



北京航空航天大学  
BEIHANG UNIVERSITY

# “冯如杯”创意大赛论文

超磁致伸缩材料

在微型机器人设计中的应用

# 超磁致伸缩材料 在微型机器人设计中的应用

## 摘要

磁致伸缩材料在磁场作用下，其长度发生变化，在交变磁场作用可发生反复伸长与缩短，而超磁致伸缩材料的磁致伸缩系数是一般磁致伸缩材料的 1000 倍左右。根据超磁致伸缩材料良好的磁致伸缩特性，通过改变磁场大小，可以精确控制机器人动作的角度、位移以及行进的步幅大小，交变磁场可迅速改变机器人肢体的形变，使动作连贯起来，机器人即可运动，同时控制交变磁场的频率，可以精确控制机器人的行进速度。

**关键词：**超磁致伸缩材料；磁致伸缩；微型机器人

## **Abstract**

It is known that the length of magnetostrictive material changes under the action of magnetic field, and if the magnetic field is alternating, the material repeats elongating and shortening. Giant magnetostrictive materials (GMM) have a magnetostriction coefficient about 1000 times more than that of common magnetostrictive materials. According to the excellent magnetostrictive properties of the GMM, the perspective of robot movement may be precisely controlled by means of changes in the magnitude of magnetic field as well as its displacement and the size of the stride width. By the alternating magnetic field, robot limb could get rapidly deformed causing its movement coherent and making the robot to move. Meanwhile, by controlling the alternating magnetic field frequency, the traveling speed of robot may be accurately commanded.

**Key words:** Giant Magnetostrictive Materials; Magnetostrictive; Micro Robot

# 目录

引言 .....	1
设计方案 .....	2
1 方案一： $\pi$ 型微小机器人 .....	2
1.1 创意来源 .....	2
1.2 项目方设计方案 .....	2
1.3 行进原理 .....	3
1.4 创意可行性分析 .....	4
2 方案二：可行进仿人类微型机器人 .....	5
2.1 创意来源 .....	5
2.2 项目设计方案 .....	5
2.3 行进原理 .....	5
2.4 创意可行性分析 .....	6
3 方案三：水下球状微型机器人 .....	6
3.1 创意来源 .....	6
3.2 项目设计方案 .....	7
3.3 行进原理 .....	7
3.4 创意可行性分析 .....	8
应用前景 .....	8
参考文献 .....	9

## 引言

1842 年, 焦耳发现沿轴向磁化的铁棒长度会发生变化, 这种现象就称为磁致伸缩效应, 又称为焦耳效应。磁致伸缩现象即磁性体在磁场中磁化时, 会沿着磁化方向发生微量的伸长或缩短的现象。稀土铁合金的磁致伸缩量可达到  $10^{-3}$  数量级, 比普通磁性材料(铁、镍等)大 3 个数量级, 这种能在室温弱磁场下产生超高磁致伸缩的磁性材料称为超磁致伸缩材料。超磁致伸缩材料是一种新型高效的磁(电)—机械能转换材料, 具有磁致伸缩应变大、强力、机电耦合系数高、响应速度快等优异特性, 是制作检测和执行元器件的优良材料<sup>[1]</sup>。为此, 从其诞生开始, 便引起了工业界的重视, 并已在理论建模、动静特性研究、新器件开发与应用等方面取得了重要进展。已广泛地应用于减震、阀门控制、微定位、机械传动机构、振动器、传感器等方面, 应用面涉及航空航天<sup>[2]</sup>、国防军工、电子、机械、石油、纺织、农业等诸多领域, 大大促进了相关产业的技术进步。

Quandi 等人根据超磁致伸缩薄膜材料 (GMF) 应变大、频响快、滞后小且驱动磁场低等特点, 首先采用 GMF 作为驱动器研制了微型泵、微型阀、线性超声波电机, 随后又利用薄膜振动的原理研制出一种直线超声马达。日本 Honda 等人利用正负磁致伸缩复合膜设计了一个微行走机械。Moon 等人采用 TbFe-Si-SmFe 薄膜制作了一个悬臂梁型光纤开关, 可实现一维光路的切换。Bouroulna 等人利用 TbDyCoFe<sup>[3]</sup>薄膜设计了一个二维微扫描器。大连理工大学张永顺教授等人研制了以超磁致伸缩薄膜仿鱼尾鳍的无电缆驱动游动微型机器人, 实验表明具有良好的驱动性能<sup>[4,5]</sup>。

