

# 基于多相界面的小尺度磁控仿生机器人研究进展

窦斌宏, 陶然, 王兆一, 李兵, 郝崇磊

(哈尔滨工业大学(深圳) 机电工程与自动化学院, 广东 深圳 518055)

**摘 要:** 小尺度机器人能够在狭窄的空间内运动并完成微操作, 在生物医学工程(如药物靶向递送、微创手术)、环境保护、灾难救援等领域具有重要意义。以仿生工程为起点, 综述了在液-气界面、固-液界面、固-气界面运动的昆虫及其他小型动物的界面行为, 分析发现了这些行为的机理, 发现润湿、动态粘附、可调节的各向异性摩擦等性质对小型动物的运动特性具有决定性作用, 归纳总结了小型动物的界面行为在机器人小型化过程中潜在的利用价值。围绕小尺度磁控机器人, 重点阐述了其运动机理、制备技术以及控制方法。其中, 磁控机器人的运动机理主要包括磁梯度推进、螺旋推进以及摆动推进等。光刻技术、3D 打印以及模具成型方法被广泛研究和应用, 其中 3D 打印技术在小尺度磁控机器人制备中越来越重要。机器人的控制方法根据是否建模, 可分为有模型和无模型的控制方法。最后, 结合提出的生物启发灵感, 分析了机器人在表面优化、形态设计、加工制备等方面潜在的创新空间, 并对通过界面技术提升磁控机器人运动性能的愿景进行了展望。

**关键词:** 多相界面; 仿生工程; 磁控机器人; 制备工艺; 控制方法

**中图分类号:** TG174.4; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)08-0051-15

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.005

## Recent Progress in Small-scale Magnetic Controlled Bioinspired Robots Based on Multiphase Interfaces

DOU Bin-hong, TAO Ran, WANG Zhao-yi, LI Bing, HAO Chong-lei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

**ABSTRACT:** Small-scale robots can locomote in a restricted workspace and complete micro-operations, which are of great significance in the fields of biomedical engineering (such as targeted drug delivery, minimally invasive surgery), environmental protection, and rescue. Starting from the biomimetic engineering, the interfacial behaviors of insects and other small-scale animals locomoting at the liquid-vapor, solid-liquid was summarized, and solid-vapor interfaces, analyzed the mechanism of these behaviors, and it was found that wetting, dynamic adhesion, adjustable anisotropic friction and other properties related to interfaces play a key role in the locomotion characteristics of small animals. The potential value of these interface behaviors of small animals in the process of miniaturization of robots is summarized. Moreover, focusing on small-scale magnetic robots,

收稿日期: 2021-04-21; 修订日期: 2021-07-14

Received: 2021-04-21; Revised: 2021-07-14

作者简介: 窦斌宏(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为仿生机器人。

**Biography:** DOU Bin-hong (1996—), Male, Master, Research focus: bio-inspired robot.

通讯作者: 郝崇磊(1988—), 男, 博士, 助理教授, 主要研究方向为仿生表界面工程及液滴动力学。

**Corresponding author:** HAO Chong-lei (1988—), Male, Doctor, Assistant professor, Research focus: bio-inspired surface/interface engineering, droplet dynamics.

引文格式: 窦斌宏, 陶然, 王兆一, 等. 基于多相界面的小尺度磁控仿生机器人研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 51-65.

DOU Bin-hong, TAO Ran, WANG Zhao-yi, et al. Recent progress in small-scale magnetic controlled bioinspired robots based on multiphase interfaces[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 51-65.

their locomotion mechanism, micro/nano-manufacturing technology and control methods was highlighted. The locomotion mechanisms of magnetic robots mainly include magnetic gradient propulsion, spiral propulsion, swing propulsion and etc. Micro/nano-manufacturing technology such as photolithography, 3D printing, and molding methods are extensively studied, among which 3D printing technology is becoming more and more important in the preparation of small-scale magnetic robots. The control methods of robots can be divided into modeled and model-free control methods according to whether they are modeled or not. Finally, combined with the biological inspirations, the robot's potential innovation points from the perspective of surface optimization, shape design, manufacturing are discussed, and the vision of improving the locomotion performance of future magnetic robots through interface engineering is prospected.

**KEY WORDS:** multiphase interface; bio-inspired engineering; magnetic robot; fabrication; control method

小尺度机器人作为机器人领域的重要分支,在生物医学、环境保护、灾难救援等场景中具有重要意义,因为其尺寸较小,可无创进入几毫米甚至几微米的封闭空间,使利用其在人体内进行细胞操纵、靶向药物运输、微创手术等成为可能<sup>[1-4]</sup>。小尺度机器人的主要挑战在于其受到尺度效应影响,无法直接应用大型机器人中的经验和理论,需要通过新的视角来审视这些挑战。因此,受生物启发的小尺度机器人技术作为一个新兴研究方向,吸引了科学家的极大兴趣。自然界中的小型动物大多数不像大型动物那样拥有复杂的肌肉-骨骼结构,它们往往通过自身伸缩、弯曲等变形,实现蠕动、弹射、喷射等复杂运动,并且能够利用这些运动在复杂的自然环境中生存。这启发人们可以通过控制机器人本体材料的变形,进而控制机器人的运动及操作<sup>[5]</sup>。随着智能材料的深入研究以及加工技术的不断进步,小尺度机器人领域在驱动方式、制备技术等方面得到了快速的发展,取得了大量的研究成果,但距离小尺度机器人的实际应用还有待考察,主要问题在于机器人驱动能力有限,难以在多种复杂的狭小空间中自如地运动,并且执行微型操作<sup>[6-8]</sup>。

小型动物的行为特征对于研究小型机器人具有重要的指导作用。在自然界中,小型动物总是能够适应各种不同环境,可以在多种界面上自如地运动,例如瓢虫、水黾、蜗牛等由于体积小、比表面积大等特点,能广泛利用界面现象在不同的地形上爬行、游动或悬停在空气、水下表面,而且可以自由地在不同的界面之间穿梭,能够在受限狭窄空间中移动并克服各种障碍。这些发生在不同界面上的特异行为,将为提升微型机器人应对复杂狭窄环境的能力提供丰富的经验。自然界中生物体的表面经过进化,可以使它们适应复杂的界面环境。小型动物例如昆虫、壁虎等之所以能够在界面上产生特异性为,是因为界面现象的存在,通过粘附等机制使其能够适应不同的复杂环境。可以预见,界面现象将对机器人小型化以及提升运动性能起到重要作用<sup>[9]</sup>。

目前小尺度机器人的驱动方式主要包括电驱动<sup>[10]</sup>、

磁驱动<sup>[11]</sup>、热驱动<sup>[12]</sup>、光驱动<sup>[13]</sup>、超声驱动<sup>[14]</sup>、压力驱动<sup>[15]</sup>、生物混合驱动<sup>[16]</sup>、PH驱动<sup>[17]</sup>等,其中磁驱动方法由于能够通过磁场非接触地产生力和扭矩,已被认为并证明是一种有前途的技术。它能够提供给机器人所需的能量,并对机器人设备进行精确地控制,已被证明在许多工程应用,特别是小型应用中,是一种有效且有影响力的方法。除此之外,由于磁场对人体几乎没有伤害,这使得磁控机器人在医学上将具有巨大的潜力<sup>[18]</sup>。对于磁控微型机器人的研究焦点主要包括操控机理、制备方法、控制方法等。在操控机理方面,目前磁驱动机理主要包括基于磁力和磁转矩的磁梯度推进、螺旋推进以及摆动推进等,除了这些简单的推进方式外,还可以通过模仿小型动物的运动,以提高小尺度机器人的运动能力。在制备技术方面,3D打印受到越来越多学者的关注和研究,在小尺度机器人的制备中具有重要作用,除此之外,传统的光刻技术、模具成型技术也被广泛的研究和应用<sup>[19-21]</sup>。在控制技术方面,无模型的智能控制方法被越来越多的研究者所应用,在生物医学方面取得了卓著的成效<sup>[22-24]</sup>。本文概述了在液-气界面、固-液界面、固-气界面运动的昆虫及其他小型动物的界面行为;重点介绍了小尺度磁控机器人的运动机理、制备技术及控制方法;最后,对通过界面技术提升磁控软体机器人运动性能的愿景进行了展望。

## 1 小型动物的界面现象

在自然界中,很多小型动物生活在恶劣的环境中(图1),暴露在灰尘、各种界面、液体或高湿度环境下,这对研究小尺度机器人在复杂环境中的运动及操控提供了解决方案。在过去的几十年中,大型机器人的运动取得了长足的进步,而小尺度机器人的运动仍然是一个挑战。微型化和复杂的运动方式之间相互耦合,因此微型机器人的运动往往立足于材料本身,通过外部刺激以达到运动的目的。事实证明,光、声和磁等刺激可以有效地操纵小物体,但是这可能会限制这些系统的适用性。



图 1 自然界中在液-气、固-液、固-气界面行走的小型动物示例

Fig.1 Examples of small animals walking on liquid-gas, solid-liquid, and solid-gas interfaces in nature: a) water strider<sup>[25]</sup>; b) fire ant<sup>[26]</sup>; c) sybil beetle; d) gyro beetle<sup>[27]</sup>; e) sea slug; f) flat intestine; g) cap shellfish; h) leaf beetle<sup>[28]</sup>; i) southeast crown snake; j) gecko; k) aphids

## 1.1 液-气界面

水面上会发生许多重要的相互作用,经过长时间的进化,许多小型动物都能够在水面上生活,例如水虿(图 1a)类动物生活在陆地-水生边界上(包括静水、快速流动的溪流甚至是海面)。栖息地的多样性和出色的利用水面的能力,使水虿进化出了复杂的机制生活在水面上,它们腿部极强的超疏水性提供了出色的水面操作能力,理论分析表明,水面的表面张力在各种相互作用中起主要作用<sup>[25]</sup>。固体表面的润湿行为可以用杨氏模型<sup>[29]</sup>来进行推导,在理想平面上,液滴和固体表面之间的接触角  $\theta_Y$  如图 2a 所示,可以由公式(1)进行描述。

$$\cos \theta_Y = (\gamma_{sg} - \gamma_{sl} / \gamma_{lg}) \quad (1)$$

其中,  $\theta_Y$  是杨氏模型的平衡接触角,  $\gamma_{sg}$ 、 $\gamma_{sl}$ 、 $\gamma_{lg}$  分别是固-气、固-液、液-气界面张力。杨氏模型里的固体表面是理想状态下均匀、光滑、无限平坦的刚性固体表面。水虿的足部具有超疏水性,其腿部被大量倾角约为  $20^\circ$ 、直径小于  $3 \mu\text{m}$ 、长约  $50 \mu\text{m}$  的微型刚毛覆盖,每根刚毛表面具有精细的纳米纹路<sup>[30]</sup>。在这种情况下,宏观接触模型需要采用 Cassie 模型<sup>[31]</sup>,如图 2b 所示,宏观接触角  $\theta_C$  可由公式(2)进行描述,其中  $\phi$  为单位面积内,固-液界面的接触面积与实际表面积之比。

$$\cos \theta_C = \phi(\cos \theta_Y + 1) - 1 \quad (2)$$

火蚁(图 1b)起源于广阔的洪泛区和湿地,是一种多态蚂蚁,被困在水下的火蚁能通过利用从淹没

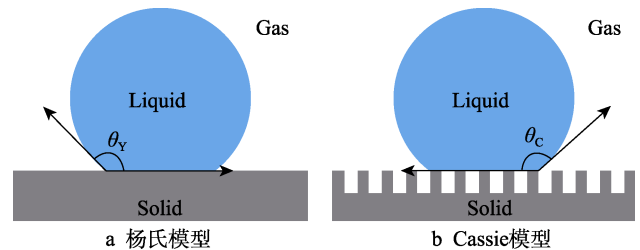


图 2 接触角模型原理图

Fig.2 Schematic diagram of contact angle model: a) Young's model; b) Cassie model

