磁性微纳米尺度游动机器人: 现状与应用前景

金东东¹, 俞江帆¹, 黄天云², 段慧玲^{2*}, 张立^{1,3*}

1. 香港中文大学机械与自动化工程学系, 香港 999077;

2. 北京大学工学院, 力学与工程学系, 工程科学与新技术高精尖中心, 湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京 100871;

3. 香港中文大学深圳研究院, 深圳 518000

* 联系人, E-mail: hlduan@pku.edu.cn, lizhang@mae.cuhk.edu.hk

2016-08-02 收稿, 2016-09-08 修回, 2016-09-12 接受, 2016-10-25 网络版发表

国家自然科学基金(61305124)、深圳市政府基础研究基金(JCYJ20140905151415999)、香港研究资助局ECS(439113)和GRF(417812, 417213, 14209514, 14203715)资助

摘要 微纳米机器人在生物医学、环境检测和处理等多个领域具有非常重要的潜在应用, 而磁场作为一种可以驱动并控制微纳米机器人的无线操控手段, 具有获取简单、调试方便、能够无损穿透生物组织等特点, 因此关于如何将磁场应用在微纳米机器人领域的课题一直受到国内外研究者的广泛关注. 本文对目前磁场在微纳米机器人中的应用进行了简单的分类与归纳, 介绍了相关机理, 阐述了磁场在微纳米机器人领域的重要地位, 旨在为今后的相关研究提供参考.

关键词 磁场驱动, 微纳米机器人, 游动微型机器人, 微型机械

微纳米机器人指的是尺度在微纳米级别(几纳米至几百微米)的小型机器人, 在生物医学、环境处理等领域有非常重要的潜在应用, 如可用于微创外科手术、靶向治疗、细胞操作、重金属检测、污染物降解等^[1~5], 因此受到国内外研究者的广泛关注. 相比于传统的大型机器人, 微纳米机器人的研究与开发面临着新的挑战.

我们知道, 当物体尺寸降到微纳米级别时, 在流体中运动的微纳米机器人处于低雷诺数环境. 雷诺数(Reynolds number, Re)是一种用于表征流体流动情况的无量纲数, 而物体在流体中运动时的雷诺数可由式(1)计算,

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}, \quad (1)$$

式中, ρ 和 μ 分别指流体的密度与黏性系数, v 和 L 分别指物体的运动速度和特征长度, 雷诺数 Re 可看作物

体在流体中运动时惯性力和黏滞力的比值. 航空飞机在空中飞行时的雷诺数约在 10^7 数量级, 人在水中游泳时的雷诺数约在 10^4 数量级, 而细菌在流体中运动时的雷诺数则约在 10^{-4} 数量级. 由于微纳米机器人微小的尺寸, 其运动时一般处在 10^{-5} ~ 10^{-2} 数量级的低雷诺数环境下. 在这种低雷诺数的环境中, 物体可看作在一个非常黏滞、微小以及缓慢的环境中运动, 黏滞力占主导作用, 惯性力则可忽略不计. 与大型机器人能够靠惯性运动不同, 若想驱动微纳米机器人, 必须源源不断地为其提供动力. 但由于其微小的尺寸, 动力源如电池、发动机等很难装载在微纳米机器人上, 因此如何驱动微纳米机器人一直是研究者关注的重点. 另外, 由于微尺度下的惯性作用可被忽略, 能够驱动宏观物体的往复式对称运动无法有效驱动微纳米机器人. 1977年, Purcell^[6]提出“扇贝理论(scallop theorem)”, 即如果想在低雷诺数环境中产生

引用格式: 金东东, 俞江帆, 黄天云, 等. 磁性微纳米尺度游动机器人: 现状与应用前景. 科学通报, 2017, 62: 136–151

Jin D D, Yu J F, Huang T Y, et al. Magnetic micro-/nanoscale swimmers: Current status and potential applications (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 136–151, doi: 10.1360/N972016-00854

有效位移,只有非倒易的运动(non-reciprocal motion)才能实现.以图1为例,图1(a)中的运动模式才能在低雷诺数环境下发生有效位移,而图1(b)中的运动模式在完成1个循环后,物体仍然在起始位置^[6,7].虽然2014年Qiu等人^[8]提出并验证了一种在特定条件下能够在低雷诺数环境中发生有效位移的往复式运动,但是在微纳米机器人领域,“扇贝理论”仍然具有十分重要的地位,因此若想驱动微纳米机器,设计(结构或成分)十分重要,必须打破运动时的对称性.

尽管面临着许多挑战,近年来微纳米机器人的发展仍然十分迅速.目前已存在的微纳米机器人按照驱动机理,可分为自驱动(自动)和外场驱动(非自动)2种类型.自驱动微纳米机器人是指微纳米机器人自身能够从所处流体环境中获得动力,从而产生运动,按照获得动力的方式不同,可分为自电泳驱动、自扩散泳驱动、自热泳驱动、气泡驱动等方式.而外场驱动微纳米机器人指的是只有在施加外场的作用下才能发生运动的一类微纳米机器人.它们并不能从周围环境中获得动力,因此当没有施加外场时,这类微纳米机器人不会产生运动(不包括布朗运动).根据外场的性质,外场驱动的方式可分为磁场驱动、声场驱动、光驱动等^[9].其中可用于驱动磁性微纳米机器人的低强度、低频率磁场能够穿透生物组织且对生物体无害,对微纳米机器人的生物学应用有着非常重要的意义,是一种非常有效和有前景的手段^[10,11].不同类型的磁场可以通过永磁铁和电磁线圈的设计得到,特别是对于电磁铁来说,通过实时调控电磁线圈电流的强度、频率、相位及开关方式等,可以对磁性微纳米机器人施加可控的磁力或磁力矩,从而为驱动微纳米机器人提供动力和多自由度运动

图1 Purcell提出的双铰链游动机理.(a)在低雷诺数环境下,运动循环为非倒易运动,在完成1个循环后能产生有效位移;(b)运动循环为倒易运动(reciprocal motion),在完成1个循环后物体仍在起始位置^[7]. Copyright © 2010 Royal Society of Chemistry

Figure 1 The double-hinged theoretical swimmer at low Reynolds number proposed by Purcell. (a) The non-reciprocal motion of swimmer creates a net displacement after a periodic cycle. (b) The reciprocal motion of swimmer only induces a back and forth motion after a cycle^[7]. Copyright © 2010 Royal Society of Chemistry

控制.

只要赋予微纳米机器人磁性,磁场就能用于驱动和控制它们的运动.磁场在微纳米机器人中的应用可分为两大类:(1)磁场驱动的微纳米机器人.磁场不仅为微纳米机器人提供能量,还用于控制它们的定向运动;(2)磁导向的微纳米机器人.将磁场与其他驱动方式相结合,其中磁场仅用于控制微纳米机器人的运动方向.本文将对磁场在微纳米机器人中的应用进行简单的归纳,阐述磁场在微纳米机器人领域的重要地位,旨在为今后的相关研究提供参考.

1 磁场驱动的微纳米机器人

磁性微纳米机器人之所以能被磁场驱动,是因为受到磁场梯度(gradient)或磁场扭矩(torque)的作用.磁性物体在磁场中受到的磁力和磁力矩可以由式(2)、(3)计算

$$F(P) = (m \cdot \nabla) B(P), \quad (2)$$

$$T(P) = m \times B(P), \quad (3)$$

式中, $F(P)$ 和 $T(P)$ 分别指磁性物体在磁场中P点处受到的磁场梯度力和磁场扭矩, $B(P)$ 指在该点处的磁感应强度(magnetic flux density), m 指磁性物体在该点处的磁偶极矩(magnetic dipole moment).

由上式可知,在均匀磁场中,磁性物体受到的磁力为0.如果磁性物体的磁偶极矩方向与均匀磁场的方向相同,那么磁扭矩也为0.只有当磁偶极矩的方向与外加磁场的方向不共线时,磁性物体才会受到磁力矩的作用,向外加磁场方向偏转.当磁偶极矩的方向与外加磁场的方向共线时,它便会停止运动.因此,均匀磁场不能用于驱动微纳米机器人,若想驱使其持续运动,至少应该使磁场在时间或空间上存在变化.图2展示了几种目前用于驱动微纳米机器人的磁场,包括绕中轴旋转的均匀磁场(图2(a),(b)),在一定角度内来回振荡的均匀磁场(图2(c)),间歇性产生磁感应强度的脉冲磁场(图2(d)),以及在某一方向存在磁感应强度梯度的磁场(图2(e),(f))^[12].其中梯度磁场属于随空间变化的磁场,磁性物体在其中受到磁场力的作用,任意设计的微纳米机器人都可被驱动.而旋转磁场、振荡磁场和脉冲磁场属于随时间变化的磁场,磁性物体在其中受到磁力矩的作用,由于低雷诺数环境下惯性作用可以忽略不计,受这类磁场驱动的微纳米机器人往往需要特殊的设计.