普通磁致伸缩材料		超磁致伸缩材料	
材 料	饱和磁致伸缩系数	材 料	饱和磁致伸缩系数
NiP	$40 \times 10^{-6}$	TbFe <sub>2</sub>	$1.753 \times 10^{-3}$
Fe	$-60 \times 10^{-6}$	Tb-30%Fe	$1.590 \times 10^{-3}$
Co	$-9 \times 10^{-6}$	SmFe <sub>2</sub>	$-1.560 \times 10^{-3}$
Co-40Fe	$70 \times 10^{-6}$	Tb(CoFe) <sub>2</sub>	$1.478 \times 10^{-3}$
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	$60 \times 10^{-6}$	Tb(NiFe) <sub>2</sub>	$1.151 \times 10^{-3}$
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	$-26 \times 10^{-6}$	TbFe <sub>3</sub>	$6.93 \times 10^{-4}$
CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	$-110 \times 10^{-6}$	DyFe <sub>2</sub>	$4.33 \times 10^{-4}$
Fe-13Al	$40 \times 10^{-6}$	Pr <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	$3.36 \times 10^{-4}$
Fe 系非晶态	$(30 \sim 40) \times 10^{-6}$	非晶态 TbFe <sub>2</sub>	$3.08 \times 10^{-4}$
vibrocs	$-28 \times 10^{-6}$		

表 1 磁致伸缩系数对比表

微型机器人是结构尺寸微小、器件精密、可进行微细操作的机器人, 80 年代末开始研究, 现已成为微机电系统研究开发的重要分支。由于它具有惯性小, 响应时间短, 集约高技术成果, 附加值高等特点, 使其在生物医学、航空航天、军事等各方面显示出广阔的应用前景。在工业领域中, 尤其是对那些人类无法进入的危险或狭窄区域, 如航天飞机、导弹、核动力工厂、石油化工厂和热交换站等的大量管道的探伤、维护和维修等领域十分需要管道内微机器人; 在医疗领域

中,为避免不必要的手术开口,实现体内诊疗技术的少创和无创目标,研制适于人体环境作业的微小机器人就显得十分必要。

超磁致伸缩薄膜采用非接触式驱动,具有响应频率快、位移变形大等优点,在微型机器人的研究领域具有广阔的应用前景。经过比较,本文选用超磁致伸缩材料中的 Tb-Fe 薄膜、Sm-Fe 薄膜和 Terfenol-D ( $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ ) 棒材,设计了 3 种微型机器人的方案。

## 设计方案

### 1 方案一： $\pi$ 型微小机器人

#### 1.1 创意来源

20 世纪 80 年代,日本东北大学电气通信研究所的荒井贤一教授等人利用正负磁致伸缩复合膜设计了一个微行走机械<sup>[6]</sup>(如图 1)。在厚  $7.5\mu\text{m}$  的聚酰亚胺基片上、下各镀一层  $1\mu\text{m}$  的分别具有正、负磁致伸缩效应的 Tb-Fe 和 Sm-Fe 超磁致伸缩薄膜。基片两端是倾斜的腿,用来支撑和行走。此微型行走机械可向前或向后运动。当外加磁场为 500 Oe,激励频率为 70 Hz 时,其向前行走的速度能达  $65\text{mm/s}$ 。该行走机械不仅可在管道中,而且还可在平面上、水中、天棚上行走。

