}}} = 1 - \frac{W_{\text{r}}}{W_{\text{p}_{\text{Ni}}}}, \quad (7)$$

式中, W_{r} 是加热功所转化的能量中除了动能的部分, 当不同装置运动到相同位置时, W_{r} 基本相等, 故在相同的加热时间内, 功率越大, 效率越高.

3 双流体驱动实验与结果

3.1 热驱动

3.1.1 实验装置

选用液态金属 $\text{GaIn}_{24.5}$ 做驱动的实验对象, 实验装置如图2(a)所示, 其中, 骨架是由树脂材料3D打印而成. 硅胶管的内径为3 mm, 分别选用0.21 mm的铜丝(带漆包线), 电阻约为0.3 Ω , 以及34.07 Ω/m (20 $^{\circ}\text{C}$)的镍铬丝Cr30Ni70, 直径为0.21 mm, 电阻约为9.0 Ω . 镍铬丝和铜丝采用焊接的方式连接在一起, 装置总重164 g.

图2 (网络版彩图)液态金属双流体机器人实物图及热驱动实验相关数据图。(a) 液态金属双流体机器人实物图; (b) 速度-功率关系图, 其中充注量为1 mL; (c) 启动时液态金属重心变化示意图及实物图, 其中充注量为1 mL, 功率为2.7 W; (d) 速度-充注量关系图, 其中功率为6.3 W

实验在开始之前, 将硅胶管固定在骨架上, 并将硅胶管的一端插入反应腔, 再向其中加入1 mol/L的NaOH溶液润湿, 并抽出。将硅胶管中注入不同质量的液态金属。然后将20 mL的无水乙醇(乙醇的质量分数 $\geq 99.7\%$)注入反应腔, 密封。

在通电之前, 先检查密封性, 若密封完好, 将实验装置与可编程电源连接, 并用刻度尺反映装置的运动。

3.1.2 热驱动实验结果

实验证明, 装置能很好地用双流体原理进行热驱动, 如Movie S1。从式(5)可以看出, 影响速度的因素主要包括加热功率、液态金属的充注量等。因此, 实验分别探究了加热功率对装置运动速度的影响(如图2(b)所示), 以及液态金属充注量对运动速度的影响(如图2(d)所示)。

为了显示液态金属重心的变化, 图2(c)描绘了液态金属充注量为1 mL时装置启动的重心变化的示意图和实物图。由于加热功率大时装置启动很快, 重心位置不好记录, 故采用2.7 W时的重心变化。从图中可以看出, 从加热开始直至8.8 s, 液态金属在装置中的重心

位置不断升高, 当重心高度足够驱动装置运动时, 装置开始滚动, 如图2(c)加热9.7 s所示。当装置运动以后, 由于装置的惯性作用, 液态金属的重心会有略微下降。值得注意的是, 在式(7)中给出了加热功越大, 效率越高的结论, 但并不意味着功率越大越好, 这是由于当功率过大, 产生气体的速度过快, 装置还没来得及反应, 液态金属已经越过装置的最高点开始下降, 从而达不到前行的目的。

图2(b)是液态金属充注量在1 mL, 装置在前20 cm左右的运动平均速度曲线。从图中可以看出, 在不同功率下, 液态金属双流体机器人的运动速率也不同, 加热功率在1.7 W左右的时候, 其运动速度很小, 趋近于零。其原因是当功率很小时, 加热功基本都被耗散, 不能转化成动能, 即其效率为0。此时, 部分液体气化的量很少, 气化的无水乙醇遇上液态金属和管壁又被冷凝为液态, 驱动力不足, 故推动不了此装置。之后, 随着功率的增加, 装置的运动速度持续增加。当功率提高到10 W以后, 速度增加的幅度开始降低。从图2(b)基本可以看出速度的二次方和功率呈现出线性关系。对效率进行粗略估算, 当加热功率为10 W的时候, 其效率约为