图2 目前已用于驱动微纳米机器人的磁场。(a) 平面旋转磁场；(b) 锥形旋转磁场；(c) 振荡磁场；(d) 脉冲磁场；(e) 沿磁场方向的梯度磁场；(f) 垂直磁场方向的梯度磁场^[12]。Copyright © 2013 Royal Society of Chemistry

Figure 2 Magnetic fields that were used to actuate micro/nanoscale swimmers. (a) Magnetic field with a field vector rotating in a plane. (b) Magnetic field with a field vector rotating along the mantle of a cone. (c) Magnetic field with a field vector oscillating up and down in a plane. (d) On-off magnetic field. (e) Magnetic field with field gradient along the direction of the field. (f) Magnetic field with field gradient perpendicular to the direction of the field^[12]. Copyright © 2013 Royal Society of Chemistry

由于所处的低雷诺数环境相近，自然界中的微生物为磁场驱动微纳米机器人的设计提供了灵感。在低雷诺数环境中，微生物有着各种各样有趣的运动方式，它们大多通过身体上纤毛或鞭毛的周期性运动而推动自身游动。例如草履虫的全身长满纵行排列的纤毛，当它游动时，纤毛会协调统一地周期性摆动，像船桨一样推进身体向前运动，如图3(a)所示。还有一些真核生物的身体一端长有1根或多根鞭毛，通过像来回抽打鞭子一样产生波浪，从而推动自身向前运动，如图3(b)所示。另外，长有鞭毛的细菌(原核生物)如大肠杆菌，也能通过控制鞭毛产生运动。但与真核生物不同，细菌的鞭毛是通过连接在身体基部的分子马达的带动，产生螺旋式旋转，从而推动细菌的运动，如图3(c)所示。

通过仿照微生物的运动模式，不同类型的磁场驱动微纳米机器人被制备出来，例如旋转磁场驱动的螺旋推动式机器人和振荡磁场驱动式微纳米机器人。此外，研究者还设计了其他类型的微纳米机器人，如梯度磁场驱动式微纳米机器人和表面滚动式微纳米机器人，下文将会介绍这几种微纳米机器人。

1.1 螺旋推动式微纳米机器人

受到大肠杆菌等通过旋转鞭毛产生定向运动的细菌的启示，研究者目前已开发了许多螺旋推动式微纳米机器人。这类机器人包含螺旋型结构和磁性

图3 微生物在低雷诺数环境下不同的运动方式。(a) 草履虫通过协调统一地周期性摆动全身纤毛产生运动；(b) 一些真核生物通过来回抽打鞭毛产生运动；(c) 一些原核生物通过旋转鞭毛产生运动^[13]。Copyright © 2009 SAGE Publishing

Figure 3 Locomotion of microorganisms at low Reynolds number. (a) Paramecium moves by swinging cilia in a coordinated and periodical manner. (b) Eucaryote moves by swinging flagella. (c) Prokaryote moves by rotating flagella^[13]. Copyright © 2009 SAGE Publishing

材料2种基本成分。图4(a)是一种由磁性头部和螺旋尾部组成的螺旋推动式机器人的示意图，其他类型的磁性螺旋推动式机器人也已开发出来，例如在螺旋尾部表面沉积一层磁性薄膜，直接采用磁性材料做螺旋型机器人等。各种螺旋推动式微纳米机器人的机理基本一致，下文将会介绍它们的驱动机理，并简单总结几种近年来制备螺旋推动式微纳米机器人的方法。

如果螺旋推动式机器人是非永磁性的，当施加1个磁场方向垂直于螺旋中轴的均匀磁场在螺旋推动

图4 (网络版彩色)旋转磁场驱动螺旋形机器人的机理

Figure 4 (Color online) The actuation mechanism of helical micro-nanoscale swimmer using a rotating magnetic field

式微纳米机器人上时,机器人会根据外加磁场和自身形状各向异性被磁化而最终产生与外加磁场方向相同的磁偶极矩 m ,此时从左上方方向观察螺旋推动式机器人的情况如图4(b)所示.接着将外加均匀磁场的方向绕螺旋中轴旋转一定角度后,被磁化的螺旋推动式机器人由于磁偶极矩与外加磁场方向不一致,就会受到1个使其向新磁场方向偏转的磁力矩 T 的作用,如图4(c)所示.在磁力矩的作用下,螺旋推动式机器人绕着螺旋长轴发生转动,使其磁偶极矩的方向与外加磁场的方向再一次统一,机器人达到受力平衡状态(不考虑重力)而停止转动,如图4(d)所示.因此,如果施加1个如图2(a), (b)所示并且绕螺旋中轴不断旋转的均匀磁场,螺旋推动式机器人就会随着磁场绕着中轴不断转动,从而产生沿着中轴的定向运动.如果螺旋推动式机器人是永磁性的,那么只要保证其磁化方向不与螺旋中轴共线,在旋转磁场的作用下,也会像大肠杆菌一样推动自身运动.

1996年,日本东北大学Honda等人^[14]首先提出低雷诺数环境下运动的螺旋推动式机器人,它以1个1 mm×1 mm×1 mm的SmCo₅方形永磁铁作为磁性头部,以直径为0.15 mm、长度为21.7 mm的铜线绕成螺旋(直径1 mm)作为尾部,其中永磁铁的磁化方向垂直于螺旋的长轴,如图5(a)所示,此时的螺旋推动式机器人并不是微纳米尺度的.为了模拟低雷诺数环境,这个机器人被置于黏稠的硅油中,此时相比于惯性力,流体的黏滞力占主导作用.当施加1个旋转均匀磁场时,Honda等人^[14]成功地使螺旋型机器人在低雷诺数环境下发生定向运动,并可以通过调节磁场的旋转频率和尾部的螺旋几何参数来调节运动速率.2005年,日本东北大学Kikuchi等人^[23]制备了1个包含有SmCo₅永磁铁头部、铜管和钨线绕制尾部的螺旋推进式机器人.实验结果表明,该机器人总长只有5.55 mm,但可以在旋转均匀磁场的作用下,拖曳1根70 mm的长线在充满硅油的渠道中自由运动,这为螺旋推动式微纳米机器人在医学领域中的应用提供了可能,例如在血管中牵引医用导管.

2007年,瑞士苏黎世联邦理工学院Nelson课题组^[15,24]首次制备了与细菌大小相似的微米尺度螺旋推动式机器人,之后命名为人造细菌鞭毛(artificial bacterial flagella, ABF),如图5(b)所示. ABF是基于自卷曲技术制备的,首先在GaAs(001)基底上使用分子束外延依次生长了AlGaAs和InGaAs/GaAs薄膜,然

后用电子束蒸镀法沉积了一层Cr薄膜;接着分2次使用光刻胶作为掩膜版,蚀刻了部分的Cr和InGaAs/GaAs薄膜并部分沉积了Cr/Ni/Au薄膜;最后在使用2%氢氟酸选择性蚀刻掉AlGaAs薄膜后,由于内应力的存在,InGaAs/GaAs层会沿着<100>晶向发生自卷曲,从而形成了1个以Cr/Ni/Au为磁性头部,以Cr和InGaAs/GaAs为尾部的螺旋形机器人.在旋转均匀磁场的作用下,ABF可以在液体石蜡和去离子水中产生定向运动,速率可达3.9和4.6 μm/s.此外,实验结果发现,通过改变磁场可以精确控制ABF的运动方向,使其前进、转弯或者后退,并可用于推动直径6 μm的小球以3 μm/s的速率前进.2016年,Nelson课题组与洛桑联邦理工学院Sakar课题组^[16]合作提出了一种利用自卷曲技术制备的水凝胶基螺旋推进式机器人(图5(b)).这种机器人由2层具有不同性质的水凝胶组装而成,一层对温度敏感,会随着温度的变化而发生收缩和膨胀,另一层则对温度不敏感.组装的同时,磁性纳米粒子在外加磁场的作用下按照指定的排列方向掺入成型的水凝胶中.当用近红外光线照射成型的水凝胶时,磁性纳米粒子会吸收红外线而发热,组装好的水凝胶就会因为内应力的作用而发生卷曲.值得注意的是,磁性纳米粒子不仅能用于感应磁场,它的排列方向还能够决定水凝胶的卷曲方向.该方法制备的水凝胶基机器人可以通过改变磁性纳米粒子的排列方向得到不同外形,且质地柔软,使它们可以移动到任何需要的地方,在生物医学领域具有极大的应用价值.