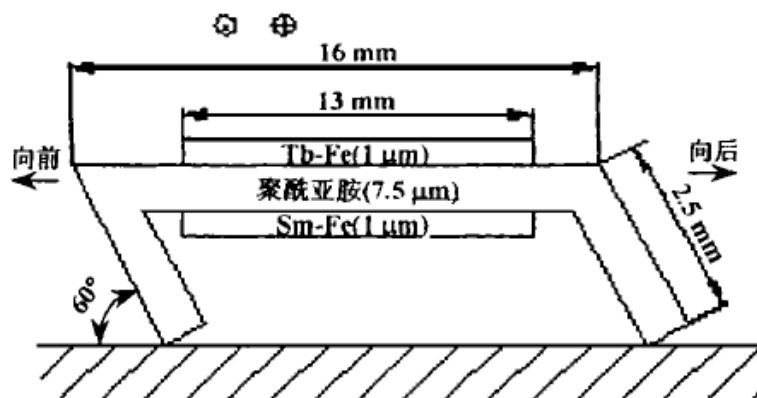


图 1 微行走机械截面图

由此我们想到,若在该机械的右腿上再镀上正负磁致伸缩复合膜,那么就可以提高其行走速度,因此我们对这种微行走机械进行了改进,设计了一种 $\pi$ 型微机器人。

#### 1.2 项目方设计方案

机器人设计图如图 3 状态一所示,基片选用聚酰亚胺材料,聚酰亚胺具有优良的机械性能,均苯型聚酰亚胺的薄膜(Kapton)为 170MPa 以上,而联苯型聚酰亚胺(Upilex S)达到 400Mpa,而聚酰亚胺工程塑料的弹性模量通常为 3—4GPa,纤维可达到 200GPa,据理论计算,均苯四甲酸二酐和对苯二胺合成的纤维可达

500GPa, 仅次于碳纤维。聚酰亚胺基片厚  $7.5\ \mu\text{m}$ , 横梁长 30mm, 两腿长 10mm, 在横梁上方和右腿的右侧各镀一层厚  $1\ \mu\text{m}$  的具有正磁致伸缩效应的 Tb-Fe 薄膜, 在横梁下方和右腿的左侧各镀一层厚  $1\ \mu\text{m}$  的具有负磁致伸缩效应的 Sm-Fe 薄膜。右腿下方设计成圆弧形, 加工时增大其粗糙度, 以增大与地面的摩擦系数, 左腿下方设计成圆角过渡, 打磨光滑, 尽量减小与地面的摩擦系数。

### 1.3 行进原理

超磁致伸缩薄膜具有以下特性: 当在超磁致伸缩薄膜的长度方向外加磁场时, 产生正磁致伸缩的 Tb-Fe 薄膜伸长, 而产生负磁致伸缩的 Sm-Fe 薄膜缩短, 横梁便向上凸起; 而当在其横向加磁场时, 产生正磁致伸缩的 Tb-Fe 薄膜缩短, 而产生负磁致伸缩的 Sm-Fe 薄膜伸长, 横梁则向下凹陷<sup>[7]</sup>。

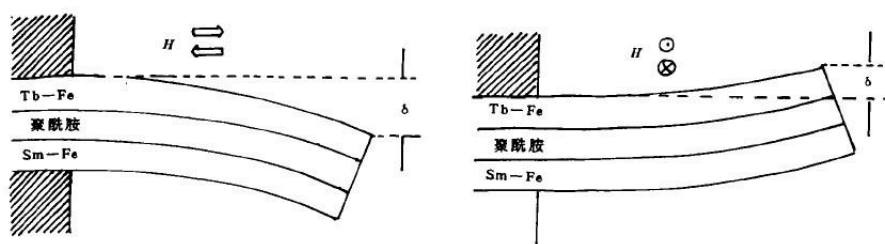


图 2 不同磁场下两种超磁致薄膜的形变

根据超磁致伸缩薄膜的以上特性, 可以给机器人加如图 3 所示的横向磁场, 实现其行进。

状态一: 未加磁场时的静止状态, 如图 3 中状态一所示。

状态二: 在如图 3 的横向磁场作用下, 产生正磁致伸缩的 Tb-Fe 薄膜缩短, 而产生负磁致伸缩的 Sm-Fe 薄膜伸长, 带动聚酰亚胺横梁下凹, 右腿向左弯曲, 产生如图 3 中状态二的形变, 此时右腿向右前进了一段距离;

状态三: 此时撤去磁场, 形变消失, 由于左腿下方镀了一层铝, 右腿与地面接触处的摩擦系数比左腿与地面接触处的摩擦系数大, 所以形变消失后机器人会以右腿为支点恢复至静止状态的形状, 此时机器人就整体向右前进了一段距离, 如图 3 中状态三所示。

