

# 铁磁橡胶执行器与微型游泳机器人的尺度效应

梅涛<sup>1,2</sup>, 陈永<sup>2</sup>, 张培强<sup>1</sup>, 伍小平<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 力学与机械工程系, 安徽 合肥 230027;

2. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 对铁磁橡胶在外磁场作用下所产生的驱动力与特征尺寸的关系进行了分析, 并研究了采用铁磁橡胶执行器驱动微型游泳机器人的原理与方法。尺度效应分析表明, 将 FMP 微机器人从 cm 级尺寸减小到 mm 级尺寸是可行的。这一结果为进一步研制进入人体血管的微机器人奠定了理论基础。

**关键词:** 微机器人; 尺度效应; 游泳机器人; 微执行器

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A

## 1 引言

微电子机械系统(MEMS)技术<sup>[8]</sup>的发展使人类的操作和感知能力拓展到 nm、 $\mu\text{m}$  空间, 将使传统机械产生革命性的变化。近十几年来世界各国竞相发展 MEMS 技术, 研制各种微型机械和系统, 微机器人就是其中的典型。微机器人在工业、航天、医疗等领域都具有广泛应用前景, 各国在此领域都投入了大量的人力物力, 并取得了令人瞩目的成果。1991 年日本科学家 FUKUDA 等人用巨磁致伸缩(GMA)材料制作了  $40\text{mm} \times 10\text{mm} \times 2\text{mm}$  的微型管道机器人, 在交变磁场的激励下能够实现前进和后退<sup>[1]</sup>。1994 年 FUKUDA 又用 PZT 材料制作了微型水下机器人<sup>[2]</sup>。日本 Shuxiang Guo 用离子导电聚合物膜(Ionic Conducting Polymer Film, ICPF)材料制作的微型水下机器人, 当外加电压控制信号时, 可以实现在水中运动<sup>[3]</sup>。日本东京大学 Takashi YASUDA 等人用单晶硅材料加工微型蚂蚁, 尺寸为  $1.5\text{mm} \times 0.7\text{mm}$ , 在超声场的作用下, 实现前进和转向运动<sup>[4]</sup>。我国上海交通大学采用微型马达制作出微型直升飞机, 上海大学采用压电驱动器制作出微型管道机器人等<sup>[5]</sup>。

本文作者研制了一种新型的智能材料——铁磁橡胶(Ferromagnetic Polymer, FMP), 并采用这种材料制作出尺寸为  $15\text{mm}$  长、 $10\text{mm}$  宽、 $3\text{mm}$  厚的无线驱动微型游泳机器人<sup>[6]</sup>。该机器人可

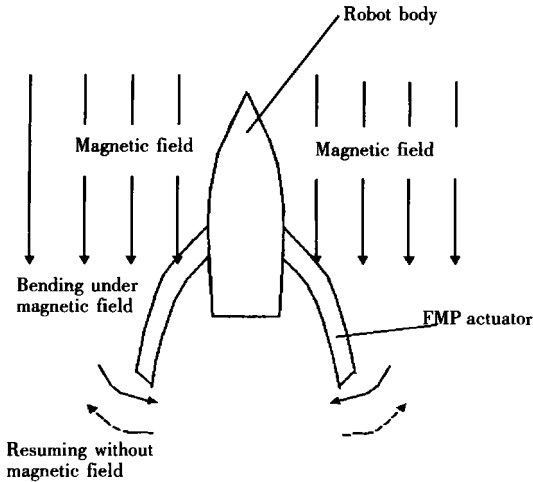
以在外加磁场驱动下运动, 通过改变磁场的强度和频率能够控制机器人在水槽中前进或后退。但是该机器人还是一个原理样机, 其尺寸与进入人体血管所允许的最大尺寸  $1\text{mm} \sim 2\text{mm}$  还有很大距离。那么将尺寸缩小到 mm 级之后, 该机器人能否正常工作呢? 本文将通过对铁磁橡胶执行器驱动力和微型游泳机器人动力学进行尺度效应分析, 探讨采用铁磁橡胶执行器驱动毫米级游泳机器人的可行性。

## 2 工作原理

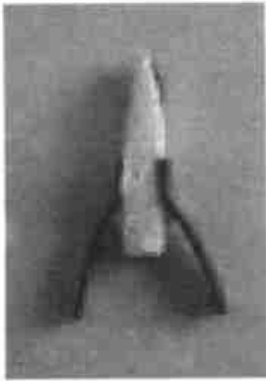
铁磁橡胶(FMP)是含有纯铁粉颗粒的硅橡胶, 其制备方法是首先将粒度为  $5\mu\text{m}$  的还原铁粉与硅橡胶粘合剂按一定比例均匀混合, 然后置于模具中在室温下固化 48hr, 最后将已固化的样品切割成所需形状, 即可用于制作执行器。由于 FMP 含有纯铁粉, 因此具有软磁特性, 即可以被磁场磁化, 产生磁吸引力, 当磁场撤消后又能基本恢复无磁性状态。同时, FMP 的基材是硅橡胶, 具有较好的柔软性和弹性, 在外力作用下会发生较大的变形, 外力撤消后又能恢复原状。