2009年,Ghosh和Fischer^[17]制备了纳米尺度的螺旋推进式机器人,如图5(c)所示.该机器人螺旋长度为1~2 μm,直径则仅为200~300 nm,由GLAD制备,是当时最小的微纳米机器人之一.首先将直径在200~300 nm的SiO₂球单层分散在Si基底上,然后将其置于电子束蒸镀装置中沉积SiO₂.在沉积过程中,使SiO₂蒸汽流与Si基底保持一个恒定的角度,并让Si基底以一定速率绕中轴旋转,这样便可在SiO₂球上生长出螺旋形尾巴.之后再用热蒸镀技术沉积一层Co薄膜,可以赋予这些螺旋型机器人磁性.无磁场作用下,这类纳米尺度的机器人在去离子水中表现出了明显的布朗运动,然而一旦施加一个旋转均匀磁场,它们便会在外加磁场的操控下实现精确的定向运动.通过调节磁场的强度和旋转频率,直径200 nm,长2 μm的螺旋形机器人可在水中以40 μm/s的速率运动.

图 5 (网络版彩色)不同方式制备的螺旋推动式微纳机器人及其磁驱动性能。(a) 以SmCo₅ 方形永磁铁作为磁性头部, 用铜线绕制的厘米级螺旋形机器人^[14]。Copyright © 1996 IEEE。(b) 自卷曲技术制备的人造细菌鞭毛^[15,16]。Ref. [15], Copyright © 2009 AIP Publishing。Ref. [16], Copyright © 2016 Nature Publishing Group。(c) 掠射角沉积技术(glancing angle deposition, GLAD)制备的微纳螺旋形机器人^[17]。Copyright © 2009 American Chemical Society。(d) 三维激光直写技术制备的微纳螺旋形机器人^[18-20]。Ref. [18], Copyright © 2012 Wiley。Ref. [19], Copyright © 2015 American Chemical Society。Ref. [20], Copyright © 2015 Wiley。(e) 以阳极氧化铝为模板电沉积制备的微纳螺旋形机器人^[21]。Copyright © 2014 Royal Society of Chemistry。(f) 以植物叶子中螺旋形导管为模板制备的微纳螺旋形机器人^[22]。Copyright © 2013 American Chemical Society

Figure 5 (Color online) Helical swimmers fabricated by different methods and their swimming performance. (a) Centimeter-scale helical swimmers consisting of a cubic SmCo₅ magnet as magnetic head and a spiral copper wire as helical tail^[14]。Copyright © 1996 IEEE。(b) Helical microswimmers fabricated by photolithography and self-scrolling technique^[15,16]。Ref. [15], Copyright © 2009 AIP Publishing。Ref. [16], Copyright © 2016 Nature Publishing Group。(c) Helical nanoswimmers fabricated by GLAD^[17]。Copyright © 2009 American Chemical Society。(d) Helical microswimmers fabricated by 3-dimensional direct laser writing and their potential application in assisted fertilization^[18-20]。Ref. [18], Copyright © 2012 Wiley。Ref. [19], Copyright © 2015 American Chemical Society。Ref. [20], Copyright © 2015 Wiley。(e) Helical microswimmers fabricated by anodic aluminum oxide template assisted electrochemical deposition^[21]。Copyright © 2014 Royal Society of Chemistry。(f) Bioinspired helical microswimmers based on vascular plants^[22]。Copyright © 2013 American Chemical Society

2012年, Nelson课题组^[18]又提出了以三维激光直写技术(3D direct laser writing, DLW)制备螺旋推进式机器人, 如图5(d)所示。制备过程中, 利用负性光刻胶(如IP-L和SU-8系列光刻胶)在飞秒激光的作用下会发生固化的现象, 通过精确控制激光聚焦点的移动, “写”出一个个螺旋形结构。随后通过电子束蒸镀技术依次沉积Ni和Ti薄膜, 可以赋予这些螺旋型机器人磁性和较好的生物相容性。在外加旋转均匀磁场的作用下, 这类螺旋推进式机器人在水中可达180 μm/s的运动速率。实验还发现, 当将小鼠肌肉细胞

C2C12与这类机器人一起培养时, 细胞可以在螺旋结构上黏附并生长, 说明制备的螺旋形机器人对小鼠细胞短期没有生物毒性, 为其在生物医学领域中的应用提供了可能。例如2015年, 德国莱布尼茨固体材料研究所Schmidt课题组^[19]利用该方法制备螺旋推进式机器人后, 将其用于促进精子运动, 辅助其与卵子的受精过程。此外, 由于DLW的高度自由性, 使用合适的光刻胶可以“写”出任意结构的螺旋推进式机器人并结合一些功能性附件, 如固定抓手、针管状结构、螺杆泵结构等^[20,25,26], 大大拓宽了螺旋推进式微

纳米机器人的应用范围。

2011年,韩国成均馆大学Park课题组^[27]以阳极氧化铝(anodic aluminum oxide, AAO)为模板,成功电沉积制备出Pd纳米弹簧。之后,美国加州大学圣地亚哥分校Wang课题组^[21]在2014年以此技术制备了螺旋推进式微纳米机器人。他们以AAO为模板,使Pd和Cu同时沉积进AAO的纳米孔道中。在AAO孔壁处双电层分布、Pd和Cu的活泼性差异以及螺旋位错等因素的共同作用下,沉积制备的Pd和Cu并不以合金纳米线的形式存在,而是以图5(e)所示的形态存在。此时,Pd以螺旋的形式缠绕并嵌在Cu纳米线上,因此当刻蚀除去Cu后,便可得到Pd螺旋形机器人。再以电子束蒸镀技术沉积一层Ni薄膜,便可赋予其磁性,使之在旋转均匀磁场下发生定向运动。此外,Wang课题组^[22]在2013年还以植物叶子中的螺旋形导管为模板,经过电子束蒸镀技术沉积Ti/Ni薄膜并切割后,制备得到了大量直径和长度在几十微米的螺旋推进式机器人。2015年,本课题组^[28]以自然界中广泛存在的螺旋藻为模板,采用浸渍-热还原处理技术,制备了一种由 Fe_3O_4 纳米颗粒组成的空心多孔螺旋形机器人,它的直径和长度可通过改变螺旋藻的培养条件来调节。由于其特殊的成分和形貌,这种螺旋型机器人不仅能在外加旋转均匀磁场下精确控制运动,还具有良好的生物相容性和较大的比表面积,并能通过超声波使其粉碎,因此在靶向送药领域具有非常广泛的潜在应用。

1.2 振荡磁场驱动式柔性微纳米机器人

除了螺旋推动式机器人,研究者还仿造微生物制备了振荡磁场驱动的柔性微纳米机器人,如图6所示。这类机器人包含磁性头部和柔性尾部2个基本组成部分。当外加均匀磁场的方向在一定角度内来回振荡时,磁性头部会在磁力矩的作用下来回摆动,使尾部像划动船桨一样推动流体产生波浪来驱动自己。值得注意的是,在该微纳米机器人中,合理的尾部设计十分重要。当尾部太短且柔性不足时,来回摆动磁性头部相当于对称性往复运动,在低雷诺数环境中无法产生有效位移。而当柔性尾部太长时,机器人就会因为在流体中受到太大的阻力而使运动效率变低^[1]。

2005年,日本香川大学Guo等人^[29]制备了一种振荡磁场驱动式机器人。该机器人是由1个磁性头部和1条长20 mm,宽10~15 mm,高1~3 mm的柔性尾部

图6 (网络版彩色)振荡磁场驱动柔性微纳米机器人的机理

Figure 6 (Color online) The navigation principle of flexible micro-/nanoscale swimmer actuated by an oscillating magnetic field

组装,如图7(a)所示。其中,磁性头部包含1个底面半径12 mm,高4 mm的圆柱形NdFeB永磁铁,磁化方向沿着柔性尾部的高度方向。结果表明,在振荡磁场的作用下,该机器人在水中能够产生定向运动,运动速率与柔性尾部的参数和磁场频率有关。但是,该机器人在尺度与运动环境上均与微纳米机器人不同。2006年,日本秋田县立大学Sudo等人^[32]制备了类似的机器人,它是由1个空心圆柱永磁铁和1条高分子柔性尾部组成,其中永磁铁的磁化方向沿着柔性尾部的高度方向。虽然该机器人也是毫米尺度的,但为了模拟微型机器人在人体血管中的运动状态,他们将其置于甘油中,研究振荡磁场的驱动作用。结果表明,即使在黏稠的甘油中,该机器人也能产生明显的定向运动,且通过调节尾部参数、磁场频率和振幅,其运动速率甚至能达到10 mm/s以上。如果能够将该机器人的尺寸缩减到足够小,它就有可能应用在动脉、静脉甚至毛细血管中。