$$\eta \approx \frac{10-1.7}{10} \times 100\% = 83\%. \quad (8)$$

图2(d)展示了加热功率为6.3 W, 装置在不同液态金属充注量时的运动情况. 从图中可以看出, 在充注量为0.8 mL以及3.2 mL的时候, 即充注量在1/5圈和4/5圈的时候, 其运动速度很小. 在充注量0.8 mL的时候, 由于硅胶管内的液态金属量比较少, 其上升引起的整个装置的重心变化很小, 驱动力不足, 其运动需要液态金属上升到比较高的位置, 才能引起装置运动, 故运动得很慢. 而3.2 mL时候, 由于液态金属量过多, 几近形成一个圈, 故在运动过程中, 重心的位置也会离转动轴心很近, 但由于其质量增大, 也会形成转动运动. 在这个过程中, 可能会出现液态金属脱节, 由于一部分液态金属转过了最高处, 但整个装置还没有运动, 故转过最高处的液态金属由于重力的作用会下降, 而没转过的部分仍留在原地, 中间有段空隙压力降低, 造成有部分无水乙醇蒸汽进入液态金属之间, 因此单段液态金属会变成两段甚至是多段, 力的分散造成装置不能向前运动.

除此之外, 还可看出, 当液态金属充注量在1.2~2.8 mL即0.24~0.7圈时, 其运动速度大致稳定在7 cm/s左右, 无太大的波动. 说明此时运动速度对液态金属的充注量并不敏感, 在相同的功率下, 可以采用更少量的液态金属.

3.2 化学驱动

近年来对液态金属能催化铝水反应快速产生氢气^[22-24]进行了一系列研究. 化学驱动的原理正是利用液态金属催化铝水反应产生的氢气进行驱动. 化学驱动的实验装置与图2(a)类似, 只需去掉热驱动的设备

中的加热丝. 化学反应时, 反应腔中分别放入1 mol/L的氢氧化钠20 mL, 2 mL液态金属GaIn_{24.5}以及0.53 g铝粒参与反应, 在硅胶管中加入1 mL GaIn_{24.5}, 密封.

铝粒和氢氧化钠溶液在反应腔里面发生的反应如下, 当铝粒放入碱性溶液之中, 表面的氧化层就会被去除:

通过在碱性溶液中加入液态金属, 铝块被分解为很多微小颗粒, 一些微粒向液态金属内部渗透, 一些扩散到液态金属表面. 在外面的铝微粒会和水反应, 并迅速地产氢. 起初, 铝和氢氧根反应, 有

当铝酸盐浓度超过饱和极限时, 铝酸盐发生分解, 再产生氢氧根:

在整个过程中, 氢氧根离子的浓度不变, 并未消耗氢氧根, 碱性溶液在其中只是起到加快反应速率的作用. 故整个铝水反应的方程式如下:

由式(4)可知, 化学反应产生气体的速度和装置运动的速度呈正比, 由于氢气产生速率与很多因素相关, 于是我们在与装置相同的温度下, 用同样浓度的氢氧化钠溶液与相同质量的铝粒进行了独立的析氢速率的实验. 图3(a)给出了20 mL 1 mol/L的氢氧化钠, 通过液态金属2 mL GaIn_{24.5}催化与0.53 g铝粒发生化学反应的析氢速率曲线. 从图中可以看出, 析氢速率是不断变化的, 在6 min以后, 反应速度开始加快, 当反应进行一段

图3 (网络版彩图)析氢速率曲线以及液态金属机器人化学驱动运动图. (a) 液态金属催化铝水反应析氢速率曲线; (b) 化学驱动下液态金属机器人运动图

时间后, 产氢速率比较快, 在此时进行实验, 装置运动如图3(b)所示, 可以看出此时液态金属双流体机器人的运动速度能达到12.85 cm/s. 但当产氢速度进一步加快时, 实验也会出现像前面热驱动所提及的装置来不及反应, 液态金属已经下降的情况. 此时, 若将注入的一段液态金属换成两段处于同一相位的液态金属(两段1 mL的液态金属中部用氢氧化钠溶液隔开), 液态金属运动到相同高度需要的压力越大, 即需要的产氢量越大. 在这种情况下, 由式(1)看出驱动力变成了之前的2倍, 而阻力却不及之前的2倍, 即双段液态金属不需要达到一段液态金属的高度就能使装置驱动, 故双段液态金属难以达到装置的最高位置. 由式(4)可知, 在更快的产氢速率下, 装置运动越快. 灌注双段液态金属的装置运动所能达到的速度是灌注一段液态金属时所能达到速度的近2倍, 见Movie S2. 如图4所示, 其运动速度能达到17.53 cm/s.

