

超磁致伸缩薄膜尾鳍机器人鱼的仿生游动机理*

张永顺 李海亮 刘巍 贾振元

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

摘要：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，可以实现机器人的无缆驱动，并能显著提高机器人的可靠性与实用性。为了提高推进力，进而提高驱动效率，实现机器人尾鳍形状优化是关键。基于等面积条件，优选了几种薄膜尾鳍形状，在建立悬臂梁结构变断面超磁致伸缩薄膜受迫振动动态模型和机器人推力模型的基础上，对不同形状薄膜尾鳍的推力进行了仿真验证，得出了最佳尾鳍形状曲线，并用有限元法分析了薄膜驱动器的应力分布，最后通过试验验证了薄膜驱动器的推进效果。

关键词：微型机器人 仿生游动 超磁致伸缩薄膜 尾鳍形状优化

中图分类号：TP242.2

0 前言

鱼类经过上亿年的进化，发展了非凡的水中运动能力，它们主要靠身体作横向扭曲、往复摆动，以横波的方式向前推进。其推进方式具有效率高、灵活机动和加速度大等优点^[1]。

根据仿生学原理，在液体内游动的无缆微型机器人模仿鱼类的波状摆动推进方式，更接近于鱼在自然界内游动的情形，可以显著提高推进力和驱动效率。

这里以超磁致伸缩薄膜(GMF)为微型驱动器，研制了无缆微型机器人，其原理是 GMF 在交变驱动磁场的激励下产生振动，通过薄膜与液体的耦合产生反作用力，推动微型机器人游动。

参考文献[2]指出尾鳍作摆动与平动的复合运动，尾鳍的摆动能够产生超过 90% 的推进力，如图 1 所示为尾鳍的结构图，其推进力的大小主要由尾鳍的展弦比 $K(K=b^2/S_c)$ ，其中 b 是尾鳍的宽度，

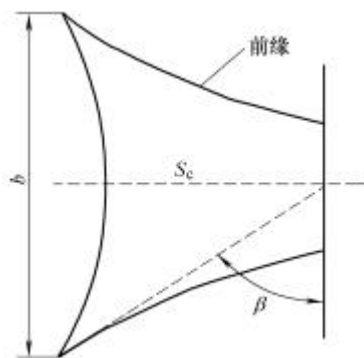


图 1 尾鳍形状

S_c 是尾鳍的表面积)和后掠角 β 等参数决定。在一定范围内，大的展弦比可以提高推进力，因为它可以减小摩擦力。一般尾鳍的形状参数包括后掠角和前缘的曲率。弯曲的前缘有利于减少吸力，避免边界层的分离，从而有利于提高推进力。较高的尾鳍刚度有利于产生较大的推进力，但会对推进效率起到一定的负面影响。

综上所述，为了提高仿生游动微型机器人推力和驱动效率，GMF 尾鳍形状的选择与优化是关键。

在尾鳍面积一定的情况下，尽管大展弦比可以带来推力的提高，但会削弱尾鳍根部的刚度，减小了超磁致伸缩薄膜尾鳍的驱动力矩，进而影响了薄膜的强迫振动振幅，使推力减小，因此二者存在优化问题。

由于变断面超磁致伸缩薄膜尾鳍动态模型的求解比较困难，因而不能顺利求出其谐振频率和强迫振动的响应，而影响优化中的寻优，使其形状优化难度加大。这里的研究目标是模拟鱼类尾鳍的推进机理，在保证尾鳍根部刚度，尾鳍等面积和等长度的条件下，通过薄膜尾鳍的形状优选，达到提高推力和驱动效率的目的。

1 尾部形状参数

研制的微机器人的尾鳍采用双面磁致伸缩薄膜作为驱动器，以 $35\ \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺为基片，基片两面分别溅射 $1\ \mu\text{m}$ 的正磁致伸缩材料 $\text{Tb}_{0.28}\text{Dy}_{0.72}\text{Fe}_{1.93}$ 和负磁致伸缩材料 $\text{SmFe}_{1.95}$ ，在交变磁场的作用下，磁致伸缩薄膜将产生伸缩现象，致使薄膜内部产生应力，带动基片产生反复的偏转和弯曲变形，进而实现薄膜的振动，从而达到驱动的目的^[3]，如图 2 所示， H 为外部驱动交变磁场的施加方向， d 为磁