2005年,法国巴黎市立高等工业物理化学学院Bibette课题组^[30]制备了一种振荡磁场驱动的微纳米机器人,由一系列通过DNA连接的超顺磁性小球组成。制备过程中,首先在直径为1 μm 的超顺磁性小球表面枝接上链霉亲和素,再将其与生物素化的双链DNA和红细胞混合并在均匀磁场下静置一段时间,通过生物素-链霉亲和素的相互作用,最后得到了一种以红细胞为头部、以DNA连接的超顺磁性小球为柔性尾部,直径1 μm ,长24 μm 的链状微型机器人。在振荡磁场中,链状微型机器人尾部上的磁性小球与外界磁场和其他磁性小球之间均会有磁力矩产生,而柔性尾部会在这些磁力矩的综合作用下随磁场振荡,产生非倒易的运动,从而推动机器人运动,如图7(b)所示。该机器人的运动状态与尾部参数和磁场参数均有关系,后续有其他研究者对其进行了详尽

图7 (网络版彩色)不同振荡磁场驱动式柔性机器人. (a) 以永磁铁为头部的厘米级柔性机器人^[29]. Copyright © 2005 IEEE. (b) 以红细胞为头部, 通过DNA连接的超顺磁性小球为尾部的微纳米柔性机器人^[30]. Copyright © 2005 Nature Publishing Group. (c) 磁性人工精子机器人^[31]. Copyright © 2014 AIP Publishing

Figure 7 (Color online) Different flexible swimmers actuated by oscillating magnetic fields and their swimming performance. (a) Centimeter-scale swimmer consisting of a NdFeB magnet as magnetic head and a thin film as flexible tail^[29]. Copyright © 2005 IEEE. (b) Flexible microscopic artificial swimmer, in which, double-stranded DNA with biotin at each end can bind the superparamagnetic particles coated with streptavidin together via the specific biotin-streptavidin interaction as a flexible tail^[30]. Copyright © 2005 Nature Publishing Group. (c) Magnetosperm that navigates using weak oscillating magnetic field^[31]. Copyright © 2014 AIP Publishing

的理论分析^[33].

值得一提的是, 人类精子是一种典型的通过来回抽打鞭毛而驱动自己的“微生物”, 英国格拉斯哥大学Gillies等人^[34]曾对其运动行为进行了详细的研究. 2014年, Khalil等人^[31]制备了一种具有磁性的人工精子机器人, 由1个磁性椭圆球体头部和1条柔性尾部组成, 如图7(c)所示. 制备过程中, 首先通过光刻技术制备1个具备精子外型的图案, 然后以光刻胶为掩膜版, 在其头部沉积1层磁性的CoNi合金, 最后将其取下即可得到1个长约322 μm , 宽约42 μm 的人工精子机器人. 即使在强度较低(约5 mT)的振荡磁场下, 该机器人也能在磁力矩的作用下来回抽打鞭毛, 从而产生运动, 甚至在一定振荡频率下能达到 $158 \pm 32 \mu\text{m/s}$ 的运动速率.

1.3 其他类型的磁场驱动微纳米机器人

除了以上两类仿生微纳米机器人, 研究者还设计了其他类型的磁场驱动微纳米机器人, 如梯度磁场驱动式微纳米机器人和界面滚动式微纳米机器人等.

与以上介绍的利用磁力矩产生运动的微纳米机器人不同, 梯度磁场驱动式微纳米机器人是一种利

用磁力发生运动的机器人. 在具有梯度的磁场中, 具备磁性的物体会受到磁力的牵引, 向磁场强度更大的地方移动. 利用这一物理现象, 任意形状磁性物体均可被梯度磁场驱动^[35~38], 部分如图8(a), (b)所示. 例如, 2013年美国宾夕法尼亚大学Steager等人^[35]制备了磁性“凹”形机器人并利用梯度磁场使其产生运动(图8(a)). 他们先将磁性纳米颗粒与光刻胶均匀混合, 再利用光刻技术加工出1个“凹”形图案, 最后剥离下图案就可以得到1个具有磁性的“凹”形机器人. 该机器人可以在梯度磁场的控制下捕获并运输1 μm 小球到指定位置, 在靶向送药领域具有潜在应用.

表面滚动式微纳米机器人是一种在磁场下利用自身和相邻物体表面间的相互作用而在表面上滚动前行的机器人, 主要由旋转磁场或脉冲磁场驱动. 例如, 2011年美国犹他大学Mahoney等人^[39]展示了一种非常简单的表面滚动式机器人. 在放有磁性小球的表面附近, 他们将1个沿底面直径磁化的圆柱形NdFeB磁铁装载在1个马达上. 调整好马达的位置并使马达按一定频率旋转时, 磁性小球便可在表面上不断滚动前行, 如图8(c)所示. 另外还有球链状、纳米线形及其他形状的表面滚动式微纳米机器人^[40~47],

图8 (网络版彩色)其他类型的磁场驱动微纳米机器人。(a) 梯度磁场驱动的磁性“凹”形机器人^[35]。Copyright © 2013 SAGE Publications。(b) 梯度磁场驱动的磁性机器人^[38]。Copyright © 2014 Nature Publishing Group。(c) 球形表面滚动式微纳米机器人^[39]。Copyright © 2011 AIP Publishing。(d), (e) 球链形表面滚动式微纳米机器人^[40,41]。Ref. [40], Copyright © 2008 American Physical Society。Ref. [41], Copyright © 2010 National Academy of Sciences。(f) Ni纳米线表面滚动式微纳米机器人^[42]。Copyright © 2010 American Chemical Society

Figure 8 (Color online) Other kinds of micro-/nanoscale swimmers actuated by magnetic field and their swimming performance. (a) U-shaped microrobot actuated by magnetic field gradient^[35]。Copyright © 2013 SAGE Publications。(b) Microrobots with various patterns coded by magnetic field^[38]。Copyright © 2014 Nature Publishing Group。(c) Magnetic device pushed along a surface by a rotating dipole field^[39]。Copyright © 2011 AIP Publishing。(d) Paramagnetic doublet floating above a glass plate actuated by magnetic field^[40]。Copyright © 2008 American Physical Society。(e) A chain of superparamagnetic beads that moves along a surface according to the applied magnetic field^[41]。Copyright © 2010 National Academy of Sciences。(f) Nickel nanowire propelled near a patterned solid surface by rotating magnetic field^[42]。Copyright © 2010 American Chemical Society

如图8(d)~(f)所示, 此处不再一一介绍。

2 磁导向微纳米机器人

由于磁场易于调节、能够穿透生物组织且无害, 因此除了单纯将其应用于驱动微纳米机器人外, 研究者还通过赋予使用其他方式驱动的微纳米机器人磁性, 利用磁场精确控制它们的运动方向。在这类微纳米机器人中, 应用最为广泛的就是磁导向化学驱动式微纳米机器人和磁导向趋磁细菌。

2.1 磁导向化学驱动式微纳米机器人

化学驱动式微纳米机器人是一类将化学能转化

为动能的自驱动机器人。通过合理的结构和成分设计, 这类机器人可以在所处环境中发生化学反应并产生自电泳、自扩散泳、单方向喷射气泡等现象, 从而推动自身发生定向运动。但是此时它们的运动方向无法通过外界手段控制, 因此研究者想要通过赋予它们磁性并结合磁场达到精确控制运动的目的。

2.1.1 磁导向自电泳驱动式微纳米机器人

2004年, 美国宾夕法尼亚州立大学Sen, Mallouk和Crespi课题组^[48]合作提出了一种能在 H_2O_2 溶液中自动产生非布朗运动的纳米棒状微纳米机器人。这种机器人通过电沉积制备得到, 以AAO为模板, 使Au和Pt按顺序依次沉积进AAO的纳米孔道中。在一

定条件下完成电沉积后, 溶解去除AAO模板, 可得到直径约370 nm, Au和Pt段各长1 μm 的双节纳米棒, 如图9(a)所示. 实验发现, 将该纳米棒置于含有 H_2O_2 的水中时, Pt端能够催化 H_2O_2 发生反应并驱动纳米棒朝Pt端的方向发生运动. 后续研究表明, 这种自驱动现象最可能是由于双节纳米棒在 H_2O_2 溶液中发生自电泳而产生的^[55-59]. 但是, 此时的双节纳米棒微纳机器人的运动方向是随机的, 无法人为控制.