利用 FMP 的软磁特性和机械弹性可以制作磁场驱动执行器, 用于无线驱动微型游泳机器人。微机器人基体采用具有大浮力的泡沫塑料制作, 并将两片 FMP 材料加工成扁平条状, 以一定的角度对称粘贴在基体两侧(图 1)。当微机器人处于匀强磁场中时, 每个 FMP 执行器如同一个两

执极电动机的转子一样,受到使其沿磁力线方向排列的转矩。由于 FMP 执行器的一端固定在微机器人基体上,此时微执行器等效于一个悬臂梁系统,在磁力的作用下,微执行器会发生弯曲。当磁场撤消时,微执行器由于自身的弹力作用,向相反方向运动。当再一次施加匀强磁场时,微执行器重复上述动作。反复不停地提供脉冲磁场,微执行器就被磁场激励得来回摆动,并在水中产生推进力。



(a) Working principle.



(b) Photograph

Fig. 1 FMP swimming microrobot.

### 3 尺度效应

在尺度分析中通常采用特征尺寸  $L$  来表征物体的大小,该物体正好可以被包容在边长为  $L$  的正方体中。当特征尺寸  $L > 1\text{mm}$  时,体积力起主导作用,这时要求的驱动力  $F \propto L^3$ 。当特征尺寸  $L \leq 1\text{mm}$  时,表面力起主导作用,这时要求

的驱动力  $F \propto L^2$ 。通常执行器所产生的驱动力都与  $L$  无关,当执行器的尺寸发生变化时,驱动力也发生相应的变化。因此我们将首先研究微执行器的尺度效应,然后再考虑微机器人的尺度效应。

根据步进电机的转矩方程,得到 FMP 执行器在磁场下受到的转矩为

$$M = -2 \left( \frac{B}{\mu_0} \right)^2 h G \sin 2\theta \quad (2)$$

其中  $\mu_0$  为真空中的磁导率,  $h$  为微执行器的宽度,  $G$  为与微执行器的形状和磁导率有关的常数,  $\theta$  为执行器与磁场方向的夹角。 $\mu_0$ 、 $\theta$  与尺度无关,  $h \propto L$ , 同时我们假设  $G$  与微执行器的导磁面积成正比,而与导磁长度成反比,即  $G \propto L$ 。因此,  $M \propto L^2$ 。

微执行器在磁场作用下产生变形的挠曲线方程为:

$$y = -\frac{B^2 h G}{10l^3 \mu_0^2 EI} (2x^5 - 5lx^4 + 10l^3 x^2) \cdot \sin 2\theta \propto L \quad (2)$$

其中,  $EI$  为梁的抗弯刚度。微执行器在水中划动所产生的推进力由下式表示<sup>[7]</sup>

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A \dot{y}^2 \theta \propto L^4 \quad (3)$$

其中,  $C_d$  为拉力系数,  $\rho$  为水的密度,  $A$  为微执行器划水面的面积,  $\dot{y}$  ( $\propto L$ ) 为位移对时间的导数,即划动速度。

当微机器人完全潜入水中,不受水表面张力影响时,由机器人的运动方程  $F = ma$  得到,  $a \propto L$ , 即机器人的运动加速度与机器人尺度存在线性关系。

当微机器人在水面上游动时,水的表面张力 ( $F_s \propto L^2$ ) 对机器人运动起到阻力作用,该阻力与尺度的关系比推进力低两个数量级。因此随着微机器人尺寸的减小,驱动力下降的速度比阻力下降的速度快得多。这样当尺寸减小到一定程度之后,微机器人将被表面张力冻结,不能产生前进动力。

### 4 初步实验

图 2 为微机器人实验系统示意图。该系统包括微机器人、螺线管、激励电路和水槽四部分组成。实验中将微机器人放置在匀强磁场中的水槽

中。匀强磁场由螺线管产生, 螺线管中间有 200mm 的区域基本上为匀强磁场区。水下微机器人在该区段才能够避开磁场引力作用, 而靠微执行器的摆动实现前进和后退。激励电路由振荡电路、放大电路和整形输出电路组成。振荡电路用来产生频率连续可调的交变电流信号。放大电路将信号的正半周波形进行放大, 以达到所需的电流强度。整形输出电路实现将放大器的输出信号进行整形, 产生所需要的波形, 如方波脉冲信号、三角波信号、正弦波信号和锯齿波信号等。

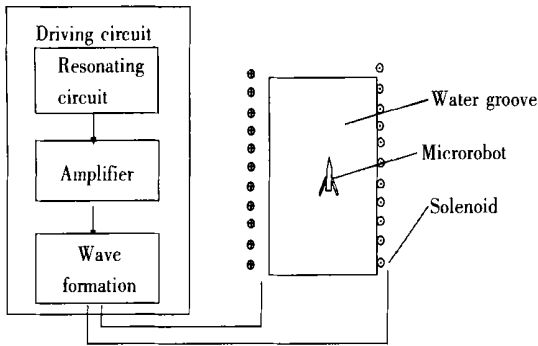


Fig. 2 Experimental set up of the microrobot.