* 国家自然科学基金资助项目(60275034, 50275021)。20050415 收到初稿，20050915 收到修改稿

致伸缩薄膜端部的弯曲变形。

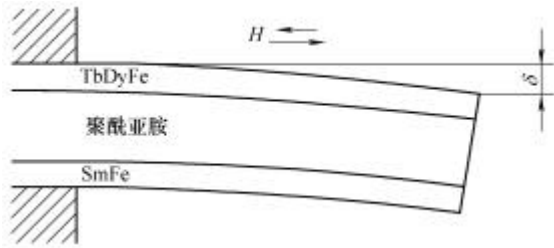


图 2 薄膜变形示意图

以提高推进力为目标，约束条件是尾部表面积为(60 mm × 6 mm)。模仿鱼类尾鳍的形状，增大尾部的展弦比和后掠角以提高推进力。为此减小了尾鳍根部的宽度，增大了后尾部的宽度，并且在等尾鳍根部刚度和等弦长的情况下作优化，在四边形尾鳍的基础上，假设了三种不同曲线形状的尾部，它们具有不同的展弦比和后掠角，如表 1 所示，其弦长 l 在 60 mm 附近，形状如图 3 所示。 x 轴上方曲线由 $b_1(x)$ 表示， $b_1(x)$ 与 $b_2(x)$ 关于 x 轴对称，尾部的总宽度为 $b(x) = 2b_1(x)$ 。

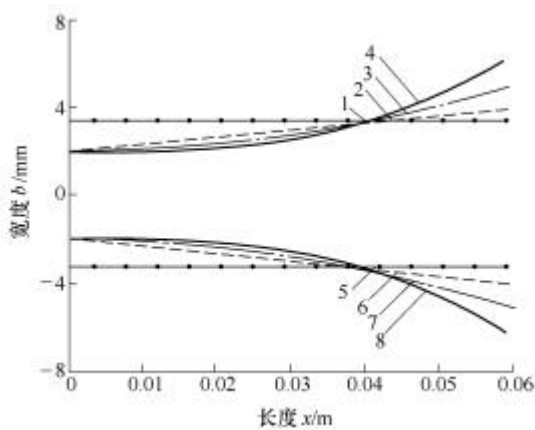


图 3 微机器人尾部形状曲线

- 1. $b_1(x) = 0.003$ 2. $b_1(x) = 0.033x + 0.002$ 3. $b_1(x) = 0.833x^2 + 0.002$
- 4. $b_1(x) = 20x^3 + 0.002$ 5. $b_2(x) = -0.033$ 6. $b_2(x) = -0.033x - 0.002$
- 7. $b_2(x) = -0.833x^2 - 0.002$ 8. $b_2(x) = -20x^3 - 0.002$

表 1 尾部形状参数

尾部曲线函数	弦长 l /mm	翼展 b /mm	展弦比 K	后掠角 β /rad
$b_1(x)=0.033x+0.002$	60.0	8.0	0.178	0.067
$b_1(x)=0.833x^2+0.002$	60.0	10.0	0.278	0.083
$b_1(x)=20x^3+0.002$	59.2	12.2	0.420	0.104

2 薄膜弯曲振动的动力学模型

2.1 磁致伸缩薄膜等效力矩

在磁场作用下，磁致伸缩系数函数表达式为^[4]

$$I(H) = L[1 - \exp(-aH^b)] + kH \quad (1)$$

式中 L, a, b, k ——插补法得到的待定系数

假设磁致伸缩薄膜的应变特性与棒材相同，则磁致伸缩薄膜沿磁场方向的平均内应力为

$$s_m = \pm I E_1 / (1 + m_p) \quad (2)$$

式中， E_1 为磁致伸缩薄膜的弹性模量， m_p 为磁致伸缩薄膜的泊松比， $-$ 表示磁致伸缩薄膜伸长时受到压应力， $+$ 表示磁致伸缩薄膜缩短时受到拉应力。