基质中收集的气泡,将自身提升到空气-水界面进行逃逸,且其在疏水性刚毛下可以维持气泡<sup>[26]</sup>。在某些水生甲虫中,其鞘翅的表面显示出相对较低的接触角,甚至具有亲水性。Sun 等<sup>[32]</sup>报告了西比尔雌雄同体甲虫(图 1c)的鞘翅表面不具有均匀的接触角,而是具有沿后轴纵轴的梯度润湿性。当一小滴水接触到鞘管表面时,其头会浸在水中与水面成小角度倾斜。陀螺甲虫是半水生昆虫(图 1d),在水面上行走时,甲虫会同时受到流体阻力和波浪阻力。Jonathan 等<sup>[27]</sup>分析了陀螺甲虫在水面上的游泳速度、腿部运动学和毛细作用波,发现这些甲虫使用了三种腿部运动类型,并产生了四种主要速度模式,每种类型的腿部运动学都会产生特征性的毛细作用波,且陀螺甲虫能通过使用低速和高速腿部运动学避免最大阻力。

## 1.2 固-液界面

当考虑使用小尺度机器人时,水下环境就对材料

和运动提出了更大的挑战,机器人运动会受到浮力、不同黏度和雷诺数下阻力的影响(图3)。动物在水下固体表面的运动速度 $v$ 取决于它们的粘附力 $F_A$ 和摩擦力 $F_f$ 。水下附着可能与化学黏液<sup>[33]</sup>、表面微结构形成的机械联锁<sup>[34]</sup>、界面上的毛细力<sup>[35]</sup>以及某些抽吸器官形成的负压<sup>[36]</sup>等有关。

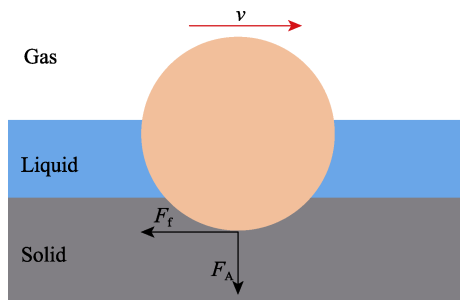


图3 软体材料在固-液界面的接触

Fig.3 The contact of soft materials at the solid-liquid interface

公式(3)为摩擦力 $F_f$ 计算公式,其中 $\mu$ 为机器人与界面之间的滑动摩擦系数, $N$ 为接触面的正压力。公式(4)是基于JKR理论的粘附力计算过程<sup>[37]</sup>,其中 $\Delta\gamma$ 为将两相彼此分离所需的功(粘附功), $R$ 为接触物的特征半径。

$$F_f = \mu N \quad (3)$$

$$F_A = -\frac{3}{2}\Delta\gamma\pi R \quad (4)$$

生活在固-液界面的小型动物通常使用强力或永久性粘附才能生存。更值得关注的是,它们可以通过可逆的粘附力进行快速运动。例如海蛞蝓(图1e)有时会暴露在海浪或空气中,因此,其附着力必须足够大,以承受强大的流体动力<sup>[38]</sup>。扁肠虫(图1f)附着在沙子上,以抵抗水和潮汐的作用,然而它在1 min内显示出对各种表面的多次粘附和脱离循环,它是通过马蹄形的乳头状结构来实现的,使用了大约130个粘附器官<sup>[39]</sup>。帽贝(图1g)生活在海边,通过脚掌底的强力粘合(粘合强度介于0.1~1.1 MPa之间)来抵御海浪、风和掠食性动物,并且会根据用途分泌不同的胶水,用来运动或固定附着<sup>[40]</sup>。除了粘附以外,可通过吸力机制来控制水下附着。Kang等<sup>[41]</sup>研究了一种水生昆虫幼虫的附着,该幼虫使用肌肉驱动的吸吮器官附着在洪流中的岩石上,同时研究了鳃球抽吸器官的性能和多功能性,并介绍了一种新的研究系统来探索生物抽吸。抽吸比化学粘合及其随后的释放要快得多,它需要一个被动或主动的抽吸机构,将抽吸器官与表面接触,可以很容易地进行粘附,然而释放机制可能较复杂。另外,水下粘附可以依靠空气毛细管桥,叶甲虫(图1h)将空气困在水下,其粘合垫的疏水固定结构中产生了稳定的空气壳,可使要粘合的表面润湿,并在粘合垫与表面之间形成一个连续的或多个空气毛细管桥,这使甲虫可逆地附着在水下的

固体表面,并增强附着力,这样就可以克服浮力在水下的固体表面行走<sup>[28]</sup>。

### 1.3 固-气界面

当机器人在固-气界面运动时,主要受到摩擦和干粘附作用的影响。在生物界中,有很多动物生活在固-气界面,如蛇(图1i)和蜥蜴等爬行类动物常年生活在干燥的环境中。研究表明蛇皮表面具有复杂的摩擦改性纳米结构,其引起了接触区域粘合力的显著降低,这些局部接触点的低表面附着力,可以减少局部磨损和环境碎片对皮肤的污染。微原纤维的高度非对称“棘爪状”轮廓曲率半径为20~40 nm,会导致向前和向后运动中的摩擦各向异性,并充当向后运动的有效止动器,保持向前运动的低摩擦。贯穿蛇皮的连续微孔系统可以用作润滑、抗粘脂质混合物的输送系统,从而为蛇皮提供边界润滑<sup>[42]</sup>。这种可以自适应改变表面摩擦性能的特点受到了学者们的广泛研究<sup>[43]</sup>,对于软体机器人运动性能的提升具有重要的作用。受到蛇皮在软体表面摩擦系数(COF)较低启发,Wang等<sup>[44]</sup>开发出了具有低COF的弹性体,这些弹性体在不牺牲其体积顺应性和延展性的情况下,COF从1.6降低到了0.1,可广泛应用于软体机器人、可穿戴设备、生物医学等不适合润滑的场景。大多数壁虎(图1j)几乎可以在任何类型的表面快速附着和分离,这种能力归因于它们脚底的分层结构形成了具有精细结构的粘合剂系统。脚部的刮铲状结构同时符合微米级和纳米级的凹凸,可实现较大的真实接触面积,因此壁虎可以通过范德华力<sup>[45]</sup>和其他类型的因素(例如表面性质<sup>[46]</sup>、毛细力<sup>[47]</sup>、静电引力<sup>[48]</sup>、酸碱相互作用<sup>[49]</sup>等)粘附到不同的表面。Linghu等<sup>[50]</sup>受蚜虫(图1k)启发,设计了由磁驱动的快速可调、可逆的粘合机制。粘合剂填充有磁性粒子,可通过调整磁场大小,从而调整附着力,具有出色的可切换性和快速响应能力。粘附机制的研究对探索机器人运动方式有重要的指导意义,尤其对攀爬机器人的研究起到了重要的作用<sup>[51]</sup>。

润湿、动态粘附、可调节的各向异性摩擦等性质决定了水黽、叶甲虫、蛇等动物的运动场景、运动能力以及生活习性,这说明运动能力对生物体的环境适应性具有重大影响。因此,在机器人设计中必须首先规划好机器人的运动方式,才能提高其环境适应能力。润湿的性质启示人们可以将机器人的足部超疏水化,以排除水对机器人运动的干扰,这方面学者们进行了大量的研究<sup>[52-54]</sup>。除此之外,可以在机器人表面设计润湿梯度,这样可以用最简单的方式为机器人提供动力。动态粘附主要包括干粘附和湿粘附,除了研究粘附剂和干粘附表面之外,可以通过研究粘附动态切换的过程(主要是生物抽吸过程),并与机器人、微流体等结合,通过仿生工程设计仿生抽吸粘附动态切换机制。蛇皮表面具有可调节的各向异性,使得蛇



表面的摩擦性质可以动态切换,根据这一思想,可以对机器人的表面进行特殊处理,并使其动态可改变,帮助机器人适应不同的生存环境。

## 2 多相界面上的磁控机器人

小尺度机器人在生物医学工程(药物靶向递送、微创介入诊疗)、环境保护、灾难救援等领域具有重要意义,受到了学者们的广泛关注,小尺度机器人的驱动方法主要包括物理驱动、化学驱动、生物驱动三类,主要的物理驱动方法包括电驱动、热驱动、光驱动、磁驱动、声驱动、压力驱动等,其中利用磁场操纵的小尺度机器人具有极大的优势,主要包括远程可操纵、无燃料驱动、形态可重构等<sup>[18,55-57]</sup>。为了进一步提升磁控小尺度机器人的运动性能,可以从小型动物的界面行为中获得启发,通过界面技术进行优化,从而获得最优的性能。

### 2.1 界面上运动的磁控机器人

受自然界启发,近些年人们逐步开展了基于仿生的小尺度机器人的研究,并将其应用于涉及不同复杂界面的环境和工程中,已经取得了较大的研究成果。Sitti 等<sup>[58]</sup>制备了小尺度的磁控软体机器人,该机器人可以在水面(液-气界面)、固体表面等环境中自由地爬行、翻滚、游动,能够执行货物运输等任务(图 4a),且使用组合运动模式还可以在合成胃体模中进行药物运输,具有极强的运动能力。Shen 等<sup>[59]</sup>研发出了仿生多足毛虫的微型软体机器人,其有数以百计、长度少于 1 mm 且柔软如毛发的尖腿(图 4b)。该设

计大幅减少了足底与表面的接触面积,进而降低了摩擦,使其能够在干燥或潮湿的环境中行走(固-液-气复杂界面)。Li 等<sup>[60]</sup>研制出了一种仿生材料,其本身可作为一种软体机器人,能够在水下环境(固-液界面)中行走,完成拾取和运输物体等任务(图 4c),通过磁场和光驱动,精确度和敏捷性都得到很大提升,其前进速度达到了每秒一步。Nelson 等<sup>[61]</sup>受到千足虫等生物启发,制备了一种带有柔性纤毛的可编程同步起伏的磁性软体机器人(图 4d)。通过拉伸机器人使其符合各种三维几何形状,机器人上的复杂磁化轮廓随后将在动态磁场下转换为同步波形,使得机器人可以在固体表面(固-气界面)像千足虫一样行走,并且可以进行货物运输。此外, Ren 等<sup>[62]</sup>受钵水母碟状幼体启发,设计并制造了一种仅有几毫米大小的机器人(图 4e),将一个磁性复合弹性体核与 8 个可弯曲垂瓣连接在一起,施加振荡磁场后,这些垂瓣便会收缩再恢复。该仿生机器人能够在水下(液相)环境操控其周围的水流动,完成一系列任务。