2005年, Mallouk和Crespi课题组^[49]提出了一种Pt/Ni/Au/Ni/Au多节纳米棒, 其中Pt端用于催化分解 H_2O_2 产生自电泳现象, Ni端用于感应磁场, 并且预先磁化产生垂直于纳米棒中轴的磁偶极矩. 将该多节纳米棒置于含有 H_2O_2 的水中、并使用NeFeB永磁铁在其附近产生1个强度约为550高斯的磁场时, 纳米棒会垂直于磁场方向并朝Pt端的方向发生定向运动, 甚至能够人为控制其沿着“PSU”的轨迹运动, 如图9(b)所示. 他们还通过计算指出, 多节纳米棒的驱动动力来自于催化分解反应, 磁场仅用于控制它的运动方向, 对速度没有影响. 2008年, Crespi和Sen课题组^[50]进一步制备了Pt/Ni/Au/Ni/Au/PPy多节纳米棒,

并成功利用磁场使它在 H_2O_2 溶液中定向传送聚苯乙烯微球, 如图9(c)所示. 同年, Posner课题组^[51]和Wang课题组^[52]制备了一种Au/Ni/Au/Pt-CNT的多节纳米棒, 在Pt端掺入了能够快速传输电子的碳纳米管(CNT)后, 增强了自电泳效应, 大幅提升了纳米棒在 H_2O_2 溶液中的移动速度. 他们利用磁场使纳米棒能够在较为复杂的微管道中装载、定向快速精准运输并释放磁性聚苯乙烯小球, 如图9(d)所示, 在许多微操作领域中具有十分重要的潜在应用.

2.1.2 磁导向气泡推动式微纳米机器人

2002年, 美国哈佛大学Whitesides课题组^[60]首先制备了一种气泡推进式装置. 该装置是一个扁平的立体扇形, 且在扇形的一边上固定了一小块表面镀Pt的玻璃片, 当它被放入含有 H_2O_2 的溶液中时, H_2O_2 在Pt的催化作用下, 会快速分解并产生 O_2 . 此时大量的 O_2 气泡会从装置中带有Pt片一端快速喷射而出, 从而推动装置发生运动. 虽然该扇形圆柱体装置是毫米尺度的, 但它为之后出现的气泡推进式微纳米机器人提供了灵感^[61,62].

2009年, Solovev等人^[53]利用自卷曲技术制备了

图9 (网络版彩色)磁导向化学驱动式微纳米机器人. (a) 自电泳驱动式微纳米机器人^[48]. Copyright © 2004 American Chemical Society. (b)–(d) 磁导向自电泳驱动式微纳米机器人^[49-52]. Ref. [49], Copyright © 2005 Wiley. Ref. [50], Copyright © 2008 American Chemical Society. Ref. [51], Copyright © 2008 American Chemical Society. Ref. [52], Copyright © 2008 American Chemical Society. (e) 磁导向气泡推动式管状微纳米机器人^[53]. Copyright © 2009 Wiley. (f) 磁导向气泡推动式微型双面粒子^[54]. Copyright © 2013 Royal Society of Chemistry

Figure 9 (Color online) Chemical fuel-propelled microrobots steered by magnetic field. (a) Multi-segment nanorod which can be propelled by self-electrophoresis^[48]. Copyright © 2004 American Chemical Society. (b)–(d) Multi-segment nanorod propelled by self-electrophoresis which can be steered by magnetic field simultaneously^[49-52]. Ref. [49], Copyright © 2005 Wiley. Ref. [50], Copyright © 2008 American Chemical Society. Ref. [51], Copyright © 2008 American Chemical Society. Ref. [52], Copyright © 2008 American Chemical Society. (e) Bubble-propelled microtubular jet engines which can be steered by magnetic field simultaneously^[53]. Copyright © 2009 Wiley. (f) Bubble-propelled Janus microparticle which can be steered by magnetic field simultaneously^[54]. Copyright © 2013 Royal Society of Chemistry

一种直径5.5 μm , 长度100 μm 管状微型喷射器(microtubular jet engine)并成功结合外加磁场控制它的运动方向, 如图9(e)所示. 首先将光刻胶旋转涂覆在硅片上并利用光刻技术使之成型; 接着将Ti, Fe(Co), Au, Pt等金属通过电子束蒸镀技术以一定角度依次沉积在光刻胶上, 此时的金属层中存在内应力; 最后使用丙酮溶解光刻胶后, 金属层会在内应力作用下发生自卷曲作用而形成一个微管. 微管内部是Pt, 能够催化分解 H_2O_2 , 反应产生的 O_2 气泡会从微管一端喷射而出, 中间则有Fe(Co)磁性层, 能够感应外加磁场. 实验发现, 当置于3%~15%的 H_2O_2 水溶液时, 微管均会产生快速运动, 最高运动速率可达约2 mm/s, 并可用外加磁场轻易地引导或改变运动方向.

除了Pt- H_2O_2 体系, 其他能够通过反应产生气泡的体系, 如酶- H_2O_2 , Al- H_2O , Mg- H_2O , Zn-HCl, 也被运用在气泡推进式微纳米机器人的设计中^[54,63-66]. 2013年, Wang课题组^[54]以Mg- H_2O 反应体系为基础, 制备了一种磁导向的微型双面粒子(Janus particle), 如图9(f)所示. 他们首先将直径约30 μm 的Mg微粒单层均匀地分散在载玻片上, 再使用电子束蒸镀技术依次沉积了Ti, Ni, Au金属层, 接着取下Mg微粒后便

可得到一种半面为Mg, 半面为Au的双面粒子. 将其置于海水中时, 粒子因为只有Mg面会与水反应而在一端产生大量 H_2 气泡, 从而产生定向运动. 此外, 由于Ni磁性金属层的存在, 研究者还能通过外加磁场操控半面粒子的运动方向.

2.2 磁导向趋磁细菌

前文介绍的均是无生命特征的微纳米机器人, 而在自然界的海洋和湖泊环境中, 还广泛分布着一类能够沿着地球磁力线运动的特殊细菌. 1975年, 美国科学家Blakemore^[67]发现了这种细菌并将之命名为趋磁细菌(magnetotactic bacteria, MTB). MTB之所以能够感应磁场, 是因为它们体内含有一种特殊的细胞器——磁小体(magnetosome). 磁小体是一种被磷脂膜包覆的单畴晶体, 直径在几十至几百纳米, 大多数趋磁细菌磁小体的主要成分为 Fe_3O_4 , 少数为 Fe_3S_4 , FeS或 FeS_2 ^[68]. 在MTB中, 多个磁小体以链状分布, 形成一个“生物指南针”, 因此MTB会偏向并沿着外加磁场的方向运动^[69]. 图10(a)是一种MTB (magnetospirillum magnetotacticum strain MS-1)的扫描电子显微镜(SEM)图, 可以清楚地看出其中磁小体

图 10 (网络版彩色)磁导向趋磁细菌. (a) 趋磁螺旋细菌MS-1的SEM图^[37]. Copyright © 2004 American Chemical Society. (b) 磁场引导MTB运动并牵引微球按指定方向运动^[70]. Copyright © 2006 AIP Publishing. (c) MTB群体推动并组装大型物体^[71]. Copyright © 2010 IEEE

Figure 10 (Color online) Motion control of MTB using external magnetic fields. (a) SEM image of magnetospirillum magnetotacticum (MS-1)^[37]. Copyright © 2004 American Chemical Society. (b) MTB whose motion can be controlled to push a microbead by magnetic field^[70]. Copyright © 2006 AIP Publishing. (c) A swarm of magnetotactic bacteria which can be controlled by external magnetic field to perform complex micro-assembly tasks^[71]. Copyright © 2010 IEEE

的链状分布^[37]. MTB产生趋磁性的原因尚未完全清晰, 其中被广为接受的一种解释是, MTB为了能在磁场的作用下到达海洋和湖泊中最适宜生存的地方^[72].

自MTB被发现以来, 研究者对这种特殊的微生物进行了大量研究. MTB细胞内的磁小体由于具有较大的比表面积和良好的生物相容性, 在磁性纳米材料、生物医学和环境处理等领域受到了广泛的关注^[73]. 此外, 在合适的生存环境下, MTB能够在低雷诺数环境中高效地运动, 其中趋磁球菌MC-1更是能达到约300 $\mu\text{m/s}$ 的运动速率, 可看作一种具有生命的且能够对磁场产生感应的自驱动智能型微型机器人^[74,75]. 2006年, 加拿大蒙特利尔大学Martel等人^[70,76]首次利用磁场使MTB按照指定的方向运动并牵引微球前行, 如图10(b)所示. 他们培养了一种趋磁螺菌(*magnetospirillum gryphiswaldense*), 并在一定条件下使每个细菌黏附1个微米小球, 最后将其置于磁场中观察其运动状态. 结果表明, 没有施加磁场时, MTB的运动方向随机无规律. 一旦施加1个磁场, MTB就会沿着磁感线的方向定向运动, 即使其黏附着1个直径3 μm 的微球, 也能以7.5 $\mu\text{m/s}$ 的平均速率按指定方向运动. 他们认为, 如果将微球功能化(如包覆药物), 那么这类磁场控制的微生物将有可能应用于生物工程、基因工程、靶向输送医药等领域. 2010年, Martel等人^[71]还利用大量MTB的群体共同推动并组装较大的物体, 如图10(c)所示. 他们培养了能够快速运动的趋磁球菌MC-1并用磁场使约5000个MC-1团聚在一起, 接着继续利用磁场使MC-1群推动了1个较大的SU8高分子长方体(长、宽、高分别为80, 20和15 μm), 最后甚至组装了一个以SU8高分子长方体为基体的简易金字塔.