下面结合悬臂梁结构磁致伸缩薄膜复合梁模型，进行应力分析，以得出磁致伸缩等效驱动力矩。磁致伸缩薄膜结构如图 4a 所示， E_2 为基片的弹性模量。

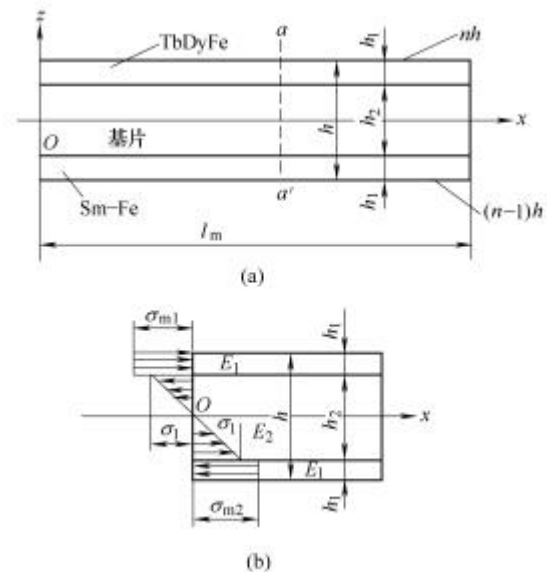


图 4 磁致伸缩薄膜的应力与等效力矩分析

薄膜断面中性层 x 轴的位置可通过式(3)计算^[5]

$$\int_{(n-1)h}^{nh} E(z) z dz = 0 \quad (3)$$

式中 z ——薄膜厚度方向的坐标

$E(z)$ ——关于厚度的弹性模量函数

h 表示薄膜的总厚度， $0 < n < 1$ ， $z = nh$ 、 $z = (n-1)h$ 分别表示薄膜的下表面和上表面。

假设 $Tb_{0.28}Dy_{0.72}Fe_{1.93}$ 和 $SmFe_{1.95}$ 具有相同的弹性模量，则中性层位置在中间，即 $n = 0.5$ 。

图 4b 为薄膜产生弯曲时，梁断面 $a-a'$ 的应力分布情况，由于溅射薄膜的厚度很小， $Tb_{0.28}Dy_{0.72}Fe_{1.93}$ 薄膜伸长时的压应力和 $SmFe_{1.95}$ 薄膜缩短时的拉应力 s_m 均可视为均匀常量，基片中性层上部的内应力是拉应力，下部是压应力。此时，复合梁的等效力矩为

$$M(x, t) = \int_{-0.5h}^{0.5h} E(z) I(z) z b(x) dz \quad (4)$$

式中 $b(x)$ ——薄膜的宽度

$I(z)$ ——由磁场引起的关于厚度的应变

t ——时间变量

2.2 磁致伸缩薄膜尾鳍受迫振动动态模型

对于悬臂梁结构的长度为 l 的磁致伸缩薄膜变断面梁，假设单位长度上质量 $r(x)$ 和断面刚度 $k(x)$ 是关于梁长 x 的函数，对应于不同固有频率 f_i 和 f_j 的振型函数分别为 $V_i(x)$ 和 $V_j(x)$ ，梁的弯曲自由振动微分方程为^[5]

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[k(x) \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}(x, t) \right] + r(x) \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}(x, t) = 0$$

此方程的解即为薄膜振幅的动态响应，它可以表示为振型函数的无穷级数的形式，即

$$z(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} V_i(x) q_i(t) \quad (5)$$