此外,液滴在日常生活中很常见,但是它们对于许多自然现象以及工业过程都极为重要,近年来液体形态的机器人因其可变形、可重构等特性受到了广泛的关注,一些人认为液滴可以被视为具有生命系统的液体机器人<sup>[63]</sup>。通过配置不同的液滴机器人能够便于研究机器人与界面的接触过程,目前磁控液滴机器人受到了广泛关注<sup>[64]</sup>。Xie 等<sup>[65]</sup>提出了可重构的多功能铁磁流体液滴机器人(图 5a),通过编程外部磁场来控制多个铁磁流体液滴的可重构大变形和协调运动,采用此机制可实现运载液体货物、有效变形和灵活处理易碎物等功能。Sun 等<sup>[66]</sup>提出了一种复合液态金属

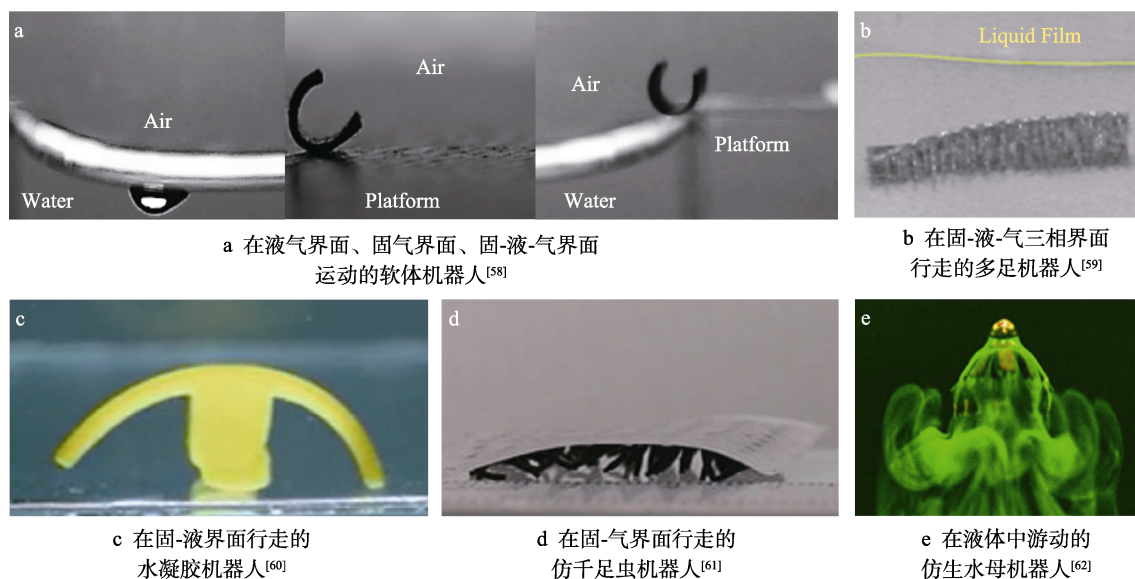


图 4 磁控机器人在界面的运动

Fig.4 The locomotion of the magnetic robot on different interfaces: a) a soft robot that locomotes on the liquid-gas interface, solid-gas interface, and solid-liquid-gas interface<sup>[58]</sup>; b) a multi-legged robot walking on the solid-liquid-gas three-phase interface<sup>[59]</sup>; c) a hydrogel robot walking on the solid-liquid interface<sup>[60]</sup>; d) a mimic millipede robot walking on the solid-gas interface<sup>[61]</sup>; e) bionic jellyfish robot swimming in liquid environment<sup>[62]</sup>

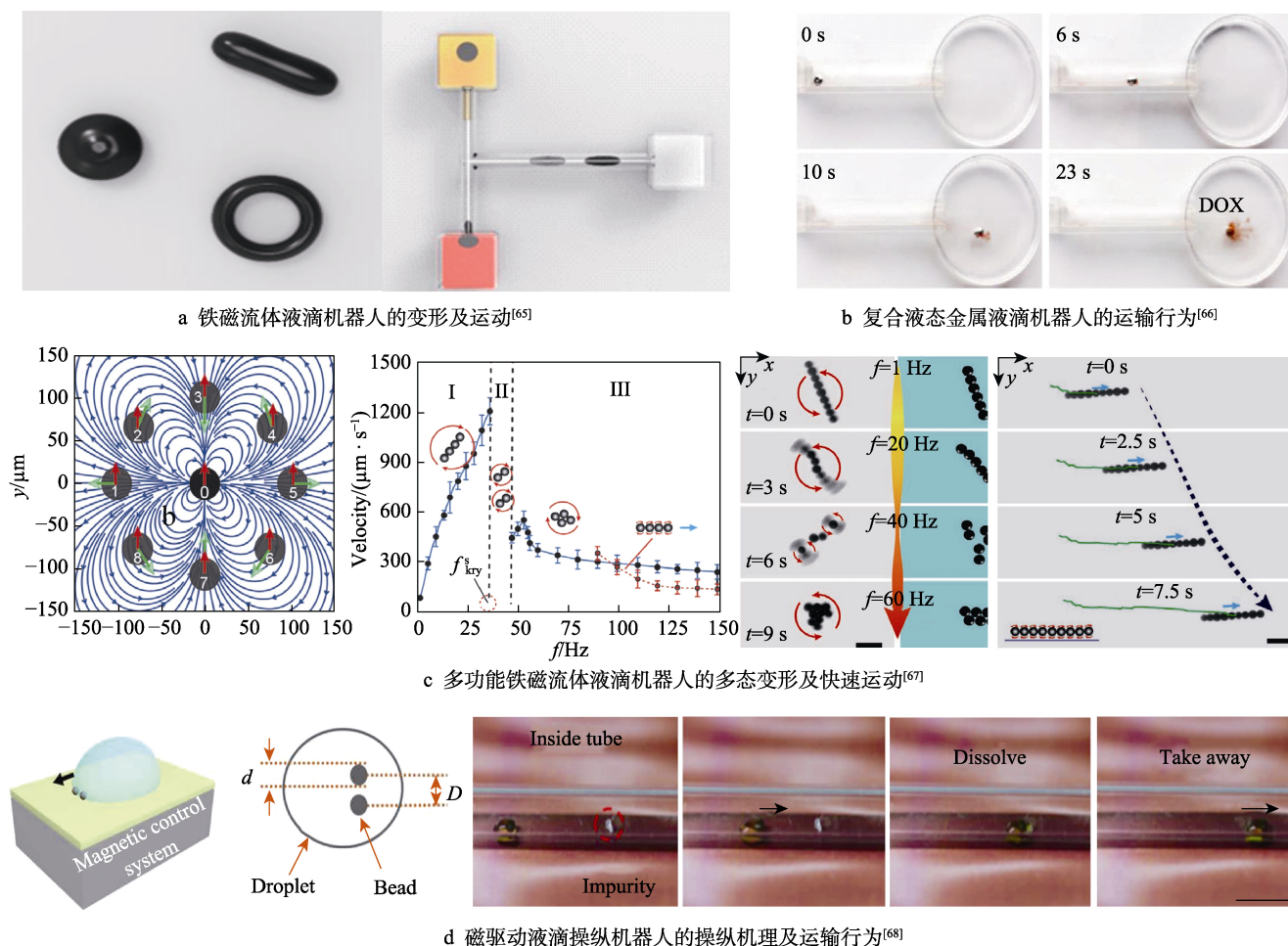


图5 几种不同的磁控液滴机器人

Fig.5 Several different magnetic controlled droplet robots: a) deformation and movement of the ferrofluid droplet robot<sup>[65]</sup>; b) the transportation behavior of the composite liquid metal droplet robot<sup>[66]</sup>; c) multi-state deformation and rapid motion of multi-functional ferrofluid droplet robot<sup>[67]</sup>; d) manipulation mechanism and transportation behavior of a magnetically driven droplet manipulating robot<sup>[68]</sup>

液滴机器人,其通过将中空的球形磁性内部框架组装到液态金属小滴中而制成(图5b),通过电场和磁场的相互作用实现复杂的驱动,如跳跃、攀登等。Fan等<sup>[67]</sup>制备了一种由铁磁流体小滴组成的液体微型机器人,不仅可通过伸长穿过狭窄的通道,还可以重组为各种功能性的液体机器人集合体(图5c),响应多地形表面或执行各种复杂的任务。Li等<sup>[68]</sup>提出了一种可以对液滴进行多次可编程操纵的磁驱动机器人(图5d),其可调结构重新分配了来自液滴前端和后端的阻力。机器人可以用来运输、分裂、释放和旋转液滴,普遍适用于在恶劣环境中处理各种流体。

## 2.2 磁控机器人运动机理

磁性驱动是通过远程施加的磁场(图6)在嵌入磁体或由可磁化材料制成的磁性机器人上施加力或扭矩来实现的。由于操纵区域中不存在电流,因此准静态磁场可以用麦克斯韦方程(式(5))来描述<sup>[69]</sup>:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times B &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $B$  为外部磁场,  $\nabla$  为梯度算子,  $B$  的梯度矩阵是对称矩阵且  $B$  的迹为零。如图 6a 所示,当磁性机器人处于非均匀磁场中时,存在磁力  $f$  (公式(6));在均匀磁场中(图 6b),磁性机器人的磁化强度与磁场方向之间发生偏转时,磁转矩  $\tau$  (公式(7))作用在磁性物体  $m$  上;当磁性机器人分别施加非均匀磁场和均匀磁场时(图 6c),可以形成推进和转向两种机制,从而提升机器人的运动灵活性。

目前,通过磁场的产生形式可以将推进方式分为

$$f = (m \cdot \nabla) B = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\tau = m \times B = \begin{bmatrix} 0 & B_z & -B_y \\ -B_z & 0 & B_x \\ B_y & -B_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (7)$$