2013年, 荷兰屯特大学Khalil等人^[77]实现了更为精准的MTB点对点移动, 提高了磁场引导趋磁细菌运动的精度. 在测得MTB(*magnetospirillum magnetotacticum* strain MS-1)在磁场中的磁偶极矩后, 设计了一套闭环控制的磁场操作系统, 能够使MTB在目标位置附近时发生减速并不断趋近目标位置, 从而提高控制精度. MS-1点对点移动的位置误差约13 μm , 且在目标处附近的速度为15 $\mu\text{m/s}$, 相对于PD控制系统(proportional-derivative control system)的20 μm 和29 $\mu\text{m/s}$ 有了显著的提升. 之后, Khalil等人^[78-81]还利用磁场闭环控制系统操纵了其他MTB和磁性人

工微纳米机器人, 均取得了良好效果. 关于磁导向MTB的研究还有很多, 如趋磁细菌功能化、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)追踪等^[82-87]. 此外, 研究者还将无趋磁性的单个或多个细菌与磁性颗粒组装, 形成人工MTB并研究其在磁场下的运动性能^[88,89], 此处不再一一介绍.

3 结论与展望

综上所述, 本文将磁性微纳米机器人分为磁场驱动的微纳米机器人和磁场导向的微纳米机器人, 并进行了详细的介绍. 在磁场驱动的微纳米机器人中, 旋转磁场驱动的螺旋推进式微纳米机器人和振荡磁场驱动的柔性微纳米机器人的设计灵感来自于大自然中的微生物, 能够在磁场的作用下在低雷诺环境中高效地运动. 但由于它们具有特殊的形状或成分, 相应的制备方法也会变得复杂. 以螺旋推进式微纳米机器人为例: 自卷曲技术和GLAD能够制备出满足要求的螺旋型机器人, 但是其往往要求严格的制备环境(超净室)并会产生可能对环境有害的产物. 三维激光直写技术能够制备出任意形状和结构的机器人, 大大扩展了螺旋型机器人的应用范围, 但是其制备过程中对各个步骤要求十分严格, 需要对操作人员进行专业的培训. 此外, 目前可用于三维激光直写技术的材料十分有限, 亟需开发新的打印材料. 模板法能够同时制备大量的螺旋型机器人, 制备过程简单且对环境无害, 但是可制备的机器人的形状和结构十分有限, 难以得到广泛应用. 相对地, 磁场驱动的其他类型机器人, 如梯度磁场驱动式微纳米机器人和界面滚动式微纳米机器人等, 对形状和结构往往没有特殊的要求, 因此制备比较简单, 但他们也有一些缺点, 如运动效率低、对运动环境有特殊要求等. 在磁场导向的微纳米机器人中, 本文介绍了磁性化学驱动式微纳米机器人和趋磁细菌2类, 磁场均可用于控制它们的运动方向, 且对运动效率没有影响. 但是它们的驱动需要特殊的环境, 如大部分化学驱动式微纳米机器人需要环境中有 H_2O_2 的存在, 趋磁细菌为维持生命活动, 对环境的温度、pH等有严格要求等.

因此, 虽然近年来, 磁性微纳米机器人领域随着微加工制造技术的不断发展而得到了长足发展, 但是磁性微纳米机器人仍然在设计、制备、控制、反馈、功能化等方面存在挑战(图11), 需要研究者的不断努

图 11 磁性微纳米游动机器人的发展方向

Figure 11 Research and development roadmap of magnetic micro-/nanoscale swimmers

力。为了能让磁场驱动并控制低雷诺环境中的磁性微纳米机器人，能够打破运动对称性的设计必不可少，除目前已有的各式微纳米机器人外，研究者还需要不断思考运动效率更高的设计；为了满足设计需要，能够低成本、大规模、对环境无害地制备出相应微纳米机器人的微加工制造技术仍然需要不断发展；制备出合格的微纳米机器人后，接下来在操控磁性微纳米机器人的运动中，磁场控制系统和实时的信息

反馈非常重要，多自由度、高效精准的运动控制需要闭环控制系统、生物成像等技术的不断发展；除了要求磁性微纳米机器人能够按照指令高效运动外，对机器人结构和成分上的功能化也必不可少。

我们认为未来的研究可以从以下几个方面进行突破：(1) 优化并功能化微纳米机器人的结构(或成分)，使其在磁场的操控下完成更多更复杂的任务；(2) 继续发展其他微纳米机器人驱动手段并与磁场结合使用；(3) 改善磁场控制系统，实现更高效精准地操控微纳米机器人；(4) 结合自然界中微生物、细胞等的趋向性(智能性)，利用先进的微纳米制备技术，开发生物杂化的磁性智能微纳米机器人；(5) 由于磁驱动和磁导向微纳米机器人在生物医学领域具有广泛的潜在应用，因此能够在生物体内实时观察微纳米机器人的生物成像技术的发展也至关重要。以螺旋推动式微纳米机器人为例：在制备和功能化方面，三维激光直写技术是一种非常有前景的技术，针对其缺点，后续的研究可以将开发新型打印材料(如水凝胶或大分子蛋白)、简化制备步骤、实现大批量制备等方面作为研究重点；在控制与反馈方面，着重开发成像技术(如MRI和光声成像技术)，并将其与磁控设备结合组成磁场闭环控制系统，用以实时精准地操控微纳米机器人。如果以上方向的研究能够完成，就将极大地促进磁性微纳米机器人广泛潜在应用的真正实现。

致谢 感谢香港中文大学天石机器人研究所基金的大力支持。

参考文献

- 1 Nelson B J, Kaliakatsos I K, Abbott J J. Microrobots for minimally invasive medicine. *Annu Rev Biomed Eng*, 2010, 12: 55–85
- 2 Gao W, Wang J. The environmental impact of micro/nanomachines: A review. *ACS Nano*, 2014, 8: 3170–3180
- 3 Wang J, Gao W. Nano/microscale motors: Biomedical opportunities and challenges. *ACS Nano*, 2012, 6: 5745–5751
- 4 Sitti M, Ceylan H, Hu W, et al. Biomedical applications of untethered mobile milli/microrobots. *Proc IEEE*, 2015, 103: 205–224
- 5 Qiu F, Nelson B J. Magnetic helical micro- and nanorobots: Toward their biomedical applications. *Engineering*, 2015, 1: 21–26
- 6 Purcell E M. Life at low Reynolds number. *Am J Phys*, 1977, 45: 3–11
- 7 Zhang L, Peyer K E, Nelson B J. Artificial bacterial flagella for micromanipulation. *Lab Chip*, 2010, 10: 2203–2215
- 8 Qiu T, Lee T C, Mark A G, et al. Swimming by reciprocal motion at low Reynolds number. *Nat Commun*, 2014, 5: 5119
- 9 Wang W, Duan W, Ahmed S, et al. Small power: Autonomous nano- and micromotors propelled by self-generated gradients. *Nano Today*, 2013, 8: 531–554
- 10 Collins C M, Yang B, Yang Q X, et al. Numerical calculations of the static magnetic field in three-dimensional multi-tissue models of the human head. *Magn Reson Imaging*, 2002, 20: 413–424
- 11 Siauve N, Scorretti R, Burais N, et al. Electromagnetic fields and human body: A new challenge for the electromagnetic field computation. *COMPEL*, 2003, 22: 457–469