设置合适的磁场频率就可以使机器人连续行进，这种 $\pi$ 型微小机器人也可在管道中、平面上、水中、天棚上行走，预期行进速度可以高于日本荒井贤一教授的设计。

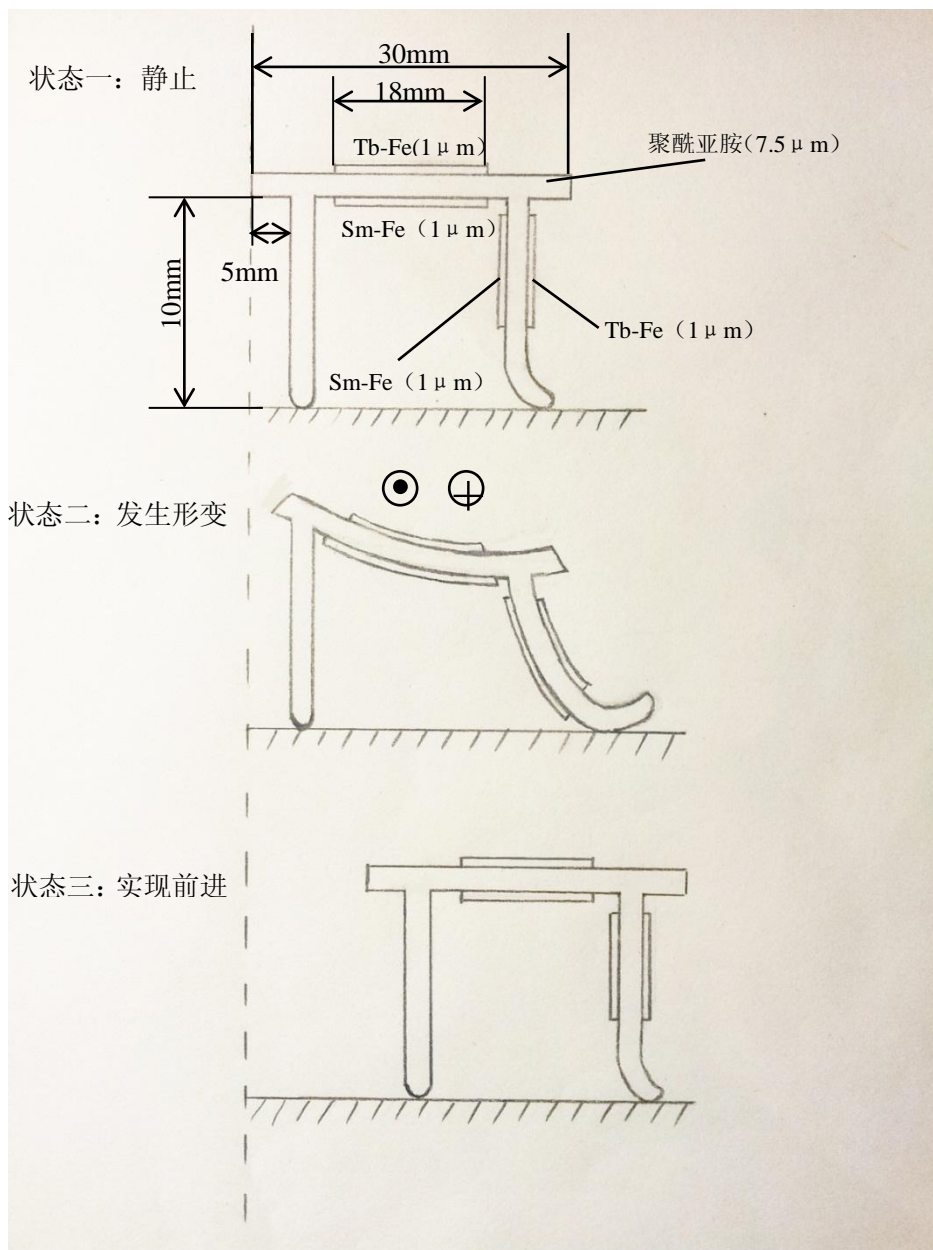


图 3  $\pi$ 型微小机器人设计图及原理图

#### 1.4 创意可行性分析

此方案的创新点在于在前人设计的基础上改进而来，预期可以实现更快的行进速度。这一方案在理论上是是可以实现的：在材料选用方面，超磁致伸缩薄膜作为一种新型的功能材料，具有较强的驱动能力，且重量轻、易于微型化；在实施条件方面，这种 $\pi$ 型微小机器人的设计从前人设计的基础上改进而来，借助外加磁场实现能源供给，利用超磁致伸缩薄膜的磁致伸缩特性来实现微型机器人的无缆驱动，理论上可以实现；在加工工艺方面，聚酰亚胺薄膜用氧气进行反应性离子蚀刻而成，其弹性模量小，热稳定性高，基片上面用射频磁控溅射法镀上超磁



致伸缩薄膜。这一方案的技术难点主要在于需要反复调节合适的磁场大小及频率来达到理想的行进速度，并需进行复杂的力学分析及计算来测试并提高其行进过程的平衡性，同时需要进行大量实验来测试其尺寸设计的可行性，并需根据实际应用场合调整其尺寸大小和磁场设置方式。