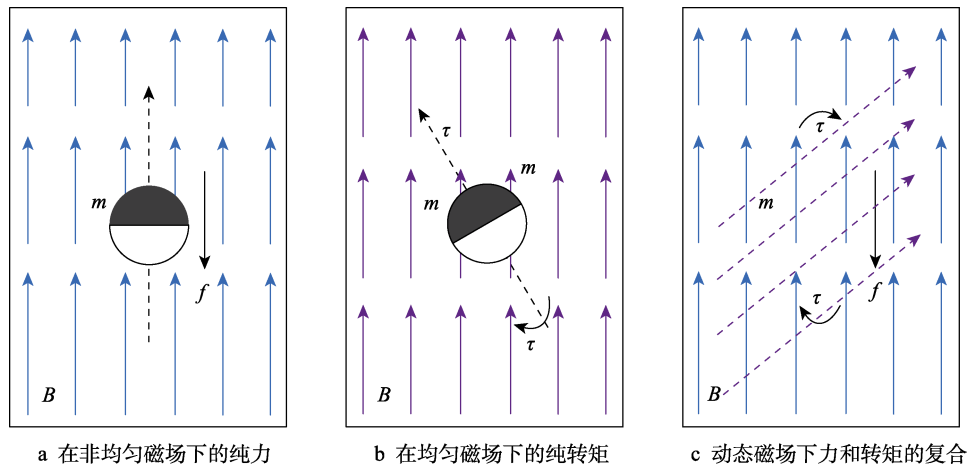


图 6 电磁相互作用

Fig.6 Electromagnetic interaction: a) pure torque under a uniform magnetic field; b) pure force under a nonuniform magnetic field; c) combination of force and torque under dynamic magnetic field

电磁体磁场推进和永磁体磁场推进两大类,其中电磁推进根据驱动力以及机器人结构形态的不同,可分为磁梯度推进、螺旋推进以及通过身体起伏的摆动推进。在电磁梯度推进方面, Niu 等<sup>[70-73]</sup>开发了基于磁梯度的驱动系统,可以实现微机器人操纵。在后续优化中,通过参数优化得到了更大的操作空间,通过优化铁芯的形状和探头的尺寸,进一步增加了聚焦区域的梯度,设计的系统在不同的体外环境(纯净水、人工脑脊液、小鼠血液、血管模型等)以及体内环境(斑马鱼蛋黄)中,能够成功地驱动微型机器人。Kim 等<sup>[74]</sup>报告了非牛顿流体中旋转球形微粒的自发非对称推进,证明了球体旋转轴上存在两个相等且相反的推进状态,验证了这些球形微粒的推进机制。Irving 等<sup>[75]</sup>在先导动物研究中,通过应用 0.5 T/cm 的磁性梯度,将磁性纳米颗粒运输到大脑嗅球中,使用 4.7 T 的核磁共振系统,可以轻松检测到纳米颗粒浓度的增加,其潜在应用包括递送药物,以改善癫痫。

在磁控螺旋推进方面, Nelson 等<sup>[76]</sup>受细菌鞭毛启发,报告了人工细菌鞭毛,它由一段螺旋形尾巴和一段细软磁头组成,可由三个正交电磁线圈进行精确地推动。Tottori 等<sup>[77]</sup>受茸毛启发提出了具有正交附件的人工螺旋微游泳器,其带有垂直于主突鞭毛的乳突,拍打并传播正弦波后,乳突跟随鞭毛运动,并保持它们与鞭毛的正交方向。Ceylan 等<sup>[78]</sup>报告了一种基于水凝胶由磁力驱动的可降解的推进器,并设计了一种双螺旋结构,可在旋转磁场中实现大量货物的装载和游泳功能。高度多孔的水凝胶网络可以有效地隔离大量治疗和诊断货物,并通过响应各种输入信号来释放。Zhang 等<sup>[79]</sup>提出了一种多孔的空心微游泳器,其具有由磁纳米颗粒聚集的中孔纺锤状外壳和螺旋形内腔,成功构建了多孔空心结构,实现了超高比表面积的表面功能化,并实现了基于扩散的货物装卸。Xin 等<sup>[80]</sup>提出了一种新型的锥形中空式微螺旋,并开

发了一种使用飞秒涡旋光束,快速制造具有可控制参数微螺旋的制备技术。与平直微螺旋相比,锥形微螺旋的向前游动能力提高了 50%, 横向漂移减小了 70%。

在磁控摆动推进方面, Harmatz 等<sup>[78]</sup>将较大的铁磁微球与指定距离上较小的非磁性微球组成微游泳器,通过外部磁场驱动的膨胀和收缩,实现了对游泳器形状的瞬时控制。在振荡磁场中,相同的微游泳器在 126 s 内收缩并移动了  $(58.8 \pm 0.7) \mu\text{m}$ 。Sun 等<sup>[81]</sup>提出了一种基于磁性水凝胶的生物可降解微游泳器,其具有四个刚性段,每个刚性段都通过弹簧连接到后续段,以实现起伏。在外部振荡磁场作用下,微游泳器可以实现波动运动,并在低雷诺数范围内,沿外部磁场引导的方向移动。Liao 等<sup>[82]</sup>提出了一种仿鱼类电磁推进微游泳器,该微游泳器像自然鱼一样包含头和尾鳍,尾鳍表面沉积有镍。当施加振荡均匀磁场时,尾鳍产生振荡,推进微游泳器向前运动。

永磁体磁场推进主要是通过外部机构驱动永磁体在空间中运动,通过产生动态变化的磁场驱动机器人爬行。在 Shen 等<sup>[59]</sup>设计的磁控机器人操纵平台中,将带有永磁体的曲柄移动导杆机构安装在在二维移动平台上,通过曲柄移动导杆机构带动永磁体运动,从而产生动态磁场驱动机器人变形运动,二维平台跟随机器人运动。目前,电磁致动系统因其结构简单、可控性好等特点成为人们研究磁控机器人常用的设备。

梯度推进、螺旋推进以及摆动推进能够很好地驱动在液体环境中运动的机器人,当机器人处于界面时,其运动能力将受到限制,通过研究小型动物在界面的行为,将有助于寻找更加有效的,以磁控手段为基础的运动机理,提高磁控机器人的运动能力。

## 2.3 磁控机器人结构形态

与大型机器人不同,在小尺度机器人中进行复杂

结构的设计与构建是极其困难的,尤其是在微纳尺度方面,加工和装配都非常困难。因此,对于小尺度机器人,只能通过简单的结构形态设计,以实现特定的功能。在此基础上,可以通过综合优化机器人形态、材料、控制等设计参数,从而得到最优的机器人结构。

近年来,研究者对小尺度磁控机器人进行了大量的研究,开发出了一批具有特定功能的软体机器人。Shen 等<sup>[59]</sup>制备了多足状软体机器人(图 7a),能够以每秒 40 倍肢长在不同环境中爬行,可以执行胶囊药物运输等任务,运载超过自身质量 100 倍的货物和超过超自身十倍高度的障碍物。Xu 等<sup>[83]</sup>制备了一种三角片状软体机器人(图 7b),该机器人具有三角头尾形态,并进行了正弦磁化,能够以横向起伏的形式移动,机器人可以在流体内自由游动,也可通过调整振幅在各种密闭空间中游动。Joyce 等<sup>[84]</sup>受尺蠖启发制备了一种仿毛毛虫形软体机器人(图 7c),该机器人的步幅为 5 mm,约为身体长度的八分之一,线速度为 1.67 mm/s;光滑表面的最大承载能力为 5.95 g,约为其自身质量的 30 倍,此外,它能够承受其质量 1.5 倍的负载,在 45°倾斜的表面稳定爬升。Tracy 等<sup>[85]</sup>制备了一种可重构、可远程驱动的软体机器人(图 7d),该机器人在形状记忆聚合物中嵌入直径为 4  $\mu\text{m}$  的铁颗粒,能够同时进行磁致动和光热致动,研究中演示了包括悬臂、花朵、螺旋、抓斗和双稳态卡扣等形态,证明了这些材料的响应和可重构性。Wie 等<sup>[86]</sup>制备了螺旋状软体机器人(图 7e),机器人能够以每秒 60 倍体长的速度游泳,其分级磁致动性适用于各种运动,如楼梯、坡道攀爬,水下、水上游泳等。除此之外,该机器人能够以集群模式运动,实现货物运输。Cai 等<sup>[87]</sup>提出了一类由铁磁流体制成的磁性软体机器人(图 7f),通过整合运动和主动变形,证明了该软体机器人具有执行复杂任务(例如穿越狭窄环境和运输多个物体)的能力。

Zhao 等<sup>[88]</sup>制备了一种亚毫米级、自润滑的软体

机器人,该机器人具有基于磁驱动的全向操纵和导航功能,能够在复杂且受限的环境中进行导航,如具有多个动脉瘤的曲折脑血管。此外,还能通过集成在身体中的功能核心进行可控激光传输。Chautems 等<sup>[89]</sup>提出了一种具有可变刚度的磁性连续装置,其尖端被精确地成形并利用外部磁场进行控制。Choi 等<sup>[90]</sup>面向弥散性血管内凝血的治疗,研发了一种引导软体机器人,机器人连接到导丝的尖端进行引导操作,并在冠状动脉的三维体模中测试了带有该机器人的导丝,能够实现 3D 空间内的高精度控制。Gu 等<sup>[91]</sup>提出了一种磁性四极模块,该模块能够形成具有任意 2D 形状的磁性组件。每个模块都有一个可调的磁偶极矩,可通过调节单个模块的磁偶极矩对整体磁化进行编程。通过简单的组合设计,可同时达到任意形状和任意磁化强度的控制。该模块对可以用于软体机器人进行模块化的编程组装,以适应不同的应用场景。Yang 等<sup>[92]</sup>提出了一种基于超软、超弹性磁性 DNA 水凝胶的软机器人,具有组合的动态交联网络,具有剪切稀化和循环应变特性,在适应环境变化后,可恢复其形状,能够在有限的空间内输送细胞。Misra 等<sup>[93]</sup>设计了四种毫米规模的软体机器人(蠕虫、海龟、四足动物和千足虫),并研究了它们在外磁场下的致动,机器人运动速度在 0.15~0.37 mm/s,并且能够穿越不平坦的地形。Wu 等<sup>[94]</sup>提出了一种矩形软体毫米机器人,其头部和尾部具有磁驱动功能,该机器人显示出了强大的多峰运动能力,包括可控和可变形的爬行、摆动和滚动,且具有出色的螺旋推进能力和越障能力,能够螺旋式越过超过两个体长的障碍物,在 2 mm 高的隧道内爬行以及在 450  $\mu\text{m}$  宽的通道内摆动。

相比于小型动物,目前已开发的磁控软体机器人结构简单、功能单一,执行特定任务的能力还有待提高。经过对比发现,小型动物大都具有较长的可疏水的腿以及光滑可粘附的表面,因此设计可控的粘液释放机制就具有极高的研究价值。