式中 $q_i(t)$ ——系统的广义坐标

薄膜存在结构阻尼系数，实际的振幅不是无限大，薄膜在磁致伸缩等效力矩的作用下，用拉格朗日方程和虚功原理可以推导出磁致伸缩薄膜悬臂梁关于广义坐标的在力矩 $M(x, t)$ 扰动下引起振动的微分方程为

$$m \ddot{q}_i(t) + c \dot{q}_i(t) + k q_i(t) = Q_i(t) \quad (6)$$

式中

$$m = \begin{bmatrix} m_1 & L & 0 \\ M & & M \\ 0 & L & m_n \end{bmatrix}$$

$$c = \begin{bmatrix} c_1 & L & 0 \\ M & & M \\ 0 & L & c_n \end{bmatrix}$$

$$k = \begin{bmatrix} k_1 & L & 0 \\ M & & M \\ 0 & L & k_n \end{bmatrix}$$

$$m_i = \int_0^l r(x) V_i^2(x) dx$$

$$c_i = \int_0^l r(x) V_i^2(x) dx$$

$$k_i = \int_0^l k(x) [V_i''(x)]^2 dx$$

$$Q_i(t) = \int_0^l M(x, t) V_i'(x) dx$$

$V_i'(x)$ ——振型函数的一阶导数

$V_i''(x)$ ——振型函数的二阶导数

广义坐标 $q_i(t)$ 的稳态定常强迫响应为

$$q_i(t) = f \sin(\omega t - j) + \frac{A_i}{f_i^2} \quad (7)$$

式中 $f = \frac{A_i}{\sqrt{(f_i^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta f_i \omega)^2}}$

$$j = \arctan \left(\frac{2\zeta f_i \omega}{f_i^2 - \omega^2} \right)$$

$$A_i = \int_0^l M(x, t) V_i'(x) dx$$

2.3 薄膜尾鳍受迫振动动态响应的求解

由式(5)可知，要求出薄膜尾鳍受迫振动动态响应 $z(x, t)$ ，就要确定广义坐标 $q_i(t)$ 的稳态响应和振型函数 $V_i(x)$ 。广义坐标 $q_i(t)$ 稳态响应求解的本身也涉及振型函数 $V_i(x)$ ，因此振型函数 $V_i(x)$ 的求解是关键。

磁致伸缩薄膜以悬臂梁的形式用于微型驱动器模仿尾鳍摆动，以上三种薄膜的断面是变化的，而对于变断面梁的受迫振动，很难求出固有频率和振型函数的精确解析值，只能使用数值的方法求解。下面用瑞利—里兹法求出它们的数值解。

假设与某谐振频率 $f_i (i=1, 2, 3)$ 对应的振型函数为一个级数形式，令

$$V_i(x) = \sum_{j=1}^n a_j u_j(x) \quad (8)$$

式中 a_j ——待定系数

$u_j(x)$ ——满足梁的几何边界条件，且彼此线性无关的函数

由瑞利—里兹法得出系统的特征值方程为

$$k'a = \omega^2 m'a \quad (9)$$

式中 k', m' —— $n \times n$ 的对称常数矩阵

ω ——梁的固有频率

$$k'_{ij} = \int_0^l k(x) u_i'(x) u_j'(x) dx$$

$$m'_{ij} = \int_0^l r(x) u_i(x) u_j(x) dx$$

$i, j = 1, 2, \dots, n$

$$a^T = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

$u_i'(x)$ ——满足梁的几何边界条件，且彼此线性无关的函数二阶导数

考虑到悬臂梁固定端的边界条件：位移和转角在 $x=0$ 处都为零，并且 n 取的越大，求出的振型函数越精确，所以我们假设 $u_j(x) = x^{j+1} (j=1, 2, \dots, 6)$ 。针对三种不同断面的尾部，求出它们的前三阶固有频率 $f_i (i=1, 2, 3)$ 和 f_i 对应的三个归一化振型函数，其解如下。

$$(1) \quad y = 0.0333x + 0.002 \quad l = 0.06$$

$$w = [11.7, 81.3, 234.1]$$

$$a^{(1)} = [248\ 476.4, -3\ 252\ 515, 25\ 464\ 255, -0.189\ 025\ 1 \times 10^9, 0.137\ 592\ 4 \times 10^{10}, -0.442\ 628\ 1 \times 10^{10}]$$

