

磁场驱动柔性微纳机器人研究进展

邓兴泓,张安宁,李天龙,张广玉,李隆球

哈尔滨工业大学机电工程学院,哈尔滨 150001

摘要 磁场驱动微纳机器人无需化学燃料,因而可以在水、血浆、组织液等多种液体环境中使用。它可以在生物体内进行无损伤远程调控,并易于进行运动控制,这些特点使得它在医疗领域具有广泛的应用前景。微纳机器人尺寸极小,处于低雷诺数环境中,需要克服高黏性力实现运动。磁场驱动微纳机器人有表面型、螺旋型和柔性驱动型3种。柔性的磁场驱动机器人通过外界磁场力产生周期性变形,在低雷诺数环境中实现推进,与微生物的推进方式类似,具有推进效率高、对磁场强度要求低的优点。本文综述了磁场驱动柔性微纳机器人的制备、驱动方式、运动性能和运动控制性能研究进展。

关键词 微纳机器人;磁场驱动;柔性结构

微纳机器人是一种能够将其他能量转换成动能或者驱动力的微纳米装置^[1]。它可以被用于药物输送^[2-3],细胞操纵^[4-5],环境治理^[6-7]等领域,具有广泛的发展前景。

微纳机器人由于尺寸极小,相对于宏观尺寸物体的运动规律有极大区别:它处于低雷诺数环境,惯性力与黏性力比值极小,黏性力占据主导地位,为了持续运动,微纳机器人必须有持续的驱动力。此外,极小的尺寸也使得微纳机器人的运动显著受到布朗运动影响,因此对其运动控制也是应用的重要条件。

微纳机器人现有化学驱动^[8-9]、光驱动^[10-11]、超声驱动^[12-13]、电场驱动^[14]及磁场驱动^[15-16]多种驱动方式。其中磁场驱动的微纳机器人具有可在生物体中利用低强度磁场实现无损伤远程调控^[16],能适应不同液体环境,易于进行运动控制的优点。磁场驱动的微纳机器人主要有螺旋线型^[16-17]、表面运动型^[18-19]和可变形型^[20-25]。本文综述可变形型磁场驱动微纳机器人的研究进展。

1 制备方法

磁场驱动柔性微纳机器人一般采用模板辅助电沉积法制备,制备过程如图1所示。利用化学合成的聚碳酸酯模板或化学氧化的氧化铝模板等带有纳米孔的薄膜,在模板上溅射电极,然后按顺序电沉积不同材料形成微纳机器人,通过

化学溶剂溶解模板释放微纳机器人。

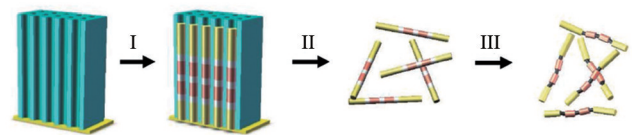
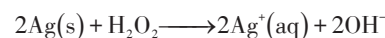


图1 类鱼型机器人制备过程^[24]

Fig. 1 Fabrication process of fish-like nanomotor

柔性微纳机器人需要具有柔性段,多数柔性磁场驱动机器人使用了多孔的银段作提供柔性,这种柔性段是通过电沉积的银段用过氧化氢溶剂短时间处理使其部分溶解获得,对应图1中的III过程,其化学反应表达式为



该反应会导致剩余的银表面附着氢氧化银和氧化银,阻止银的进一步溶解^[20]。银被部分溶解形成多孔的银结构,形成柔性段。

Jang等^[23]采用电沉积的聚吡咯作为微纳机器人的柔性段,并在微纳机器人中使用铰接结构。铰接结构的制备方式如图2所示,在完成模板辅助电沉积后,在机器人外沉积聚合物包裹,然后对机器人原有的金段用腐蚀剂进行选择性的腐蚀获得,这种在纳米线机器人上通过沉积聚合物和选择性腐蚀制造铰接结构的方法最早由Ozin等^[27]提出。

收稿日期:2017-08-05;修回日期:2017-09-11

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51705108)

作者简介:邓兴泓,硕士研究生,研究方向为微纳机器人智能化控制,电子信箱:dengxinghong1993@163.com;李天龙(通信作者),讲师,研究方向为微纳机器人的驱动与控制,电子信箱:tianlongli@hit.edu.cn