## 2 方案二：可行进仿人类微型机器人

### 2.1 创意来源

方案一中的微型机器人可实现横向行进，由此我们想到可以用超磁致伸缩薄膜模拟人的肌肉，通过磁致伸缩来带动机器人的肢体产生简单的动作，并进一步实现类似人类正常行走模式的向前行进。

### 2.2 项目设计方案

整体设计图如图 4，各部分的长宽尺寸如图所示，各部分厚度均为 7.5mm，如图 5 为腿部侧面放大图，在左腿的前侧上部与后侧下部和右腿的前侧下部与后侧上部各镀一层 Sm-Fe 薄膜，在左腿的前侧下部与后侧上部和右腿的前侧上部与后侧下部各镀一层 Tb-Fe 薄膜，长度均为 15mm，厚度均为 1mm。机器人肢体采用聚酰亚胺材料制作，躯干和脚为空心，内置机器人控制芯片与电池，在两腿上下两端的躯干和脚内各固定两块尺寸合适的缠有线圈的小磁铁，两小磁铁的线圈在机器人外部联通并与外界绝缘，通过计算机或遥控器控制芯片工作，从而控制电流大小、方向及通断。

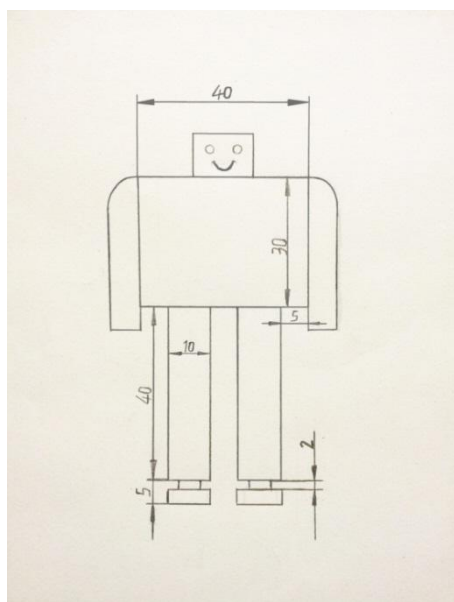


图 4 可行进仿人类微型机器人设计图

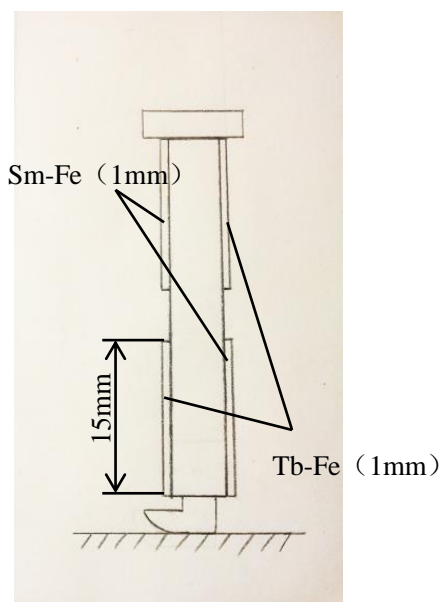


图 5 腿部侧面放大图

### 2.3 行进原理

状态一：给左腿磁铁通电，在超磁致伸缩薄膜的长度方向加上磁场，则左腿

前侧上部和后侧下部的 **Sm-Fe** 薄膜缩短，左腿前侧下部和后侧上部的 **Tb-Fe** 薄膜伸长，带动机器人左腿抬起悬空，以右腿为支撑，即改变为如图 5 的状态；