$$a^{(2)} = [1\ 658\ 146, -0.546\ 228\ 8 \times 10^8, 0.194\ 516\ 7 \times 10^9, 0.840\ 213\ 3 \times 10^{10}, -0.909\ 301\ 1 \times 10^{11}, 0.214\ 036\ 4 \times 10^{12}]$$

$$a^{(3)} = [-4\ 837\ 322, 0.251\ 000\ 7 \times 10^9,$$

$$\begin{aligned}
 &0.167\ 106\ 2 \times 10^8, -0.183\ 1 \times 10^{12}, \\
 &0.331\ 321\ 3 \times 10^{13}, -0.177\ 319\ 9 \times 10^{14}] \\
 (2) \quad &y = 0.8333x^2 + 0.002 \quad l = 0.06 \\
 &\mathbf{w} = [11.7, 78.9, 230.9] \\
 &a^{(1)} = [222\ 248.5, -1\ 598\ 498, -0.223\ 077\ 1 \times \\
 &\quad 10^8, 0.516\ 841\ 8 \times 10^9, -0.383\ 753\ 9 \times \\
 &\quad 10^{10}, 0.108\ 338\ 3 \times 10^{11}] \\
 &a^{(2)} = [1\ 586\ 078, -0.414\ 473\ 1 \times 10^8, \\
 &\quad -0.524\ 622\ 1 \times 10^9, 0.258\ 162\ 2 \times 10^{11}, \\
 &\quad -0.286\ 549 \times 10^{12}, 0.105\ 019\ 9 \times 10^{13}] \\
 &a^{(3)} = [-4\ 950\ 851, 0.254\ 918\ 5 \times 10^9, \\
 &\quad 0.268\ 128\ 8 \times 10^9, -0.198\ 257 \times 10^{12}, \\
 &\quad 0.357\ 997\ 1 \times 10^{13}, -0.192\ 794\ 9 \times 10^{14}] \\
 (3) \quad &y = 20x^3 + 0.002 \quad l = 0.059\ 2 \\
 &\mathbf{w} = [10.9, 78.9, 234.1] \\
 &a^{(1)} = [216\ 638.6, -1\ 494\ 035, -9\ 117\ 084, \\
 &\quad -2\ 354\ 616, 0.317\ 325\ 9 \times 10^{10}, \\
 &\quad -0.222\ 581\ 8 \times 10^{11}] \\
 &a^{(2)} = [1\ 567\ 328, -0.341\ 206\ 3 \times 10^8, \\
 &\quad -0.962\ 371\ 3 \times 10^9, 0.360\ 067\ 7 \times 10^{11}, \\
 &\quad -0.391\ 450\ 6 \times 10^{12}, 0.144\ 970\ 4 \times 10^{13}] \\
 &a^{(3)} = [-5\ 072\ 059, 0.254\ 190\ 1 \times 10^9, \\
 &\quad 0.117\ 391\ 5 \times 10^{10}, -0.239\ 310\ 5 \times 10^{12}, \\
 &\quad 0.425\ 056\ 2 \times 10^{13}, -0.230\ 411\ 8 \times 10^{14}]
 \end{aligned}$$

求出振型函数 $V_i(x)$ 代入式(5)和(7), 就可以求出它们的稳态响应 $z(x, t)$ 。

2.4 薄膜尾鳍在流体中的推力模型

微机器人在流体中的运动轨迹如图 5 所示。 $z(x, t)$ 是薄膜在交变磁场作用下的波动函数, 即稳态响应。

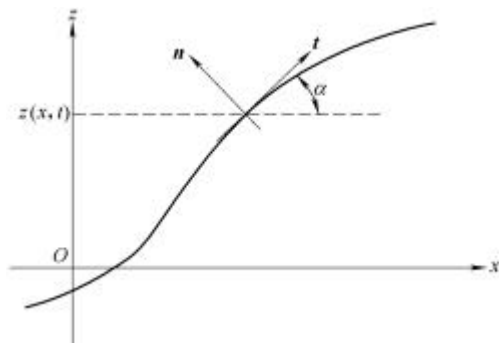


图 5 尾部在流体中的运动轨迹

仿生游动微机器人在流体中的运动方程^[6]为

$$F_x = \frac{1}{2} c \mathbf{r} \int_0^l b(x) v |v| \tan \alpha dx \quad (10)$$

式中 F_x ——前进推力

c ——流体的粘性系数
 \mathbf{r} ——流体密度
 $b(x)$ ——尾部宽度
 $v = -u \sin \alpha + \frac{\partial z(x, t)}{\partial t} \cos \alpha$
 u ——沿 x 轴方向薄膜与流体之间的相对平均速度
 α ——微机器人击水角度
 $\alpha = \frac{\partial z(x, t)}{\partial x}$