引用格式:邓兴泓,张安宁,李天龙,等. 磁场驱动柔性微纳机器人研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(18): 39-43; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.18.004

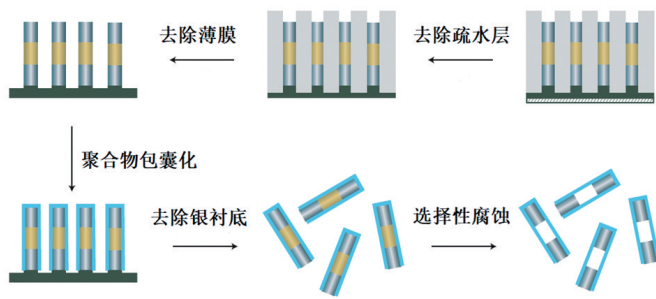


图2 纳米棒铰接结构的制备过程^[27]

Fig. 2 Fabrication of hinged nanorods

2 驱动方式

针对在低雷诺数(远小于1)、牛顿流体环境游动的物体,Edward^[26]提出了“扇贝定理”:物体要在这一环境游动,它自身的变形一定不能关于时间反面对称,否则它在一个周期中净位移量为零。扇贝通过一开一合喷水前进的运动策略在低雷诺数、牛顿流体环境不适用。在此环境中的生物通过多种策略消除时间反面对称性实现运动,例如通过旋转螺旋状的鞭毛的细菌以及摆动柔软的纤毛的微生物^[20]。自然界的运动策略对磁驱微纳机器人的构型起到了启发作用。

Dreyfus等^[20]制备的柔性磁场驱动微米机器人如图3所示,它由DNA连接胶态的超顺磁性微粒,并在顶端连接红细胞形成,红细胞起到消除结构前后的对称性作用。在外加的沿机器人方向的恒定磁场和垂直机器人方向的震荡磁场作用下,该微米机器人做类似微生物纤毛的摆动实现运动。

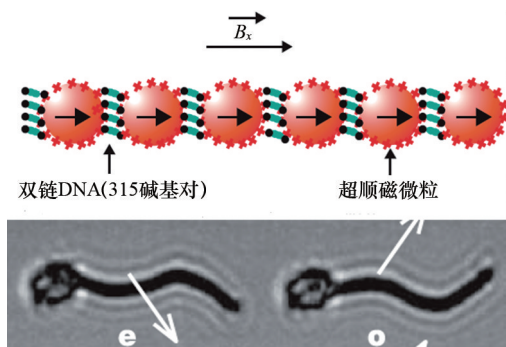


图3 摆动式微米机器人^[20]

Fig. 3 Swinging magnetic micromotor

Gao等^[21]制备了具有金的头部,镍的尾部,中间为柔性的多孔银结构的磁场驱动纳米机器人(图4)。在外加旋转磁场的作用下,镍部分随磁场旋转,并带动金端发生旋转,柔性银部分允许机器人发生变形,使机器人产生不具有时间和前后不对称的旋转运动,驱动机器人沿轴向运动。

Pak等^[21]制备了主要由镍的头部和柔性的银的尾部组成的磁驱纳米机器人,如图5所示。外加磁场包括 xOy 平面内的旋转磁场和 z 方向的恒定磁场。与螺旋形机器人的前进方

向取决于螺旋方向和外部磁场的旋转方向不同,该柔性机器人在改变外界磁场的旋转方向后并不会改变前进方向。Pak等证明对于通过旋转产生轴向游动的机器人,产生手性的变形是必须的,并针对该机器人建立了相应弹性流体动力学模型进行计算比照。

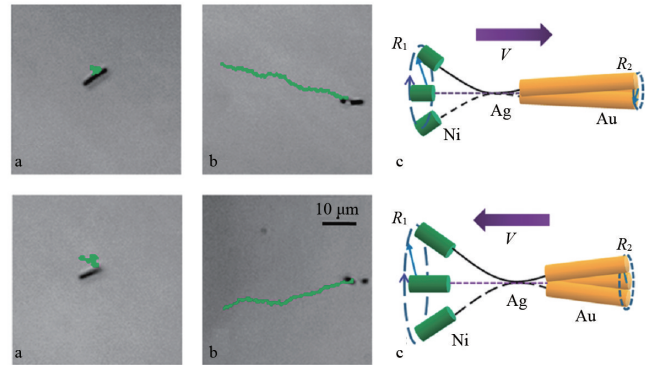


图4 旋转式磁驱纳米机器人^[21]