另一方面, 本文所提及的驱动仅能实现装置有效距离内的往复运动, 未能形成液态金属在装置中的循环持续运动, 对于化学驱动, 生成气体的排放也还存在问题, 之后的研究进展可以从设计循环结构以及实现各种转向等运动展开.

4 结论与讨论

本文提出了基于重心改变驱动的液态金属双流体

图4 (网络版彩图)两段充注液态金属的化学驱动运动图

机器人的设计和制造方案. 以液态金属作为双流体的基本流体, 研究了其在滚动液态金属双流体机器人中的运动情况. 另一种流体采用两种气体产生方式, 从而实现装置的驱动, 包括流体气化的热驱动方式和化学反应产生气体驱动的化学驱动, 并分别针对两种动力来源进行了分析和实验. 其中, 化学驱动摆脱了外部能量源, 实现了装置自驱动. 另外, 需要指出的是, 本文提出的设计使液态金属脱离了以往驱动液态金属所必需的溶液环境, 相比于之前的滚动机器人, 实现了速度上的大幅提升. 当功率超过1.7 W, 液态金属的充注量在1/5圈和4/5圈时, 装置可实现运动, 并且装置的运动能通过调整液态金属的量以及加热功率等因素实现调控, 从而得到更高的效率.

致谢 感谢中国科学院理化技术研究所博士生高建业、谭思聪、杨小虎等对本研究的帮助.

补充材料

本文的补充材料见网络版techcn.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

参考文献

- 1 Sugiyama Y, Hirai S. Crawling and jumping by a deformable robot. *Int J Robot Res*, 2006, 25: 603–620
- 2 Koh J S, Lee D Y, Cho K J. Design of the shape memory alloy coil spring actuator for the soft deformable wheel robot. In: 2012 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). Daejeon, Korea, 2012
- 3 Koh J S, Lee D Y, Kim S W, et al. Deformable soft wheel robot using hybrid actuation. In: 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Portugal, 2012
- 4 Morin S A, Shepherd R F, Kwok S W, et al. Camouflage and display for soft machines. *Science*, 2012, 337: 828–832
- 5 Seok S, Onal C D, Cho K J, et al. Meshworm: A peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators. *IEEE/ASME Trans*