为了便于测量微执行器和微机器人运动参数, 实验中将微执行器制作成长 10mm、宽 3mm、厚 1mm, 微机器人总体尺寸为长 20mm、宽 14mm、厚 5mm, 微执行器和外加磁场方向的夹角  $\theta$  为  $45^\circ$ 。将微机器人螺线管中注满水的水槽后, 调整激励频率, 这时一对微执行器在磁场力和自身弹性力的作用下相对来回摆动, 驱动机器人在

#### 参考文献:

- [1] Fukuda T, Hosokai H, Ohyama H, et al. Giant magnetostrictive alloy (GMA) applications to micro mobile robot as a micro actuator without power supply cables[A]. Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop[C]. Nara, Japan, 1991, 210- 215.
- [2] Fukuda T, Kawamoto A, Arai F, et al. Mechanism and swimming experiment of micro mobile robot in water[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. San Diego, California, 1994, 814- 819.
- [3] Guo S, Fukuda T, Nakamura T. Micro active guide wire catheter system characteristic evaluation, electrical model and operability evaluation of micro active catheter[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis[C]. Minnesota, April, 1996, 2226- 2231.
- [4] Yasuda T, Shimoyama I, Miura H. Microrobot actuated by a vibration energy field[A]. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Solid state Sensors and Actuators[C]. Yokohama, Japan, 1993, 42- 45.
- [5] Gong Z, Tan M, Wang T. Some of research and development on micro robotics and systems in China[A]. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop on Micro Robotics and Systems[C]. Beijing, China, 1998, 1- 13.
- [6] Mei T, Chen Y, Kong D, et al. A microrobot driven by ferromagnetic polymer (FMP) actuators[A], 1<sup>st</sup> Korea China Joint Workshop on Robotics[C], Pohang, Korea, May, 2001, 19- 21.

水中游动。当激励频率与微执行器的固有频率相同时, 微执行器的振幅达到最大, 产的推进力也最大(图 3)。

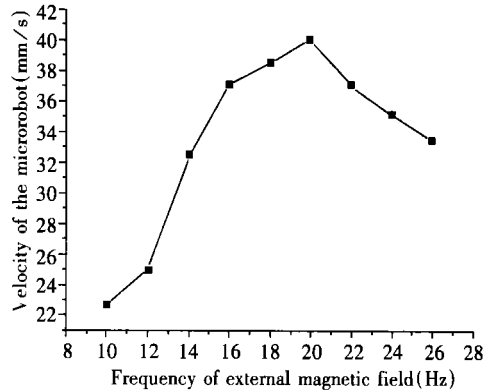


Fig. 3 Velocity of the microrobot vs. magnetic field frequency.

## 5 结 论

通过本项研究得到以下三点结果: (1) FMP 执行器在磁场下受到的转矩  $M \propto L^2$ , 产生的推进力  $F \propto L^4$ ; (2) 当微机器人不受水面张力影响时, 机器人的运动加速度  $a \propto L$ , 速度  $v \propto L$ , 即当微机器人的尺寸由现在的 10mm~ 20mm 减小到 1mm~ 2mm 时, 微机器人的运动速度将减小到 4mm/s; (3) 当微机器人受到水的表面张力作用时, 随着尺寸的减小, 驱动力下降的速度比阻力下降的速度快两个数量级, 这样尺寸减小到 1mm~ 2mm 时, 微机器人将可能被表面张力冻结。因此, 得到的结论是: 全浸入式游泳微机器人能够将尺寸减小到 mm 级。

- [7] Fukuda T, Kawamoto A, Arai F, et al. Steering mechanism of underwater micro mobile robot[ A] . Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[ C] . Aichi, Japan, 1995, 363- 368.
- [8] 周兆英, 叶雄英, 崔天宏, 等. 微米纳米技术及微型机电系统[ J] . 光学 精密工程, 1998, 6(1): 1- 7.

## Scaling Effect of FMP Actuator and Swimming Microrobot

MEI Tao<sup>1</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>, ZHANG Per qiang<sup>1</sup>, WU Xiaoping<sup>1</sup>

(1. *Department of Mechanics and Mechanical Engineering,*

*University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;*

*2. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)*

**Abstract:** The driving force and the scaling effect of ferromagnetic polymer (FMP) acutators are analyzed. The operation principle of the microrobot driven by FMP actuators is studied. Through scaling effect analysis, the possibility of scaling down the microrobot from centimeter size to millimeter size is proven. The result provides a theoretical base for developing FMP microrobots swimming in human blood vessel.

**Key words:** microrobots; scaling effects; swimming robots; microactuators

作者简介: 梅 涛(1962-), 男, 江西人, 研究员。1982年毕业于浙江大学精密机专业, 现在中国科学院合肥智能机械研究所从事科研工作, 并为中国科学技术大学在职博士生。主要研究方向是微电子机械系统、机器人、传感器。

E-mail: tmei@mail.iim.ac.cn