Fig. 4 Rotating flexible magnetic nanomotor

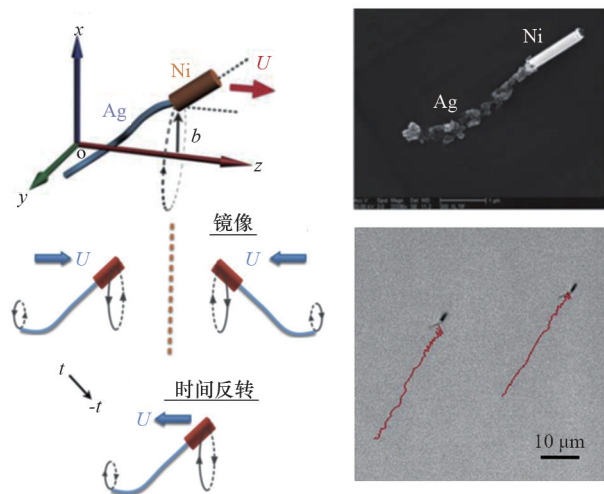


图5 磁场驱动纳米线机器人^[22]

Fig. 5 Flexible magnetic nanowire motor

Jang等^[23]制备了由聚吡咯的尾部、镍和聚合物“铰链”组成的磁驱纳米机器人(图6),该机器人通过平面内震荡磁场驱动。聚吡咯的弹性变形允许机器人的尾部发生弯曲,使机器人的摆动不具有时间反面对称性。该机器人通过两个相对的电磁铁以 90° 相位差的正弦电流输入驱动,造成镍部分带动机器人摆动实现运动。

Li等^[24]制备由两段金的被动段,两段镍的主动段,由多孔银的柔性结构连接的类鱼型磁驱纳米机器人,如图7所示,该机器人在平面震荡磁场作用下摆动方式,其游动方式与鱼通过摆动尾鳍的推进方式类似,具有较高的推进效率,因此可以实现高推进速度。

随后, Li等^[25]还制备了由两边镍的主动段,中间金的被动段以及多孔银柔性连接段组成的“自由泳式”磁驱纳米机器

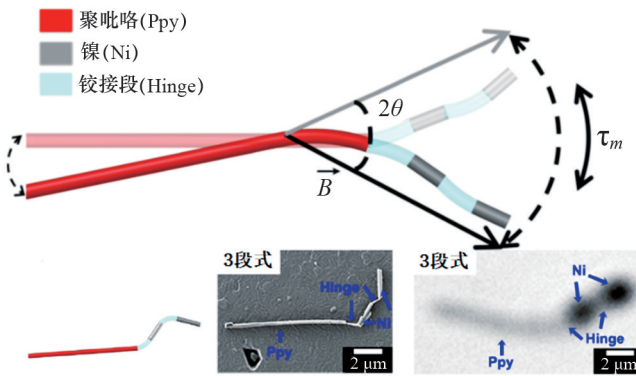


图6 摆动式磁驱纳米机器人^[23]

Fig. 6 Swinging magnetic nanomotor

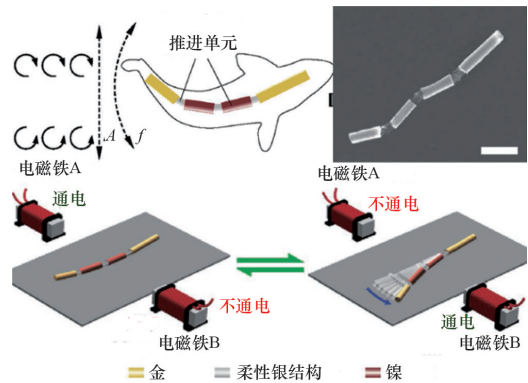


图7 类鱼型磁驱纳米机器人^[24]