- 12 Peyer K E, Zhang L, Nelson B J. Bio-inspired magnetic swimming microrobots for biomedical applications. *Nanoscale*, 2013, 5: 1259–1272
- 13 Abbott J J, Lagomarsino M C, Zhang L, et al. How should microrobots swim? *Int J Robot Res*, 2009, 28: 1434–1447
- 14 Honda T, Arai K, Ishiyama K. Micro swimming mechanisms propelled by external magnetic fields. *IEEE Trans Magn*, 1996, 32: 5085–5087
- 15 Zhang L, Abbott J J, Dong L, et al. Artificial bacterial flagella: Fabrication and magnetic control. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 064107
- 16 Huang H W, Sakar M S, Petruska A J, et al. Soft micromachines with programmable motility and morphology. *Nat Commun*, 2016, 7: 12263
- 17 Ghosh A, Fischer P. Controlled propulsion of artificial magnetic nanostructured propellers. *Nano Lett*, 2009, 9: 2243–2245
- 18 Tottori S, Zhang L, Qiu F, et al. Magnetic helical micromachines: Fabrication, controlled swimming, and cargo transport. *Adv Mater*, 2012, 24: 811–816
- 19 Medina-Sánchez M, Schwarz L, Meyer A K, et al. Cellular cargo delivery: Toward assisted fertilization by sperm-carrying micromotors. *Nano Lett*, 2015, 16: 555–561
- 20 Huang T Y, Sakar M S, Mao A, et al. 3D printed microtransporters: Compound micromachines for spatiotemporally controlled delivery of therapeutic agents. *Adv Mater*, 2015, 27: 6644–6650
- 21 Li J, Sattayasamitsathit S, Dong R, et al. Template electrosynthesis of tailored-made helical nanoswimmers. *Nanoscale*, 2014, 6: 9415–9420
- 22 Gao W, Feng X, Pei A, et al. Bioinspired helical microswimmers based on vascular plants. *Nano Lett*, 2013, 14: 305–310
- 23 Kikuchi K, Yamazaki A, Sendoh M, et al. Fabrication of a spiral type magnetic micromachine for trailing a wire. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41: 4012–4014
- 24 Bell D J, Leutenegger S, Hammar K, et al. Flagella-like propulsion for microrobots using a nanocoil and a rotating electromagnetic field. In: *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE*, 2007. 1128–1133
- 25 Huang T Y, Qiu F, Tung H W, et al. Generating mobile fluidic traps for selective three-dimensional transport of microobjects. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 114102
- 26 Suter M, Zhang L, Siringil E C, et al. Superparamagnetic microrobots: Fabrication by two-photon polymerization and biocompatibility. *Biomed Microdevices*, 2013, 15: 997–1003
- 27 Liu L, Yoo S H, Lee S A, et al. Wet-chemical synthesis of palladium nanosprings. *Nano Lett*, 2011, 11: 3979–3982
- 28 Yan X, Zhou Q, Yu J, et al. Magnetite nanostructured porous hollow helical microswimmers for targeted delivery. *Adv Funct Mater*, 2015, 25: 5333–5342
- 29 Guo S, Sawamoto J, Pan Q. A novel type of microrobot for biomedical application. In: *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE*, 2005. 1047–1052
- 30 Dreyfus R, Baudry J, Roper M L, et al. Microscopic artificial swimmers. *Nature*, 2005, 437: 862–865
- 31 Khalil I S, Dijkslag H C, Abelman L, et al. Magnetosperm: A microrobot that navigates using weak magnetic fields. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 223701
- 32 Sudo S, Segawa S, Honda T. Magnetic swimming mechanism in a viscous liquid. *J Intel Mater Syst Struct*, 2006, 17: 729–736
- 33 Gauger E, Stark H. Numerical study of a microscopic artificial swimmer. *Phys Rev E*, 2006, 74: 021907
- 34 Gillies E A, Cannon R M, Green R B, et al. Hydrodynamic propulsion of human sperm. *J Fluid Mech*, 2009, 625: 445–474
- 35 Steager E B, Sakar M S, Magee C, et al. Automated biomanipulation of single cells using magnetic microrobots. *Int J Robot Res*, 2013, 32: 346–359
- 36 Lee C, Lee H, Westervelt R. Microelectromagnets for the control of magnetic nanoparticles. *Appl Phys Lett*, 2001, 79: 3308–3310
- 37 Lee H, Purdon A M, Chu V, et al. Controlled assembly of magnetic nanoparticles from magnetotactic bacteria using microelectromagnets arrays. *Nano Lett*, 2004, 4: 995–998
- 38 Tasoglu S, Diller E, Guven S, et al. Untethered micro-robotic coding of three-dimensional material composition. *Nat Commun*, 2014, 5: 3124
- 39 Mahoney A W, Abbott J J. Managing magnetic force applied to a magnetic device by a rotating dipole field. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 134103
- 40 Tierno P, Golestanian R, Pagonabarraga I, et al. Controlled swimming in confined fluids of magnetically actuated colloidal rotors. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 218304
- 41 Sing C E, Schmid L, Schneider M F, et al. Controlled surface-induced flows from the motion of self-assembled colloidal walkers. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 535–540
- 42 Zhang L, Petit T, Lu Y, et al. Controlled propulsion and cargo transport of rotating nickel nanowires near a patterned solid surface. *ACS Nano*, 2010, 4: 6228–6234

- 43 Pawashe C, Floyd S, Sitti M. Modeling and experimental characterization of an untethered magnetic micro-robot. *Int J Robot Res*, 2009, 28: 1077–1094
- 44 Hou M T, Shen H M, Jiang G L, et al. A rolling locomotion method for untethered magnetic microrobots. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 024102
- 45 Karle M, Wöhrle J, Miwa J, et al. Controlled counter-flow motion of magnetic bead chains rolling along microchannels. *Microfluid Nanofluid*, 2011, 10: 935–939
- 46 Mair L O, Evans B, Hall A R, et al. Highly controllable near-surface swimming of magnetic janus nanorods: Application to payload capture and manipulation. *J Phys D Appl Phys*, 2011, 44: 125001
- 47 Zhang L, Petit T, Peyer K E, et al. Noncontact and contact micromanipulation using a rotating nickel nanowire. In: *Nano/Molecular Medicine and Engineering (NANOMED)*, 2010 IEEE 4th International Conference, IEEE, 2010. 38–43
- 48 Paxton W F, Kistler K C, Olmeda C C, et al. Catalytic nanomotors: Autonomous movement of striped nanorods. *J Am Chem Soc*, 2004, 126: 13424–13431
- 49 Kline T R, Paxton W F, Mallouk T E, et al. Catalytic nanomotors: Remote-controlled autonomous movement of striped metallic nanorods. *Angew Chem Int Ed*, 2005, 44: 744–746
- 50 Sundararajan S, Lammert P E, Zudans A W, et al. Catalytic motors for transport of colloidal cargo. *Nano Lett*, 2008, 8: 1271–1276
- 51 Burdick J, Laocharoensuk R, Wheat P M, et al. Synthetic nanomotors in microchannel networks: Directional microchip motion and controlled manipulation of cargo. *J Am Chem Soc*, 2008, 130: 8164–8165
- 52 Laocharoensuk R, Burdick J, Wang J. Carbon-nanotube-induced acceleration of catalytic nanomotors. *ACS Nano*, 2008, 2: 1069–1075
- 53 Solovev A A, Mei Y, Bermúdez Ureña E, et al. Catalytic microtubular jet engines self-propelled by accumulated gas bubbles. *Small*, 2009, 5: 1688–1692
- 54 Gao W, Feng X, Pei A, et al. Seawater-driven magnesium based janus micromotors for environmental remediation. *Nanoscale*, 2013, 5: 4696–4700
- 55 Paxton W F, Baker P T, Kline T R, et al. Catalytically induced electrokinetics for motors and micropumps. *J Am Chem Soc*, 2006, 128: 14881–14888
- 56 Kline T R, Iwata J, Lammert P E, et al. Catalytically driven colloidal patterning and transport. *J Phys Chem B*, 2006, 110: 24513–24521
- 57 Wang Y, Hernandez R M, Bartlett D J, et al. Bipolar electrochemical mechanism for the propulsion of catalytic nanomotors in hydrogen peroxide solutions. *Langmuir*, 2006, 22: 10451–10456
- 58 Moran J L, Posner J D. Electrokinetic locomotion due to reaction-induced charge auto-electrophoresis. *J Fluid Mech*, 2011, 680: 31–66
- 59 Yariv E. Electrokinetic self-propulsion by inhomogeneous surface kinetics. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, 2010
- 60 Ismagilov R F, Schwartz A, Bowden N, et al. Autonomous movement and self-assembly. *Angew Chem Int Ed*, 2002, 41: 652–654
- 61 He Y, Wu J, Zhao Y. Designing catalytic nanomotors by dynamic shadowing growth. *Nano Lett*, 2007, 7: 1369–1375
- 62 Gibbs J, Zhao Y P. Autonomously motile catalytic nanomotors by bubble propulsion. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 163104
- 63 Orozco J, García-Gradilla V, D'Agostino M, et al. Artificial enzyme-powered microfish for water-quality testing. *ACS Nano*, 2012, 7: 818–824
- 64 Mou F, Chen C, Ma H, et al. Self-propelled micromotors driven by the magnesium-water reaction and their hemolytic properties. *Angew Chem Int Ed*, 2013, 52: 7208–7212
- 65 Gao W, Pei A, Wang J. Water-driven micromotors. *ACS Nano*, 2012, 6: 8432–8438
- 66 Gao W, Dong R, Thamphiwatana S, et al. Artificial micromotors in the mouse's stomach: A step toward *in vivo* use of synthetic motors. *ACS Nano*, 2015, 9: 117–123
- 67 Blakemore R. Magnetotactic bacteria. *Science*, 1975, 190: 377–379
- 68 Faivre D, Schuler D. Magnetotactic bacteria and magnetosomes. *Chem Rev*, 2008, 108: 4875–4898
- 69 Frankel R B, Blakemore R. Navigational compass in magnetic bacteria. *J Magn Magn Mater*, 1980, 15: 1562
- 70 Martel S, Tremblay C C, Ngakeng S, et al. Controlled manipulation and actuation of micro-objects with magnetotactic bacteria. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 233904
- 71 Martel S, Mohammadi M. Using a swarm of self-propelled natural microrobots in the form of flagellated bacteria to perform complex micro-assembly tasks. In: *Robotics and Automation (ICRA)*, 2010 IEEE International Conference, IEEE, 2010. 500–505
- 72 Schüler D. *Magnetoreception and Magnetosomes in Bacteria*. Heidelberg: Springer, 2006
- 73 Mathuriya A S. Magnetotactic bacteria for cancer therapy. *Biotechnol Lett*, 2015, 37: 491–498
- 74 Martel S. Towards fully autonomous bacterial microrobots. *Experiment Robot*, 2014, 79: 775–784
- 75 Martel S. Flagellated bacterial nanorobots for medical interventions in the human body. In: *Surgical Robotics*. Heidelberg: Springer, 2011. 397–416