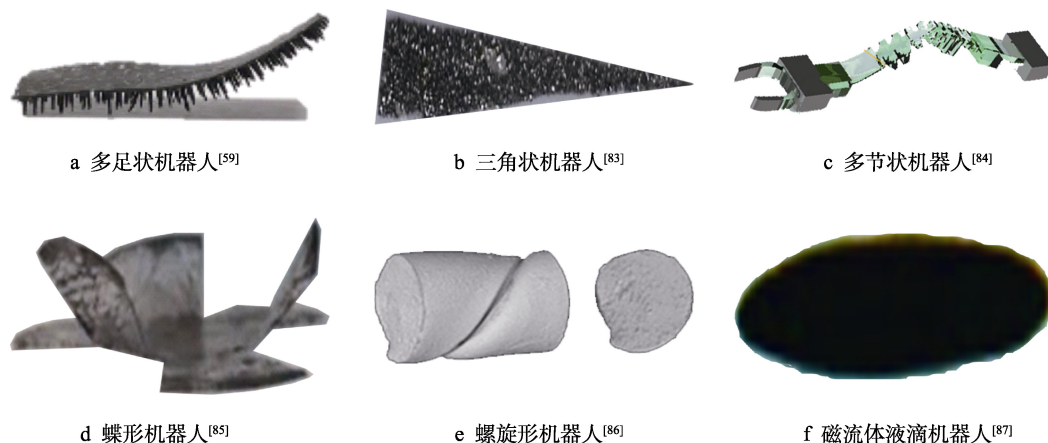


图 7 磁控软体仿生机器人结构形态

Fig.7 Magnetically controlled software bionic robot designed by each research group: a) multi-legged robot<sup>[59]</sup>; b) triangular robot<sup>[83]</sup>; c) multi-node robot<sup>[84]</sup>; d) butterfly robot<sup>[85]</sup>; e) spiral robot<sup>[86]</sup>; f) magnetic fluid droplet robot<sup>[87]</sup>



### 3 磁控机器人的制备技术

天然生物将变形转化为运动的能力吸引了研究人员在构建仿生致动器和智能系统方面越来越多的关注。作为功能材料的典型类别，由挠性弹性体基质和磁性颗粒组成的磁响应复合弹性体，由于响应于施加的磁场方向和强度而动态变化，因此在该研究领域起着至关重要的作用。目前已经开发出了多种有效的制备方法用于加工基于磁响应复合弹性体的磁驱动仿生致动器，以在某些特定领域中实现特定功能（表 1）。在磁场控制下，仿生致动器不仅可以产生随时间变化的变形，还可以在多种环境中运动，这为目标抓取和定向运输提供了新的可能性<sup>[95]</sup>。

Zhao 等<sup>[96]</sup>提出了在软材料中对铁磁畴进行编程的墨水直写打印方法（图 8a），该方法基于包含铁磁微粒的弹性复合材料的墨水直写，在打印时向喷嘴施加磁场，以重新定向粒子，从而将图案化的磁极性赋予机器人。Diller 等<sup>[97]</sup>提出基于紫外光刻技术（图 8b），通过磁性粒子的重新定向和选择性曝光，在平面材料中对磁性粒子进行编码。Ma 等<sup>[98]</sup>提出了磁性多材料打印技术（图 8c），通过磁性形状记忆聚合物和磁性软材料的集成 3D 打印，从而设计出一系列具有多峰变形的机器人。Sitti 等<sup>[99]</sup>提出热辅助 3D 磁性编程（图 8d），在聚二甲基硅氧烷（PDMS）中嵌入磁性  $\text{CrO}_2$  粒子，并将其加热超过居里温度，在冷却过程中施加外部磁场，使磁化方向重新定向。

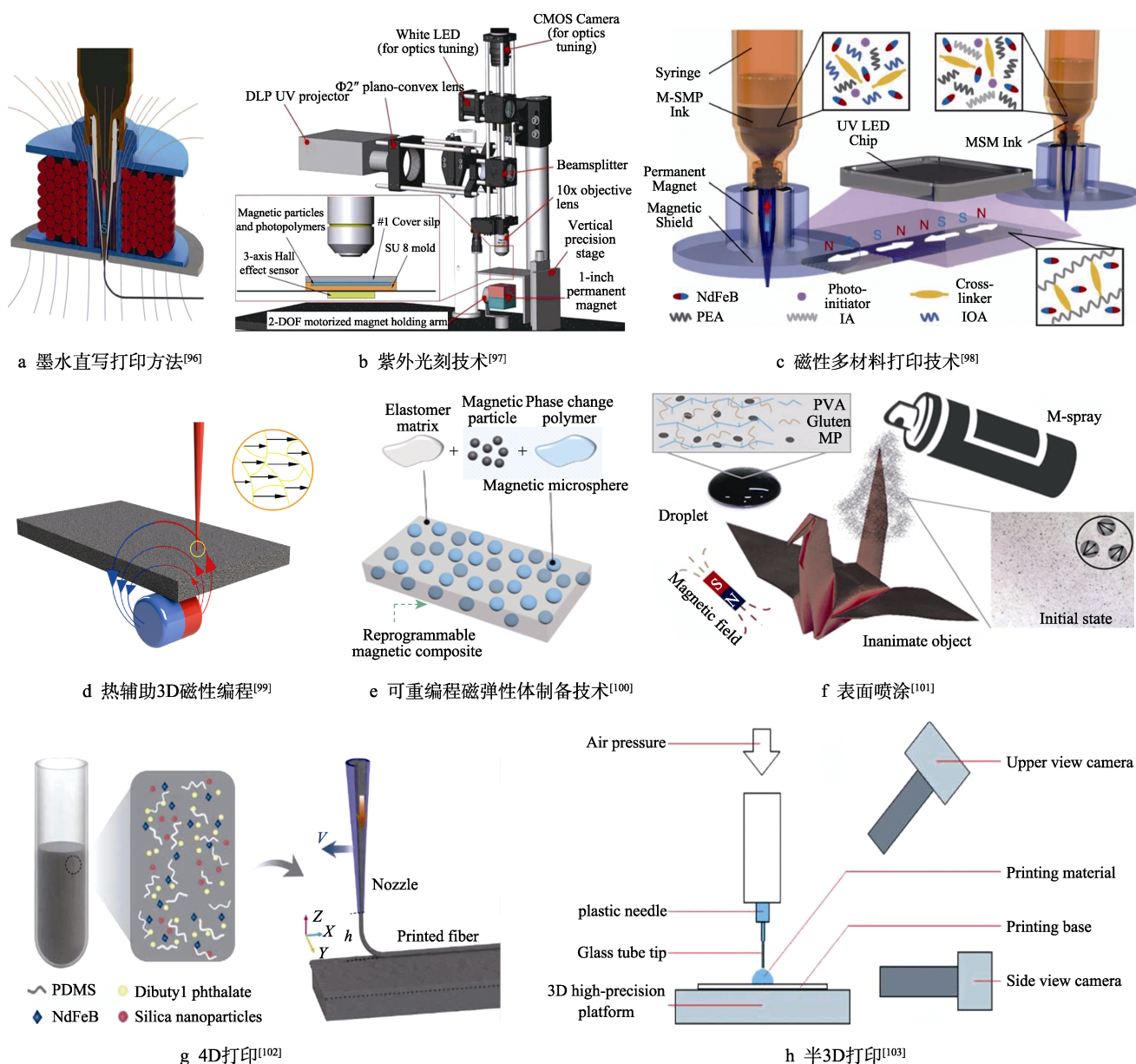


图 8 磁控机器人制备技术

Fig.8 Magnetic robot preparation technology: a) ink direct writing printing method<sup>[96]</sup>; b) UV lithography<sup>[97]</sup>; c) magnetic multi-material printing technology<sup>[98]</sup>; d) thermally assisted 3D magnetic programming<sup>[99]</sup>; e) preparation technology of reprogrammable magnetoelastic body<sup>[100]</sup>; f) Surface spray<sup>[101]</sup>; g) 4D printing<sup>[102]</sup>; h) semi 3D printing<sup>[103]</sup>

表 1 小尺度磁控机器人制备方法  
Tab.1 Manufacturing methods of small-scale magnetic robots

Research group	Method	Material	Magnetize
Zhao@MIT <sup>[96]</sup>	Direct ink writing	PDMS+NdFeB particle	2.7 T pulse magnetize; 50 mT redirect
Wang@CityU <sup>[59]</sup>	Modified magnetic particle-assisted molding approach	PDMS+Fe particle	Unmagnetized
Eric@UToronto <sup>[97]</sup>	Ultraviolet lithography	UV Resin+Fe particle	1.1 T uniform magnetize; 120 mT redirect
Shen@CityU <sup>[101]</sup>	Surface spray	Gluten+Fe particle	100 mT redirect
Sitti@MPI <sup>[99]</sup>	Heat-assisted 3D magnetic programming	PDMS+CrO <sub>2</sub> particle	Heat then 15 mT magnetize
Zhao@OSU <sup>[98]</sup>	Magnetic multimaterial Printing	Resin+NdFeB particle	1.5 T pulse magnetize; 180 mT redirect
Jiang@SYSU <sup>[102]</sup>	4D printing	PDMS+NdFeB particle	Fold, pulse magnetize, redirect

Kim 等<sup>[100]</sup>开发了可重编程磁化强度的软磁复合材料制备技术 (图 8e), 可在不改变嵌入的磁性颗粒的固有磁性或基体材料的分子性质的情况下, 重新编程磁化曲线。Shen 等<sup>[101]</sup>提出通过使用复合磁性喷雾剂喷涂物体表面, 来构造小尺度机器人 (图 8f), 使各种对象覆盖磁驱动膜 (厚度约 100~250  $\mu\text{m}$ ), 从而在磁场的作用下爬行、行走和滚动等。Jiang 等<sup>[102]</sup>提出了一种 4D 打印策略 (图 8g), 将传统 3D 注射打印与基于折纸的磁化技术相结合, 可轻松制造具有 3D 图案化磁化轮廓的磁活性软材料对象。Sun 等<sup>[103]</sup>提出了一种用于制造磁性驱动的微型软机器人的半自动化微型 3D 打印系统 (图 8h), 打印材料放在单独的打印针中, 可以在打印过程中快速填充和更换, 多种磁性材料驱动的微型机器人可以使用此 3D 打印系统进行打印。

目前的制备技术只能制备一些功能结构相对简

单的机器人, 想要在界面上完成更多的任务, 就必须在加工过程中, 在机器人体内集成更多的致动方式, 通过不同的刺激响应, 实现机器人多模多态的运动, 这就要求新的加工方式的产生, 在这方面, 3D 打印技术有望为磁控机器人的制备提供更多的解决方案。

## 4 磁控机器人的控制技术

不受束缚、可控制的移动微型机器人应用范围很广, 包含微观操纵、体外任务 (例如微尺度生物物质的操作) 以及体内应用 (例如靶向药物递送、近距离放射治疗、热疗等)。由于它们的规模小, 并且可以访问狭窄而复杂的环境, 研究人员已经使用了不同的磁致动系统, 通过开环预编程控制、闭环路径跟随控制等运动控制方法 (如图 9), 来致动微型机器人<sup>[104]</sup>。