状态二：给右腿磁铁通电，在超磁致伸缩薄膜的长度方向加上磁场，则右腿前侧下部和后侧上部的 **Sm-Fe** 薄膜缩短，右腿前侧上部和后侧下部的 **Tb-Fe** 薄膜伸长，带动机器人右腿产生如图 6 的变形，此时机器人两脚均着地，机器人已向前跨出了一步；

状态三：撤去左腿的磁场，则超磁致伸缩薄膜恢复原长，使左腿恢复原状，机器人以左腿为支撑，右脚在后方悬空，如图 7 所示；

状态四：再撤去右腿磁场，则机器人恢复到如图 5 的静止直立状态，然再重复状态一，如此循环下去，理论上可实现机器人的向前行进。

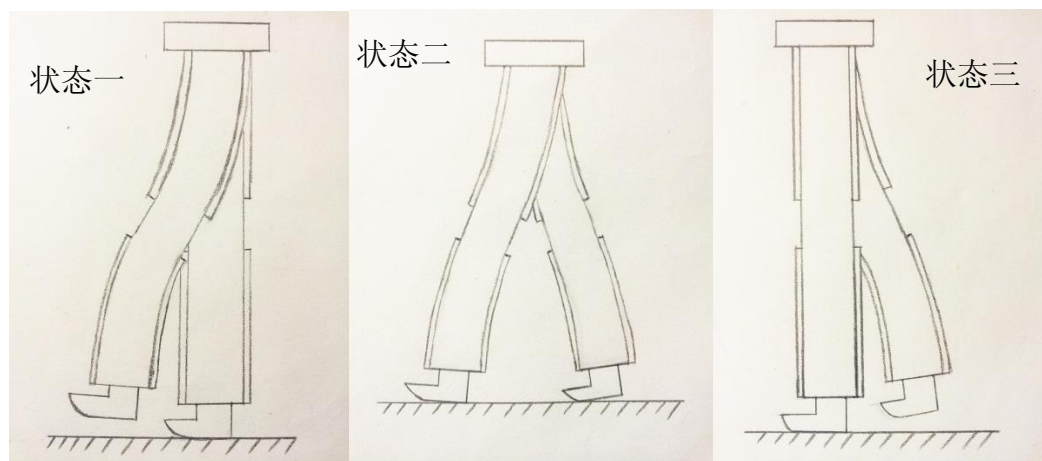


图 4 状态一：左腿抬起

图 5 状态二：两腿着地

图 6 状态三：后腿悬空

## 2.4 创意可行性分析

这一方案的创新点在于根据仿生学原理，利用超磁致伸缩薄膜模拟人体肌肉，通过其在磁场中的伸缩模拟人体肌肉的舒张和收缩，实现机器人拟人化的向前行进。利用正负超磁致伸缩材料在同一磁场下形变相反的特性使机器人的肢体弯曲，实现各个简单动作；利用超磁致伸缩材料响应速度快的特点，控制磁场的有无使超磁致伸缩材料瞬间变形与恢复，可使动作连贯起来，实现机器人的行进。通过计算机或遥控器控制芯片改变电流产生交变磁场，并且可以控制磁场大小、频率，进而精确控制机器人行进的步幅和步速。这一方案在理论上是可行的。

技术难点主要在于要通过精确的力学分析建模提高机器人的平衡性与稳定性，且需要大量试验来测试磁场的最佳大小与最佳频率，从而实现行进速度与稳定性的最佳结合。同时也需要根据实际应用场合调整其尺寸大小。