- 76 Martel S. Controlled bacterial micro-actuation. In: Microtechnologies in Medicine and Biology 2006 International Conference, IEEE, 2006. 89–92
- 77 Khalil I S, Pichel M P, Abelman L, et al. Closed-loop control of magnetotactic bacteria. *Int J Robot Res*, 2013, 32: 637–649
- 78 Khalil I S, Magdanz V, Sanchez S, et al. Magnetic control of potential microrobotic drug delivery systems: Nanoparticles, magnetotactic bacteria and self-propelled microjets. In: 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), IEEE, 2013. 5299–5302
- 79 Khalil I S, Magdanz V, Sanchez S, et al. Magnetotactic bacteria and microjets: A comparative study. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2013. 2035–2040
- 80 Khalil I S, Misra S. Control characteristics of magnetotactic bacteria: *Magnetospirillum magnetotacticum* strain MS-1 and *magnetospirillum magneticum* strain AMB-1. *IEEE Trans Magn*, 2014, 50: 1–11
- 81 Khalil I S, Pichel M P, Reefman B A, et al. Control of magnetotactic bacterium in a micro-fabricated maze. In: Robotics and Automation (ICRA) 2013 IEEE International Conference, IEEE, 2013. 5508–5513
- 82 Martel S, Taherkhani S, Tabrizian M, et al. Computer 3D controlled bacterial transports and aggregations of microbial adhered nano-components. *J Micro-Bio Robot*, 2014, 9: 23–28
- 83 Martel S, Mohammadi M, Felfoul O, et al. Flagellated magnetotactic bacteria as controlled mri-trackable propulsion and steering systems for medical nanorobots operating in the human microvasculature. *Int J Robot Res*, 2009, 28: 571–582
- 84 Bahaj A, Croudace I, James P, et al. Continuous radionuclide recovery from wastewater using magnetotactic bacteria. *J Magn Magn Mater*, 1998, 184: 241–244
- 85 Lu Z, Martel S. Controlled bio-carriers based on magnetotactic bacteria. In: Transducers 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, IEEE, 2007. 683–686
- 86 Andre W, Martel S. Initial design of a bacterial actuated microrobot for operations in an aqueous medium. In: Engineering in Medicine and Biology Society, 28th Annual International Conference, IEEE, 2006. 2824–2827
- 87 Felfoul O, Mohammadi M, Taherkhani S, et al. Magneto-aerotactic bacteria deliver drug-containing nanoliposomes to tumour hypoxic regions. *Nat Nanotechnol*, 2016, 11: 941–947
- 88 Kim D H, Kim P S S, Julius A A, et al. Three-dimensional control of *tetrahymena pyriformis* using artificial magnetotaxis. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 053702
- 89 Carlsen R W, Edwards M R, Zhuang J, et al. Magnetic steering control of multi-cellular bio-hybrid microswimmers. *Lab Chip*, 2014, 14: 3850–3859

Summary for “磁性微纳米尺度游动机器人：现状与应用前景”

Magnetic micro-/nanoscale swimmers: Current status and potential applications

JIN DongDong¹, YU JiangFan¹, HUANG TianYun², DUAN HuiLing^{2*} & ZHANG Li^{1,3*}

¹ Department of Mechanical and Automation Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;

² State Key Laboratory for Turbulence and Complex Systems, Department of Mechanics and Engineering Science, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

³ Shenzhen Research Institute, The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen 518000, China

* Corresponding authors, E-mail: hlduan@pku.edu.cn; lizhang@mae.cuhk.edu.hk

Because of the small size, controlled mobility, and versatile functionalities, micro-/nanoscale swimmers have drawn great attention and shown various potential applications, ranging from biomedicine to environmental remediation, such as minimal invasive surgery, targeted therapy, cell manipulation, heavy metal ions adsorption in waste water, and so on.

Development of micro-/nanoscale swimmers meets different challenges compared with traditional large-size robots, because the Reynolds number is very small (10^{-5} – 10^{-2}) in their movement environment, that is, inertia is negligible compared to viscous forces. Such a low Reynolds number leads to that several difficulties must be overcome to actuate and steer the motion of micro-/nanoscale swimmers, including critical design of micro-/nanoscale swimmers whose movement must be non-reciprocal, and appropriate energy supply which can be applied to micro-/nanoscale swimmers constantly.

Great efforts have been made to propel micro-/nanoscale swimmers at low Reynolds number, and at present, the propulsion mechanisms can be divided into two aspects: Self-propulsion and propulsion using external fields. The former means that micro-/nanoscale swimmers can obtain and convert energy from their surrounding environment to mechanical energy by themselves, including self-electrophoresis, self-diffusiophoresis, bubble propulsion, and so on. While the latter refers to that the motion of micro-/nanoscale swimmers is propelled by an external field such as electric field, acoustic field, magnetic field and light. Among the propulsion methods, magnetic field has aroused high research interest as one of the most promising means to actuate and steer magnetic micro-/nanoscale swimmers wirelessly, because low-strength magnetic field with low frequency is easy to be obtained and tuned, which is also considered harmless to biological cells and tissues, and decays slowly in living body. In this review article, magnetic micro-/nanoscale swimmers are divided into two aspects and introduced separately: Magnetic field actuated swimmers which are powered and steered by magnetic field, and magnetic-field-steered swimmers whose motion is powered by other means but steered by the magnetic field.

On one hand, the power source of micro-/nanoscale swimmers actuated by magnetic field comes from the induced magnetic torque or field gradient, and the magnetic field that has been applied to actuate micro-/nanoscale swimmers includes rotating magnetic field, magnetic field with field vector oscillating up and down in a plane, magnetic field with field gradient along or perpendicular to the direction of the field, and so on. Herein, the motion mechanisms and fabrication methods of helical swimmers and flexible swimmers actuated by rotating magnetic field and oscillating magnetic field, respectively, which are inspired by microorganisms in nature, are introduced in detail. Moreover, other kinds of magnetic swimmers, such as U-shaped microrobot actuated by magnetic field gradient, magnetic device pushed along a surface by a rotating dipole field, nickel nanowire propelled near a patterned solid surface by rotating magnetic field, and so on, are also discussed.

On the other hand, we describe several kinds of magnetic micro-/nanoscale swimmers whose motion are powered by self-electrophoresis, bubble or metabolism, and steered by magnetic field, such as multi-segment nanorod based nanomotors, microtubular jet engines, Janus microparticles and magnetotactic bacteria. Herein, the magnetic field is only used to control the motion direction of swimmers and has no effect on the swimming speed.

In summary, we have overviewed the recent research progress on the application of magnetic field in micro-/nanoswimmers, and introduced relevant mechanisms in this work, which could pave the way for the research and development of swimming machines and robots at small scales.

magnetic field actuation, micro-/nanoscale swimmers, swimming microrobots, micromachines

doi: 10.1360/N972016-00854