柔性的磁控机器人具有超弹性本体, 其本构关系

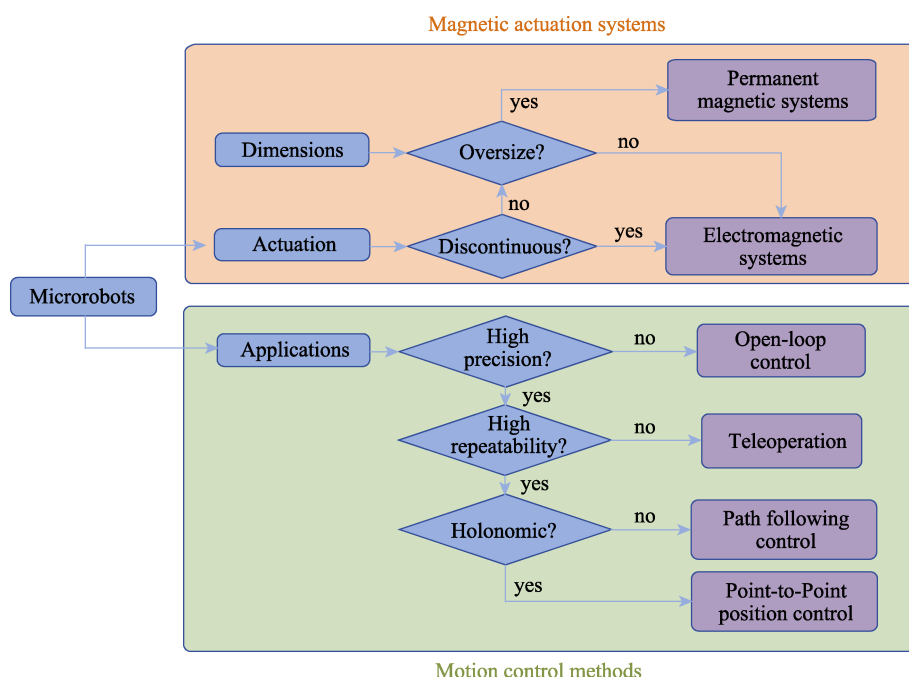


图 9 磁控软体机器人控制方法<sup>[104]</sup>  
Fig.9 Magnetic soft robot control method<sup>[104]</sup>

非常复杂,目前已提出的本构模型主要包括:多项式模型(公式(8))、Mooney-Rivlin 模型(公式(9))、Neo-Hookean 模型(公式(10))、Yeoh 模型、Ogden 模型、Arruda-Boyce 模型、Vander-Waals 模型等<sup>[105-106]</sup>,这些模型都是通过应变能来描述应力-应变关系,能够正确反映特定条件下部分超弹性体的本构关系。即便如此,这种本构关系的描述依旧非常困难,因此也有更多其他的建模方法被提出。Diller 等<sup>[107]</sup>基于 Euler-Bernoulli 梁对均匀磁场中的软体机器人进行了建模,使用 Matlab 建立了迭代数值算法,来预测机器人随着形状变化而不断变化的作用力和扭矩,设计了一种基于计算机视觉的比例反馈控制器。Yang 等<sup>[108]</sup>分析了微游泳机器人的运动规律和磁场的变化,建立了机器人的数学模型,分析得到了游泳者的弯曲程度与磁场强度之间的关系,进而分别分析了频率、磁场强度和游泳速度之间的关系。

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (8)$$

$$U = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1} (J_{el} - 1)^2 \quad (9)$$

$$U = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1} (J_{el} - 1)^2 \quad (10)$$

式中,  $U$  是材料的应变势能,  $\bar{I}_1$ 、 $\bar{I}_2$  是材料变形的度量,  $J_{el}$  是弹性体积比,  $C_{ij}$ 、 $N$ 、 $D_i$  是材料参数,  $C_{ij}$  描述了材料的剪切行为, 参数  $N$  为选择的多项式阶数,  $D_i$  决定材料是否可压缩, 如果所有的  $D_i$  都为 0, 则代表材料是完全不可压缩的。

除了有模型的控制方法外,无模型的控制方法也随着人工智能的兴起而受到人们的关注<sup>[109]</sup>。Sun 等<sup>[73]</sup>提出了在心血管环境中使用无模型方法对微型机器人进行导航控制的方法,微型机器人在血管中移动时无需了解血流速度分布。Xu 等<sup>[110]</sup>提出了一种基于图像的视觉伺服、数据驱动的无模型方法,将在图像空间中提取的特征作为反馈用于机器人的导航控制。Nelson 等<sup>[111]</sup>分析了低雷诺数下局部流变对游泳的影响,确定了在运动中使用弹性流体动力耦合的本构关系,通过实验证明,在没有板载传感器的情况下,磁性微游泳器与流体的动态耦合能实现自适应运动。Sitti 等<sup>[112]</sup>提出使用贝叶斯优化和高斯过程,将概率学习方法用于毫米尺度的磁性机器人中,提供了一种数据有效的学习方案。Pietro 等<sup>[113]</sup>提出一种自适应控制技术,对参数不确定性和未知的有界扰动具有鲁棒性,可以在部分了解动力学的环境下,使内窥镜悬浮,以获得更高的推进速度。

另外,在小尺寸机器人微操作方面,Yoon 等<sup>[114]</sup>提出了一种混合式微型夹钳,用超声波触发微型夹钳的开闭,用磁场驱动微钳运动,该微型夹钳可在水性迷宫环境中对生物鲑鱼卵进行主动和安全的拾取和

放置。Li 等<sup>[115]</sup>制备了一种磁控 pH 响应水凝胶软体机器人,该机器人能够在磁场驱动下进行移动,通过调节不同的 pH 值,可以使微型夹钳张开或闭合,从而实现药物的抓捕与释放。Wang 等<sup>[12]</sup>提出了使用热、磁致动的微型机器人进行治疗剂的靶向运输,可在热驱动下产生膨胀,进而释放药物。Lee 等<sup>[116]</sup>提出通过红外刺激,实现机器人的溶胀来释放抗癌药物。Chung 等<sup>[117]</sup>提出在人体血管中利用气泡的声激发,将药物携带、释放和渗透到目标组织中。

目前针对磁控软体机器人的控制方法的研究不够透彻,通过仿生研究可以得出,可通过控制粘附点的动态变化,以形成机器人的运动;可通过反向模拟的方法,设计机器人控制策略,用控制的方式提高机器人的运动效能和设计合理性。

## 5 展望

机器人的小型化是机器人技术发展的一个重要方向,研究昆虫等小型动物的运动特性将对展开小尺度软体机器人的研究具有重要意义。可以预见,未来小尺度软体机器人发展空间巨大,其将不断朝着小型化、集成化、多功能等方向发展,将在生物医学工程、环境保护、灾难救援等领域产生极高的应用价值。

在磁控机器人仿生材料设计方面,使用超疏水材料可以开发出具有不同功能的在固-液界面运动的机器人,例如使用超亲油疏水材料的机器人可用于在水环境中提取油,进而起到净化水质、能源回收等作用。小型动物的粘附行为可以启发小尺度机器人积极调整粘附机制,可以更快地在表面移动。生物功能表面可能会启发具有新功能的小尺度机器人,例如同时具有亲水和疏水特性的复合材料表面或者具有浸润性梯度的表面可能在机器人的定向运动或自组装集群行为控制中有重要启示。

在磁控仿生机器人制备方面,已有的小尺度机器人加工手段非常有限,例如光刻等手段只能制备结构比较简单的二维结构,对于三维结构的加工能力严重不足。目前来看,基于 3D 打印的制备方法使许多小尺度机器人的快速设计和制备成为可能,而无需昂贵的工具、模具和光刻掩模。由于可打印材料的范围在不断扩大,能够在各种长度范围内对它们的组成和体系结构进行编程,3D 打印正在推动无数应用领域的创新。生物启发性复合材料、形状变形系统、柔性传感器和机器人技术的发展证明了这一点。然而,当前的 3D 打印仍然遭受有限的材料选择、较差的制造精度和低产量的困扰。因此,应不断开发具有快速制造、高扩展性和良好控制精度的先进制造技术。

在磁控仿生机器人的控制方面,大多数小尺度机器人均为柔性,与刚性机器人不同,柔性机器人可被视为连续系统,具有无限多个自由度,虽然已经提出

了很多基于应变能的本构模型,但是建立精确的受控模型依旧是一个重大的挑战。主要的解决方案有两种:一是通过有限元方法对机器人进行仿真分析,建立基于有限元特征的受控模型;另一种解决方法是,采用无模型的控制策略,通过引入机器学习等智能算法,自主构建无模型的机器人控制器。

目前,小尺度软体机器人的研究已经成为了全球科技工作者关注的焦点之一,虽然已经取得了大量的科研成果,但是距离其产业化应用还有相当长的路要走。本综述分析概述了运动在不同界面的小型动物,着重概述了小尺度磁控机器人的相关要点,展望分析了仿生技术对促进软体机器人发展的有关方向,将为小尺度磁控机器人的发展提供更多灵感和仿生依据。