## 3 方案三：水下球状微型机器人

### 3.1 创意来源

2006 年，大连理工大学张永顺教授等人研制了一种超磁致伸缩薄膜尾鳍机器人，根据仿生学原理，采用超磁致伸缩薄膜驱动器模仿鱼类的波状推进方式，

实现了机器人的无缆驱动。基于此，我们设计了一种预期可实现在水下任意方向自由运动的球状微型机器人。

### 3.2 项目设计方案

整体方案设计的三视图如图 9 所示，在半径 50mm 的聚酰亚胺空心球体相互垂直的三个方向上各安置 4 根直径 8mm，长 30mm 的 Terfenol-D ( $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ ) 棒，棒的截面圆心在距球心 25mm 处，并在各方向上互成  $90^\circ$  均匀分布，棒外缠绕导线并固定防水塑料外壳，且设置偏置磁场使其在正磁场作用下伸长，负磁场作用下缩短。各个棒的末端连有一半径为 17mm 的圆形双层涤纶(PET)纤维织物，两层中间安置 8 根有机玻璃(PMMA)辐条，且在棒与辐条连接处设计凹槽使辐条活动角度在  $90^\circ$  范围内，类似雨伞设计，作用类似游泳时的脚蹼。聚酰亚胺空心球体内放置电池及芯片，用计算机或遥控器远程控制电流。