- [Mechatron](#), 2013, 18: 1485–1497
- 6 Lin H T, Leisk G G, Trimmer B. GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot. [Bioinspir Biomim](#), 2011, 6: 026007
 - 7 Mojarad M, Shahinpoor M. Biomimetic robotic propulsion using polymeric artificial muscles. In: 1997 International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque, New Mexico, 1997
 - 8 Kim K J, Tadokoro S. *Electroactive Polymers for Robotic Applications. Artificial Muscles and Sensor*. London: Springer, 2007
 - 9 Gu G Y, Zhu J, Zhu L M, et al. A survey on dielectric elastomer actuators for soft robots. [Bioinspir Biomim](#), 2017, 12: 011003
 - 10 Lee C, Kim M, Kim Y J, et al. Soft robot review. [Int J Control Autom Syst](#), 2017, 15: 3–15
 - 11 Miriyev A, Stack K, Lipson H. Soft material for soft actuators. [Nat Commun](#), 2017, 8: 596
 - 12 Sheng L, Zhang J, Liu J. Diverse transformations of liquid metals between different morphologies. [Adv Mater](#), 2014, 26: 6036–6042
 - 13 Yao Y, Liu J. Liquid metal wheeled small vehicle for cargo delivery. [RSC Adv](#), 2016, 6: 56482–56488
 - 14 Tan S C, Yuan B, Liu J. Electrical method to control the running direction and speed of self-powered tiny liquid metal motors. [Proc R Soc A](#), 2015, 471: 20150297
 - 15 Kim D, Lee J B. Magnetic-field-induced liquid metal droplet manipulation. [J Korean Phys Soc](#), 2015, 66: 282–286
 - 16 Xiong M, Gao Y, Liu J. Fabrication of magnetic nano liquid metal fluid through loading of Ni nanoparticles into gallium or its alloy. [J Magn Magn Mater](#), 2014, 354: 279–283
 - 17 Yang C, Bian X, Qin J, et al. Metal-based magnetic functional fluids with amorphous particles. [RSC Adv](#), 2014, 4: 59541–59547
 - 18 Tang X, Tang S Y, Sivan V, et al. Photochemically induced motion of liquid metal marbles. [Appl Phys Lett](#), 2013, 103: 174104
 - 19 Tang S Y, Sivan V, Khoshmanesh K, et al. Electrochemically induced actuation of liquid metal marbles. [Nanoscale](#), 2013, 5: 5949–5957
 - 20 Zhang J, Yao Y, Sheng L, et al. Self-fueled biomimetic liquid metal mollusk. [Adv Mater](#), 2015, 27: 2648–2655
 - 21 叶姣. 液态金属双流体机器驱动效应的理论与实验研究. 学士学位论文. 武汉: 中国科学院理化技术研究所/华中科技大学, 2018
 - 22 Yang X H, Yuan B, Liu J. Metal substrate enhanced hydrogen production of aluminum fed liquid phase Ga-In alloy inside aqueous solution. [Int J Hydrogen Energy](#), 2016, 41: 6193–6199
 - 23 Tan S C, Gui H, Yang X H, et al. Comparative study on activation of aluminum with four liquid metals to generate hydrogen in alkaline solution. [Int J Hydrogen Energy](#), 2016, 41: 22663–22667
 - 24 Yuan B, Tan S, Liu J. Dynamic hydrogen generation phenomenon of aluminum fed liquid phase Ga-In alloy inside NaOH electrolyte. [Int J Hydrogen Energy](#), 2016, 41: 1453–1459

A liquid metal robot driven by hybrid-fluid

YE Jiao^{1,2,3}, CHEN JianYe³ & LIU Jing^{1,2,4}

¹ Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

⁴ Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Since the 20th century, robots have been widely used in many fields such as manufacturing and life services. Traditional rigid robots are limited by degrees of freedom and are difficult to adapt to the dynamic and unstructured complex environment. Soft robots have attracted wide attention in recent years due to their flexibility and adaptability to the surroundings. Room temperature liquid metal combines the perfect properties of liquid and metal, such as excellent thermal conductivity, electrical conductivity, fluidity and low toxicity etc. Meanwhile, liquid metal is identified to be very useful in robotics due to its inherent flexibility. At present, the liquid metal can mainly be driven by electrical field, magnetic field and chemical reaction, all of which need to be carried out in solution environments. From an alternative, a rolling robot is proposed based on gallium-based liquid metal driven by hybrid-fluid. The movement of the liquid metal in the spiral tube alters the center of gravity of the device, pushing the entire robotic system to achieve its rolling locomotion, which frees the motion of liquid metal from the solution environment where its locomotion generally relies on. Besides, the hybrid-fluid driving can be achieved by thermal driving and chemical reaction, respectively. In the present research, the principles of two different hybrid-fluid driving mechanisms were interpreted. Prototyping devices were designed, and a series of conceptual experiments were conducted to clarify the factors affecting the motion of the device, which demonstrate the feasibility and prospects of hybrid-fluid driving robot. The present results are expected to be valuable for developing future of soft robotics technologies.

liquid metal, hybrid-fluid, rolling robot, thermal-driving, chemical-driving

doi: [10.1360/N092018-00388](https://doi.org/10.1360/N092018-00388)