Fig. 7 The speed of fish-like magnetic nanomotor

人。如图8所示,柔性的多孔银段使该机器人的摆动不具有时间反对称性,通过对镍段进行磁化处理允许机器人的两臂在震荡磁场作用下向不同方向摆动,实现类似自由泳的推进方式,可以实现高推进速度和推进效率。该机器人首次实现了利用震荡磁场产生非平面的摆动泳姿。

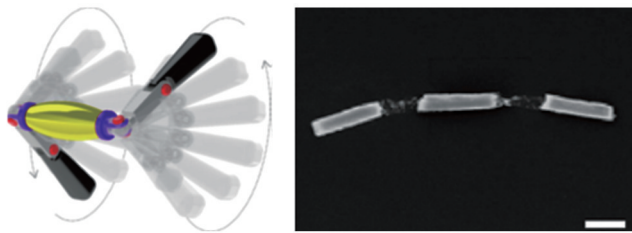


图8 自由泳式磁驱纳米机器人^[25]

Fig. 8 Freestyle magnetic nanomotor

3 运动性能及控制

一般使用最大速度 U_{max} 、最大相对速度 u_{max} 和最大无量纲速度 \tilde{U}_{max} 对磁驱变形机器人的运动性能进行比较。最大速度 U_{max} 为微纳机器人在 1 s 能前进的最大距离,代表微纳机器人进行快速机动的能力。最大相对速度 u_{max} 定义为

$$u_{max} = \frac{U_{max}}{L} \quad (1)$$

微纳机器人的尺寸会极大地影响其速度, u_{max} 对应机器人在 1 s 内前进多少身长。

最大无量纲速度 \tilde{U}_{max} 的定义为

$$\tilde{U}_{max} = \frac{U_{max}}{lf} \quad (2)$$

其中, f 为外界磁场。可以看出,最大无量纲速度 \tilde{U}_{max} 为磁驱微纳机器人在外界磁场变化一个周期时前进多少身长 L ,可以用于比较机器人的推进效率。

上述磁驱微纳机器人在超纯水中的运动速度值如表 1 所示。可以看出,相比普通的磁驱柔性机器人,类鱼型磁驱机器人和“自由泳式”磁驱机器人在最大运动速度和推进效率明显优于其他磁驱柔性机器人。

这些磁驱柔性机器人要实现应用,需要具备通过外界磁场对其进行运动控制的能力,这一能力可以分解为启停控制、速度控制和运动方向控制。

启停控制可通过关闭外界磁场实现。由于磁驱柔性机器人都是通过外界磁场导致机器人发生周期变形,克服黏性力运动的,中断外界磁场输入后微纳机器人会受黏性力作用迅速停止运动,上述所有微纳机器人均具有启停控制性能。

速度控制为调节推进速度的能力,一般通过调节磁场频率调速,将微纳机器人置于不同液体环境中,微纳机器人的推进速度相应也会受到很大影响,上述微纳机器人均可以通过调节外界磁场频率影响微纳机器人的变形运动周期,在大范围内调节运动速度,例如类鱼型磁驱纳米机器人的速度变化如图9所示。

运动方向控制是实现货物输送、细胞操纵等应用的基本要求,上述微纳机器人中摆动式微米机器人和自由泳式纳米机器人展示了运动方向控制能力。前者通过施加一个恒定磁场分量控制运动方向。后者的方向控制是通过改变相对的两个电磁铁在 xOy 平面的相对位置实现的,如图10所示。

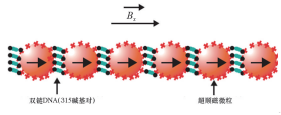
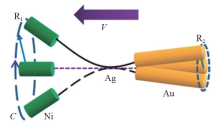
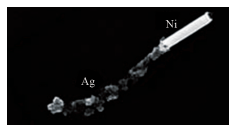
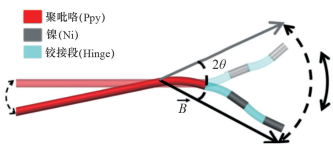
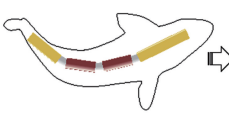
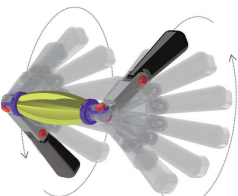
4 结论与展望