### 参考文献:

- [1] WANG Ben, KOSTARELOS K, NELSON B J, et al. Trends in micro-/nanorobotics: Materials development, actuation, localization, and system integration for biomedical applications[J]. *Advanced materials*, 2021, 33(4): 2002047.
- [2] NELSON B J, KALIAKATSOS I K, ABBOTT J J. Microrobots for minimally invasive medicine[J]. *Annual review of biomedical engineering*, 2010, 12: 55-85.
- [3] HU Cheng-zhi, PANÉ S, NELSON B J. Soft micro- and nanorobotics[J]. *Annual review of control, robotics, and autonomous systems*, 2018, 1(1): 53-75.
- [4] YANG Jia, ZHANG Chuang, WANG Xiao-dong, et al. Development of micro- and nanorobotics: A review[J]. *Science China technological sciences*, 2019, 62(1): 1-20.
- [5] PALAGI S, FISCHER P. Bioinspired microrobots[J]. *Nature reviews materials*, 2018, 3(6): 113-124.
- [6] YANG Y, ZENG W, HUANG P, et al. Smart materials for drug delivery and cancer therapy[J]. *View*, 2021, 2(2): 20200042.
- [7] HINES L, PETERSEN K, LUM G Z, et al. Soft actuators for small-scale robotics[J]. *Advanced materials*, 2017, 29(13): 1603483.
- [8] LEE C, KIM M, KIM Y J, et al. Soft robot review[J]. *International journal of control, automation and systems*, 2017, 15(1): 3-15.
- [9] YAN Xian-tong, JIN Yuan-kai, CHEN Xue-mei, et al. Nature-inspired surface topography: Design and function [J]. *Science China physics, mechanics & astronomy*, 2019, 63(2): 1-15.
- [10] WU Yi-chuan, YIM J K, LIANG Jia-ming, et al. Insect-scale fast moving and ultrarobust soft robot[J]. *Science robotics*, 2019, 4(32): 1594.
- [11] SITTI M, WIERSMA D S. Pros and cons: Magnetic versus optical microrobots[J]. *Advanced materials*, 2020, 32(20): 1906766.
- [12] GO G, NGUYEN V D, JIN Zhen, et al. A thermo-electromagnetically actuated microrobot for the targeted transport of therapeutic agents[J]. *International journal of control, automation and systems*, 2018, 16(3): 1341-1354.
- [13] WANG Xiao-dong, JIAO Nian-dong, TUNG S, et al. Photoresponsive graphene composite bilayer actuator for soft robots[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2019, 11(33): 30290-30299.
- [14] RAO K J, LI Fei, MENG Long, et al. A force to be reckoned with: A review of synthetic microswimmers powered by ultrasound[J]. *Small*, 2015, 11(24): 2836-2846.
- [15] KONISHI S, MORI F, SHIMIZU A, et al. Structural reinforcement effect of a flexible strain sensor integrated with pneumatic balloon actuators for soft microrobot fingers [J]. *Micromachines*, 2021, 12(4): 395.
- [16] ALAPAN Y, YASA O, YIGIT B, et al. Microrobotics and microorganisms: Biohybrid autonomous cellular robots [J]. *Annual review of control, robotics, and autonomous systems*, 2019, 2(1): 205-230.
- [17] KUMAR V, KO U H, ZHOU Yi-long, et al. Microengineered materials with self-healing features for soft robotics[J]. *Advanced intelligent systems*, 2021, 3(7): 2100005.
- [18] EBRAHIMI N, BI Cheng-hao, CAPPELLERI D J, et al. Magnetic actuation methods in bio/soft robotics[J]. *Advanced functional materials*, 2021, 31(11): 2005137.
- [19] BALAKRISHNAN H K, BADAR F, DOEVEN E H, et al. 3D printing: An alternative microfabrication approach with unprecedented opportunities in design[J]. *Analytical chemistry*, 2021, 93(1): 350-366.
- [20] WANG Xin-na, GAO Bo, CHAN B P. Multiphoton microfabrication and micropatterning (MMM)—An all-in-one platform for engineering biomimetic soluble cell niches[J]. *Biomaterials*, 2021, 269: 120644.
- [21] GUL J Z, SAJID M, REHMAN M M, et al. 3D printing for soft robotics—A review[J]. *Science and technology of advanced materials*, 2018, 19(1): 243-262.
- [22] XING Jie-hua, YIN Ting, LI Shui-ming, et al. Sequential magneto-actuated and optics-triggered biomicrobots for targeted cancer therapy[J]. *Advanced functional materials*, 2021, 31(11): 2008262.
- [23] JIANG Jia-lin, YANG Li-dong, ZHANG Li. Closed-loop control of a Helmholtz coil system for accurate actuation of magnetic microrobot swarms[J]. *IEEE robotics and automation letters*, 2021, 6(2): 827-834.
- [24] SALEHIZADEH M, DILLER E D. Path planning and tracking for an underactuated two-microrobot system[J]. *IEEE robotics and automation letters*, 2021, 6(2): 2674-2681.
- [25] MA Jing-ze, LU Hong-yu, LI Xiao-song, et al. Interfacial phenomena of water striders on water surfaces: A review from biology to biomechanics[J]. *Zoological research*, 2020, 41(3): 231-246.
- [26] ADAMS B J, HOOPER-BUI L M, STRECKER R M, et al. Raft formation by the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*[J]. *Journal of insect science*, 2011, 11(1): 171.
- [27] VOISE J, CASAS J. The management of fluid and wave resistances by whirligig beetles[J]. *Journal of the Royal*



- Society, interface, 2010, 7(43): 343-352.
- [28] HOSODA N, GORB S N. Underwater locomotion in a terrestrial beetle: Combination of surface de-wetting and capillary forces[J]. *Proceedings biological sciences*, 2012, 279(1745): 4236-4242.
- [29] YOUNG T. III. An essay on the cohesion of fluids[J]. *Philosophical transactions*, 1805, 95: 65-87.
- [30] GAO Xue-feng, JIANG Lei. Water-repellent legs of water striders[J]. *Nature*, 2004, 432(7013): 36.
- [31] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of porous surfaces[J]. *Transactions of the faraday society*, 1944, 40: 546.
- [32] SUN Ming-xia, CHEN Yuan, ZHENG Yong-mei, et al. Wettability gradient on the elytra in the aquatic beetle *Cybister chinensis* and its role in angular position of the beetle at water-air interface[J]. *Acta biomaterialia*, 2017, 51: 408-417.
- [33] LEE B P, MESSERSMITH P B, ISRAELACHVILI J N, et al. Mussel-inspired adhesives and coatings[J]. *Annual review of materials research*, 2011, 41: 99-132.
- [34] DITSCHKE-KURU P, KOOP J H E, GORB S N. Underwater attachment in current: The role of setose attachment structures on the gills of the mayfly larvae *Epeorus assimilis*[J]. *The journal of experimental biology*, 2010, 213(11): 1950-1959.
- [35] PENG Z L, WANG C, CHEN S H. Effects of surface wettability on gecko adhesion underwater[J]. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 2014, 122: 662-668.
- [36] BAIK S, KIM D W, PARK Y, et al. A wet-tolerant adhesive patch inspired by protuberances in suction cups of octopi[J]. *Nature*, 2017, 546(7658): 396-400.
- [37] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A. Surface energy and the contact of elastic solids[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1971, 324(1558): 301-313.
- [38] GERVAIS J A, TRAVESSET A, WILLSON M F. The potential for seed dispersal by the banana slug (*ariolimax columbianus*)[J]. *The American midland naturalist*, 1998, 140(1): 103-110.
- [39] Lengerer B, PJETA R, WUNDERER J, et al. Biological adhesion of the flatworm *Macrostomum lignano* relies on a Duo-gland system and is mediated by a cell type-specific intermediate filament protein[J]. *Frontiers in zoology*, 2014, 11(1): 12.
- [40] KANG V, Lengerer B, WATTIEZ R, et al. Molecular insights into the powerful mucus-based adhesion of limpets[J]. *Open biology*, 2020, 10(6): 200019.
- [41] BARBER A H, LU Dun, PUGNO N M. Extreme strength observed in limpet teeth[J]. *Journal of the Royal Society, interface*, 2015, 12(105): 20141326.
- [42] HAZEL J, STONE M, GRACE M S, et al. Nanoscale design of snake skin for reptation locomotions via friction anisotropy[J]. *Journal of biomechanics*, 1999, 32(5): 477-484.
- [43] RIESER J M, LI Tai-de, TINGLE J L, et al. Functional consequences of convergently evolved microscopic skin features on snake locomotion[J]. *PNAS*, 2021, 118(6): e2018264118.
- [44] WANG Meng-yuan, GHOSH S K, STAFFORD C M, et al. Snakeskin-inspired elastomers with extremely low coefficient of friction under dry conditions[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2020, 12(51): 57450-57460.
- [45] AUTUMN K, SITTI M, LIANG Y A, et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae[J]. *PNAS*, 2002, 99(19): 12252-12256.
- [46] STARK A Y, SUBARAJAN S, JAIN D, et al. Superhydrophobicity of the gecko toe pad: Biological optimization versus laboratory maximization[J]. *Philosophical transactions series A*, 2016, 374(2073): 20160184.
- [47] HUBER G, MANTZ H, SPOLENAK R, et al. Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(45): 16293-16296.
- [48] IZADI H, STEWART K M, PENLIDIS A. Role of contact electrification and electrostatic interactions in gecko adhesion[J]. *Journal of the Royal Society, interface*, 2014, 11(98): 20140371.
- [49] SINGLA S, JAIN D, ZOLTOWSKI C M, et al. Direct evidence of acid-base interactions in gecko adhesion[J]. *Science advances*, 2021, 7(21): 9410.
- [50] LINGHU Chang-hong, WANG Cheng-jun, CEN Nuo, et al. Rapidly tunable and highly reversible bio-inspired dry adhesion for transfer printing in air and a vacuum[J]. *Soft matter*, 2018, 15(1): 30-37.
- [51] HUANG Jun-wen, LIU Yu, YANG Yu-xin, et al. Electrically programmable adhesive hydrogels for climbing robots[J]. *Science robotics*, 2021, 6(53): 1858.
- [52] ZHU Hong, XU Bo-rui, WANG Yang, et al. Self-powered locomotion of a hydrogel water strider[J]. *Science robotics*, 2021, 6(53): 7925.
- [53] DINGLER C, MÜLLER H, WIELAND M, et al. From understanding mechanical behavior to curvature prediction of humidity-triggered bilayer actuators[J]. *Advanced materials*, 2021, 33(9): 2007982.
- [54] KOH J S, YANG E, JUNG G P, et al. Jumping on water: Surface tension-dominated jumping of water striders and robotic insects[J]. *Science*, 2015, 349(6247): 517-521.
- [55] ZHOU Huai-juan, MAYORGA-MARTINEZ C C, PANÉ S, et al. Magnetically driven micro and nanorobots[J]. *Chemical reviews*, 2021, 121(8): 4999-5041.
- [56] AHMED D, SUKHOV A, HAURI D, et al. Bioinspired acousto-magnetic microswarm robots with upstream motility[J]. *Nature machine intelligence*, 2021, 3(2): 116-124.
- [57] ZHU Pin-gan, CHEN Ri-fei, ZHOU Chun-mei, et al. Bio-inspired soft microactuators[J]. *Advanced materials*, 2021, 33(21): 2008558.
- [58] HU Wen-qi, LUM G Z, MASTRANGELI M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion[J]. *Nature*, 2018, 554(7690): 81-85.
- [59] LU Hao-jian, ZHANG Mei, YANG Yuan-yuan, et al. A bioinspired multilegged soft millirobot that functions in