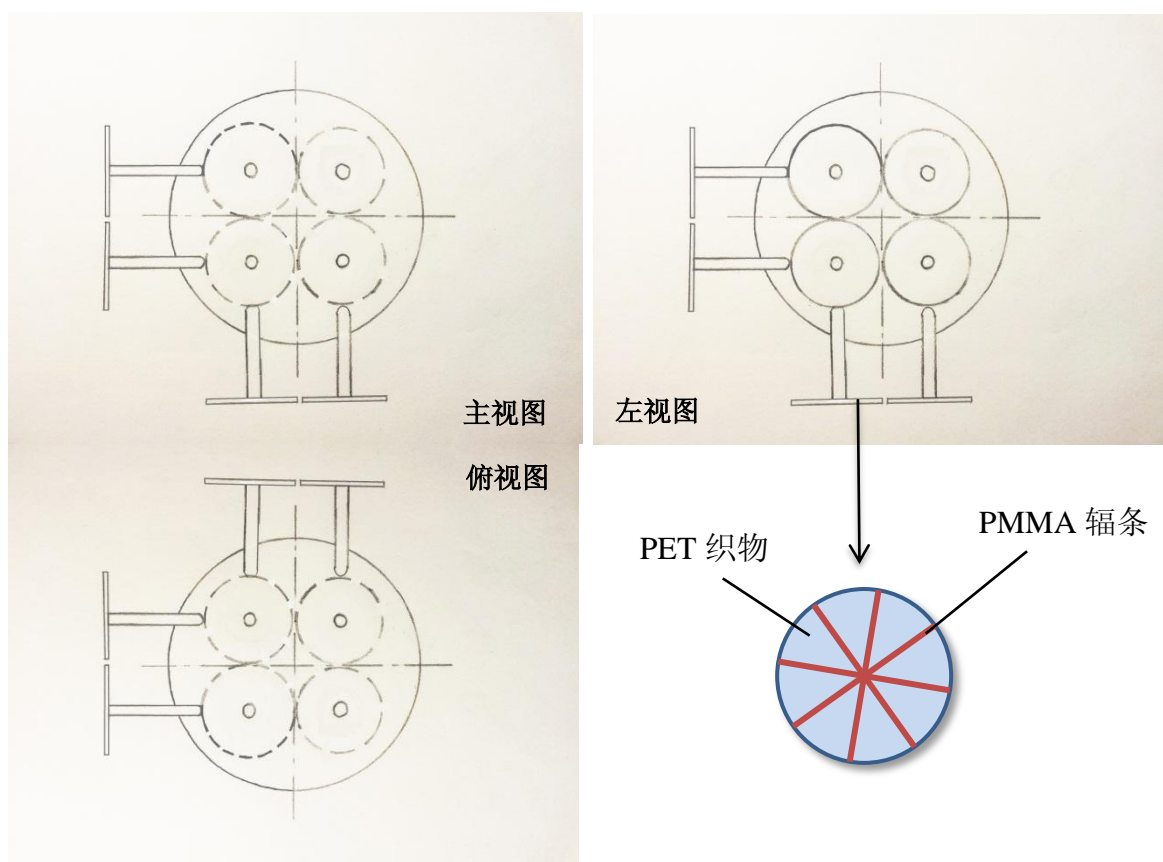


图 7 水下球状微型机器人设计图

### 3.3 行进原理

计算机或遥控器控制芯片给 Terfenol-D 棒施加正磁场使其伸长，PET 织物展开，受到的水的推力，机器人前进，前进过程中撤去磁场，Terfenol-D 棒缩短，对 PET 织物施加拉力使其收起（类似雨伞收起状态），此时水的阻力也帮助使织物收起，减小由薄膜面积太大造成的水的阻力。在球体相互垂直的三个方向上设置的 4 根可控的 Terfenol-D 棒，可增大动力，且实现三维方向上的行进，球形设计减小阻力。同时分别控制任意某个棒的伸长或缩短，实现机器人的转弯，因此

可实现水下任意方向的自由运动。而且控制磁场大小和频率可以精确控制机器人的前进速度。

### 3.4 创意可行性分析

这一方案的创新点在于设计了一种新型的可在水下工作的球状微型机器人，并可实现水下三维空间内任意方向的自由运动。Terfenol-D 性能良好，是 20 世纪 70 年代被发现的新型稀土超磁致伸缩材料，其饱和磁致伸缩应变很大，能量密度高，磁机械耦合系数大，且 Terfenol-D 工作到居里温度以上只会使其磁致伸缩特性暂时消失，冷却到居里温度以下，其磁致伸缩特性可完全恢复，故无过热失效问题。理论上这一方案可以实现。技术难点主要在于如何保证其稳定性和防水性，同时，需要进行大量实验测试所加磁场的最佳大小和最佳频率。另外，水下环境复杂，要采取适宜的防腐蚀措施，且需要实际测试发现问题。

## 应用前景

方案一的 $\pi$ 型微小机器人可用于地面微型区域探测如管道探伤、维护和维修；方案二的可行仿生人类微型机器人是超磁致伸缩材料在仿生领域的探索，未来可在生物医学方面有所应用；方案三的水下球状微型机器人可用于水下探测及液体中的探测，如深海测绘等领域。

微型机器人具有惯性小，响应时间短，集约高技术成果，附加值高等特点，超磁致伸缩材料可采用非接触式驱动，具有响应频率快、位移变形大等优点。将超磁致伸缩材料应用在微型机器人中，可实现微型机器人动作和位移的精确化，驱动方式的简单化和微型化，使机器人能够轻易到达人类所到达不了的微型区域和特殊地点，完成人类无法自己完成的特殊任务，如管道探测、深海测绘等，在生物医学、航空航天、军事等各方面显示出广阔的应用前景，在工业领域中，尤其是在工业领域中那些人类无法进入的危险或狭窄区域，如航天飞机、导弹、核动力工厂、石油化工厂和热交换站等的大量管道的探伤、维护和维修等领域。

## [参考文献]

- [1]宣振兴, 郭义杰, 王慧忠, 张雷. 超磁致伸缩材料发展动态与工程应用研究现状[J]. 轻工机械, 2011,29(1).
- [2]蒋成保, 宫声凯, 徐惠彬. 超磁致伸缩材料及其在航空航天工业中的应用[J]. 航空学报, 2000,(s1).
- [3]崔跃, 蒋成保, 徐惠彬. Tb-Dy-Fe-Co 合金本征磁致伸缩性能[J]. 金属学报, 2011,47(2).
- [4]张永顺, 李海亮, 王惠颖, 刘巍, 贾振元. 超磁致伸缩薄膜尾鳍机器鱼的仿生游动机理[J]. 机器人, 2006,28(2).
- [5]张永顺, 李海亮, 刘巍, 贾振元. 超磁致伸缩薄膜驱动仿生游动微型机器人[J]. 机械工程学报, 2006,42(2).
- [6]Honda T, Arai K I. Driving Principles for Magnetic Thin-Film Cantilevers. Journal of Magnetics Society of Japan,1997,21(4-2) .
- [7]贾振元, 武丹, 杨兴, 郭东明, 郭丽莎. 薄膜型超磁致伸缩微执行器的研究现状[J]. 压电与声光, 2000,22(3).