磁场驱动柔性微纳机器人已发展出多种不同的制备方法和推进方式,其运动速度和运动效率在这几年也获得了很大提高。

通过对提供外界磁场的电磁铁进行调节,可以很容易地实现外界磁场方向、强度和频率的调节,对这些机器人实现启停和速度控制十分简单有效。但磁场驱动柔性微纳机器人大多缺乏精确的轨迹控制能力,这一问题需要将来通过改

表 1 磁驱柔性微纳机器人运动性能对比

Table 1 Comparison of propulsion performances of flexible magnetic micro-/nanomotors

微纳机器人	$U_{max}/(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$u_{max}/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	\tilde{U}_{max}	速度控制	方向控制
	—	—	0.09	是	是
	6	1.0	0.08	是	否
	21	3.6	0.10	是	否
	14.4	0.9	0.09	是	否
	30.9	6.9	0.63	是	否
	59.6	12.0	0.48	是	是

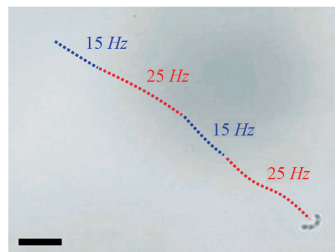


图 9 类鱼型纳米机器人速度-频率关系曲线^[24]

Fig. 9 The speed of fish-like nanomotor against magnetic frequency

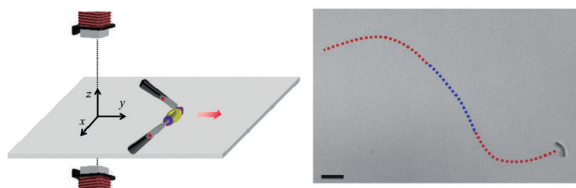


图 10 自由泳式纳米机器人的运动方向控制^[25]

Fig. 10 Control of motion direction of freestyle flexible magnetic nanomotor

进机器人的结构设计或运动原理解决。

目前磁场驱动柔性微纳机器人也缺乏应用的研究,如何实现其功能化以及为其寻找合适的应用场景是未来重要的发展趋势。

参考文献 (References)

- [1] Wang J. Can man-made nanomachines compete with nature biomotors [J]. ACS Nano, 2009, 3(1): 4-9.
- [2] Ma X, Hahn K, Sanchez S. Catalytic mesoporous janus nanomotors for active cargo delivery[J]. Journal of the American Chemical Society, 2015, 137(15): 4976-4979.
- [3] Wu Z, Li T, Gao W, et al. Cell-membrane-coated synthetic nanomotors for effective biodetoxification[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(25): 3881-3887.
- [4] Peyer K E, Zhang L, Nelson B J. Bio-inspired magnetic swimming microrobots for biomedical applications[J]. Nanoscale, 2013, 5(4): 1259-1272.
- [5] Li Z, Petit T, Peyer K E, et al. Targeted cargo delivery using a rotating nickel nanowire[J]. Nanomedicine Nanotechnology Biology & Medicine, 2012, 8(7): 1074-1080.
- [6] Li J, Singh V V, Sattayasamitsathit S, et al. Water-driven micromotors