- both dry and wet conditions[J]. *Nature communications*, 2018, 9: 3944.
- [60] LI Chuang, LAU G C, YUAN Hang, et al. Fast and programmable locomotion of hydrogel-metal hybrids under light and magnetic fields[J]. *Science robotics*, 2020, 5(49): 9822.
- [61] GU Hong-ri, BOEHLER Q, CUI Hao-yang, et al. Magnetic cilia carpets with programmable metachronal waves [J]. *Nature communications*, 2020, 11: 2637.
- [62] REN Zi-yu, HU Wen-qi, DONG Xiao-guang, et al. Multi-functional soft-bodied jellyfish-like swimming[J]. *Nature communications*, 2019, 10: 2703.
- [63] ČEJKOVÁ J, BANNO T, HANCZYC M M, et al. Droplets as liquid robots[J]. *Artificial life*, 2017, 23(4): 528-549.
- [64] WU Xue-fei, STREUBEL R, LIU Xu-bo, et al. Ferromagnetic liquid droplets with adjustable magnetic properties[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2021, 118(8): e2017355118.
- [65] FAN Xin-jian, DONG Xiao-guang, KARACAKOL A C, et al. Reconfigurable multifunctional ferrofluid droplet robots[J]. *PNAS*, 2020, 117(45): 27916-27926.
- [66] LI Fang-xia, SHU Jian, ZHANG Le-ran, et al. Liquid metal droplet robot[J]. *Applied materials today*, 2020, 19: 100597.
- [67] FAN Xin-jian, SUN Meng-meng, SUN Li-ning, et al. Ferrofluid droplets as liquid microrobots with multiple deformabilities[J]. *Advanced functional materials*, 2020, 30(24): 2000138.
- [68] LI A, LI H, LI Z, et al. Programmable droplet manipulation by a magnetic-actuated robot[J]. *Science advances*, 2020, 6(7): 5808.
- [69] YANG Zheng-xin, ZHANG Li. Magnetic actuation systems for miniature robots: A review[J]. *Advanced intelligent systems*, 2020, 2(9): 2000082.
- [70] NIU Fu-zhou, MA Wei-cheng, LI Xiang-peng, et al. Modeling and development of a magnetically actuated system for micro-particle manipulation[C]// 14th IEEE international conference on nanotechnology. New York: IEEE, 2014: 127-130.
- [71] NIU Fu-zhou, LI Jun-yang, MA Wei-cheng, et al. Development of an enhanced electromagnetic actuation system with enlarged workspace[J]. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 2017, 22(5): 2265-2276.
- [72] LI Dong-fang, NIU Fu-zhou, LI Jun-yang, et al. Gradient-enhanced electromagnetic actuation system with a new core shape design for microrobot manipulation[J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2020, 67(6): 4700-4710.
- [73] MENG Ke, JIA Yuan-jun, YANG Hao, et al. Motion planning and robust control for the endovascular navigation of a microrobot[J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2020, 16(7): 4557-4566.
- [74] ROGOWSKI L W, ALI J, ZHANG Xiao, et al. Symmetry breaking propulsion of magnetic microspheres in non-linearly viscoelastic fluids[J]. *Nature communications*, 2021, 12: 1116.
- [75] WEINBERG I N, URDANETA M G, STEPANOV P Y, et al. Non-invasive image-guided brain access with gradient propulsion of magnetic nanoparticles[C]//2012 IEEE nuclear science symposium and medical imaging conference record (NSS/MIC). New York: IEEE, 2012: 3732-3734.
- [76] ZHANG Li, ABBOTT J J, DONG Li-xin, et al. Artificial bacterial flagella: Fabrication and magnetic control[J]. *Applied physics letters*, 2009, 94(6): 064107.
- [77] TOTTORI S, NELSON B J. Artificial helical microswimmers with mastigoneme-inspired appendages[J]. *Biomicrofluidics*, 2013, 7(6): 61101.
- [78] HARMATZ I M, TRAVERS M J, TAYLOR R E. A customizable DNA and microsphere-based, magnetically actuated microswimmer[J]. *Journal of microelectromechanical systems*, 2020, 29(5): 990-995.
- [79] YAN Xiao-hui, ZHOU Qi, YU Jiang-fan, et al. Magnetite nanostructured porous hollow helical microswimmers for targeted delivery[J]. *Advanced functional materials*, 2015, 25(33): 5333-5342.
- [80] XIN Chen, YANG Liang, LI Jia-wen, et al. Conical hollow microhelices with superior swimming capabilities for targeted cargo delivery[J]. *Advanced materials*, 2019, 31(25): 1808226.
- [81] SUN H C M, LIAO Pan, WEI Tan-yong, et al. Magnetically powered biodegradable microswimmers[J]. *Micro-machines*, 2020, 11(4): 404.
- [82] LIAO Pan, LI Jun-yang, ZHANG Shi-wu, et al. A fish-like magnetically propelled microswimmer fabricated by 3D laser lithography[C]// 2018 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). New York: IEEE, 2018: 3581-3586.
- [83] MANAMANCHAIYAPORN L, XU Tian-tian, WU Xinyu. Magnetic soft robot with the triangular head-tail morphology inspired by lateral undulation[J]. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 2020, 25(6): 2688-2699.
- [84] JOYEE E B, PAN Ya-yue. A fully three-dimensional printed inchworm-inspired soft robot with magnetic actuation[J]. *Soft robotics*, 2019, 6(3): 333-345.
- [85] LIU J A C, GILLEN J H, MISHRA S R, et al. Photo-thermally and magnetically controlled reconfiguration of polymer composites for soft robotics[J]. *Science advances*, 2019, 5(8): 2897.
- [86] WON S, KIM S, PARK J E, et al. On-demand orbital maneuver of multiple soft robots via hierarchical magnetomotility[J]. *Nature communications*, 2019, 10: 4751.
- [87] KONG Fan-xing, ZHU Yan-he, YANG Chen, et al. Integrated locomotion and deformation of a magnetic soft robot: Modeling, control, and experiments[J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2021, 68(6): 5078-5087.
- [88] KIM Y, PARADA G A, LIU Sheng-duo, et al. Ferromagnetic soft continuum robots[J]. *Science robotics*, 2019, 4(33): 7329.
- [89] CHAUTEMS C, TONAZZINI A, BOEHLER Q, et al. Magnetic continuum device with variable stiffness for

- minimally invasive surgery[J]. *Advanced intelligent systems*, 2020, 2(6): 1900086.
- [90] JEON S, HOSHIAR A K, KIM K, et al. A magnetically controlled soft microrobot steering a guidewire in a three-dimensional phantom vascular network[J]. *Soft robotics*, 2019, 6(1): 54-68.
- [91] GU Hong-ri, BOEHLER Q, AHMED D, et al. Magnetic quadrupole assemblies with arbitrary shapes and magnetizations[J]. *Science robotics*, 2019, 4(35): 8977.
- [92] TANG Jian-pu, YAO Chi, GU Zi, et al. Super-soft and super-elastic DNA robot with magnetically driven navigational locomotion for cell delivery in confined space[J]. *Angewandte chemie international edition*, 2020, 59(6): 2490-2495.
- [93] VENKITESWARAN V K, SAMANIEGO L F P, SIKORSKI J, et al. Bio-inspired terrestrial motion of magnetic soft millirobots[J]. *IEEE robotics and automation letters*, 2019, 4(2): 1753-1759.
- [94] DU Xue-min, CUI Huan-qing, XU Tian-tian, et al. Reconfiguration, camouflage, and color-shifting for bioinspired adaptive hydrogel-based millirobots[J]. *Advanced functional materials*, 2020, 30(10): 1909202.
- [95] LEI Yi, SHENG Zhi-zhi, ZHANG Jian, et al. Building magnetoresponsive composite elastomers for bionic locomotion applications[J]. *Journal of bionic engineering*, 2020, 17(3): 405-420.
- [96] KIM Y, YUK H, ZHAO Rui-ke, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials[J]. *Nature*, 2018, 558(7709): 274-279.
- [97] XU Tian-qi, ZHANG Jia-chen, SALEHIZADEH M, et al. Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions[J]. *Science robotics*, 2019, 4(29): 4494.
- [98] MA Chun-ping, WU Shuai, ZE Qi-ji, et al. Magnetic multimaterial printing for multimodal shape transformation with tunable properties and shiftable mechanical behaviors[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2021, 13(11): 12639-12648.
- [99] ALAPAN Y, KARACAKOL A C, GUZELHAN S N, et al. Reprogrammable shape morphing of magnetic soft machines[J]. *Science advances*, 2020, 6(38): 6414.
- [100] SONG H, LEE Ha-jun, LEE J, et al. Reprogrammable ferromagnetic domains for reconfigurable soft magnetic actuators[J]. *Nano letters*, 2020, 20(7): 5185-5192.
- [101] YANG Xiong, SHANG Wan-feng, LU Hao-jian, et al. An agglutinate magnetic spray transforms inanimate objects into millirobots for biomedical applications[J]. *Science robotics*, 2020, 5(48): 8191.
- [102] ZHANG Yuan-xi, WANG Qing-yuan, YI Sheng-zhu, et al. 4D printing of magnetoactive soft materials for on-demand magnetic actuation transformation[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2021, 13(3): 4174-4184.
- [103] GAO Jian, RONG Wei-bin, ZHANG Ye, et al. Semi-automated 3D printing system for magnetic-driven micro-robots[C]// 2020 IEEE eurasia conference on IOT, communication and engineering (ECICE). New York: IEEE, 2020: 407-409.
- [104] XU Tian-tian, YU Jiang-fan, YAN Xiao-hui, et al. Magnetic actuation based motion control for microrobots: An overview[J]. *Micromachines*, 2015, 6(9): 1346-1364.
- [105] MIHAI L A, GORIELY A. How to characterize a nonlinear elastic material? A review on nonlinear constitutive parameters in isotropic finite elasticity[J]. *Proceedings of the royal society A: Mathematical, physical and engineering sciences*, 2017, 473(2207): 20170607.
- [106] ALI A, HOSSEINI M, SAHARI B B. A review and comparison on some rubber elasticity models[J]. *Journal of scientific & industrial research*, 2010, 69(7): 495-500.
- [107] ZHANG J, DILLER E. Untethered miniature soft robots: Modeling and design of a millimeter-scale swimming magnetic sheet[J]. *Soft robotics*, 2018, 5(6): 761-776.
- [108] XIANG Hong-biao, LI Meng-wei, ZHANG Ti-lei, et al. Swimming characteristics of soft robot with magnetoelastic material[C]// 2019 IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO). New York: IEEE, 2019: 636-641.
- [109] WANG Ben, CHAN K F, YUAN Ke, et al. Endoscopy-assisted magnetic navigation of biohybrid soft micro-robots with rapid endoluminal delivery and imaging[J]. *Science robotics*, 2021, 6(52): 2813.
- [110] XU Tian-tian, GUAN Yan-ming, LIU Jia, et al. Image-based visual servoing of helical microswimmers for planar path following[J]. *IEEE transactions on automation science and engineering*, 2020, 17(1): 325-333.
- [111] HUANG H W, USLU F E, KATSAMBA P, et al. Adaptive locomotion of artificial microswimmers[J]. *Science advances*, 2019, 5(1): 1532.
- [112] CULHA U, DEMIR S O, TRIMPE S, et al. Learning of sub-optimal gait controllers for magnetic walking soft millirobots[J]. *Robotics science and systems: Online proceedings*, 2020, 2020: 70.
- [113] BARDUCCI L, PITTIGLIO G, NORTON J C, et al. Adaptive dynamic control for magnetically actuated medical robots[J]. *IEEE robotics and automation letters*, 2019, 4(4): 3633-3640.
- [114] SON H, BYUN E, YOON Y J, et al. Untethered actuation of hybrid hydrogel gripper via ultrasound[J]. *ACS macro letters*, 2020, 9(12): 1766-1772.
- [115] LI Hao, GO G, KO S Y, et al. Magnetic actuated pH-responsive hydrogel-based soft micro-robot for targeted drug delivery[J]. *Smart materials and structures*, 2016, 25(2): 027001.
- [116] LEE H, CHOI H, LEE M, et al. Preliminary study on alginate/NIPAM hydrogel-based soft microrobot for controlled drug delivery using electromagnetic actuation and near-infrared stimulus[J]. *Biomedical microdevices*, 2018, 20(4): 103.
- [117] JEONG J, JANG D, KIM D, et al. Acoustic bubble-based drug manipulation: Carrying, releasing and penetrating for targeted drug delivery using an electromagnetically actuated microrobot[J]. *Sensors and actuators A: Physical*, 2020, 306: 111973.