- for rapid photocatalytic degradation of biological and chemical warfare agents[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(11): 11118–11125.
- [7] Gao W, Feng X, Pei A, et al. Seawater-driven magnesium based janus micromotors for environmental remediation[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(11): 4696–4700.
- [8] Sanchez S, Soler L, Katuri J. Chemically powered micro-and nanomotors [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(5): 1414–1444.
- [9] Mallouk T E, Sen A. Powering nanorobot [J]. *Scientific American*, 2009, 300(5): 72–77.
- [10] Wu Z, Si T, Gao W, et al. Superfast near-infrared light-driven polymer multilayer rockets[J]. *Small*, 2016, 12(5): 577–582.
- [11] Palagi S, Mark A G, Shang Y R, et al. Structured light enables biomimetic swimming and versatile locomotion of photoresponsive soft microrobots[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(6): 647–653.
- [12] Xu T, Soto F, Gao W, et al. Reversible swarming and separation of self-propelled chemically powered nanomotors under acoustic fields [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137(6): 2163–2166.
- [13] Wang W, Castro L A, Hoyos M, et al. Autonomous motion of metallic microrods propelled by ultrasound[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(7): 6122–6132.
- [14] Loget G, Kuhn A. Electric field-induced chemical locomotion of conducting objects[J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 535.
- [15] Qiu T, Lee T C, Mark A G, et al. Swimming by reciprocal motion at low Reynolds number[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(5): 5119.
- [16] Tottori S, Zhang L, Qiu F, et al. Magnetic helical micromachines: Fabrication, controlled swimming, and cargo transport[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(6): 811–816.
- [17] Li J, Sattayasamitsathit S, Dong R, et al. Template electrosynthesis of tailored-made helical nanoswimmers[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(16): 9415–9420.
- [18] Kim S, Qiu F, Kim S, et al. Fabrication and characterization of magnetic microrobots for three-dimensional cell culture and targeted transportation[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(41): 5863–5868.
- [19] Tierno P, Golestanian R, Pagonabarraga I, et al. Controlled swimming in confined fluids of magnetically actuated colloidal rotors[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(21): 218304.
- [20] Dreyfus R, Baudry J, Roper M L, et al. Microscopic artificial swimmers [J]. *Nature*, 2005, 437(7060): 862–865.
- [21] Gao W, Sattayasamitsathit S, Manesh K M, et al. Magnetically powered flexible metal nanowire motors[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(41): 14403–14405.
- [22] Pak O S, Gao W, Wang J, et al. High-speed propulsion of flexible nanowire motors: theory and experiments[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(18): 8169–8181.
- [23] Jang B, Gutman E, Stucki N, et al. Undulatory locomotion of magnetic multilink nanoswimmers[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(7): 4829–4833.
- [24] Li T, Li J, Zhang H, et al. Magnetically propelled fish-like nanoswimmers[J]. *Small*, 2016, 12(44): 6098–6105.
- [25] Li T, Li J, Morozov K, et al. Highly efficient freestyle magnetic nanoswimmer[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(8): 5092–5098.
- [26] Purcell E M. Life at low Reynolds number[J]. *American Journal of Physics*, 1977, 45(3): 3–11.
- [27] Mirkovic T, Foo M L, Arsenault A C, et al. Hinged nanorods made using a chemical approach to flexible nanostructure [J]. *Nature Nanotechnology*, 2007, 2(9): 565–569.

Review on magnetic powered flexible micro-/nanomotor

DENG Xinghong, ZHANG Anning, LI Tianlong, ZHANG Guangyu, LI Longqiu

School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract Magnetic powered micro-/nanomotors can be used in a variety of fluids, such as water, blood plasma and tissue fluid, because they are not driven by fuels. It can be remotely actuated in living organisms by an external magnetic field, noninvasively. The motion control of magnetic micro-/nanomotors can be easily achieved by modulating the external magnetic field generated by electromagnet. With these inherent advantages, magnetic micro-/nanomotors find a wide range of potential applications for medical treatments such as the targeted drug delivery and the cell manipulation. Swimming devices in a low Reynolds number environment must overcome the high viscosity force to achieve propulsion. The Scallop theorem requires that the flexible micro-/nanomotors must deform in a way which is not invariant in a time-reversal process. By these principles, three types of magnetic powered micro-/nanomotors were developed, which are the surface walkers, the helical magnetic propellers and the flexible magnetic propellers. Natural microorganisms achieve propulsion with flexible flagella or rigid helical flagella to break the time-reversal process. Inspired by swimming of microorganisms, the magnetic powered flexible micro-/nanomotors achieve motion in a low Reynolds number environment by a cyclic deformation powered by an external magnetic field. This type of flexible micro-/nanomotors have a high propulsion efficiency thus require a low magnetic field intensity. Four topics concerning this type of micro-/nanomotor are elaborated in this paper, namely, the fabrication, the mode of locomotion, the propulsion performance and the motion control. At last the problems that remain to be solved and the development tendency of magnetic powered flexible micro-/nanomotors are discussed.

Keywords micro-/nanomotors; magnetic powered; flexible

(责任编辑 刘志远)