3 尾鳍推力仿真与形状优化

稳态响应 $z(x, t)$ 在共振区域内的振幅是最大的, 所以选择共振频率为驱动磁场频率。为了简化分析, 驱动磁场频率分别选择它们的前三阶共振频率, 图 6 是四种形状的尾部在前三阶共振频率下所产生的推力曲线。

从图 6 中可以得出: 推进力是随时间变化的, 且有时为负值, 在一个周期内为正则为推力, 为负则为反向推力。仿真可发现两个结果: 一阶谐振频率驱动时, 机器人向前驱动, 二阶谐振频率驱动时, 机器人向前驱动, 速度最大, 三阶谐振频率驱动时, 机器人向后驱动, 速度较小。当尾部形状曲线为三次方时, 推进力最大。

根据以上计算结果, 三次曲线推力最佳。为了优中选优, 下面以推进力为目标, 在等面积的情况下, 选用两组不同尾鳍根部宽度的三次曲线的尾部进行最大推力计算, 在二阶共振区域内的计算结果见表 2。

表 2 两组尾部的数据比较

尾部曲线函数	弦长 l/mm	展弦比 K	后掠角 \mathbf{b}/rad	最大推进力 F/nN
$b_1(x) = 10x^3 + 0.002$	66.10	0.265 5	0.073 8	4.420
$b_1(x) = 20x^3 + 0.002$	59.20	0.420 2	0.103 5	4.670
$b_1(x) = 30x^3 + 0.002$	55.20	0.551 6	0.127 0	4.680
$b_1(x) = x^3 + 0.003$	58.99	0.114 2	0.054 3	0.454
$b_1(x) = 10x^3 + 0.003$	53.28	0.226 3	0.084 5	0.696
$b_1(x) = 20x^3 + 0.003$	49.77	0.331 9	0.109 4	0.836

由表 2 中数据可以得出: 在薄膜面积相等的情况下, 尾鳍根部宽度越小, 展弦比和后掠角越大, 推进力就越大, 这是由于大的展弦比和后掠角可以减小液体对尾部的摩擦力; 但同时减小尾鳍根部宽度, 它的刚度就会降低, 它的回复力就会减小, 推进力也随之减小。综合考虑以上因素, 选择尾部曲线为 $b_1(x) = 20x^3 + 0.002$ 。对此形状薄膜进行了有限元分析, 它的最大应力出现在尾鳍根部处, 为 710 446 Pa, 低于聚酰亚胺薄膜的抗张强度 110 MPa

和超磁致伸缩材料的抗拉强度 28 MPa。一阶振动的最大振幅约为 1 cm。

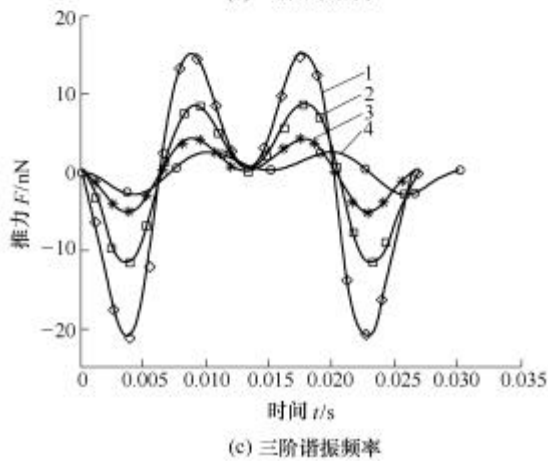
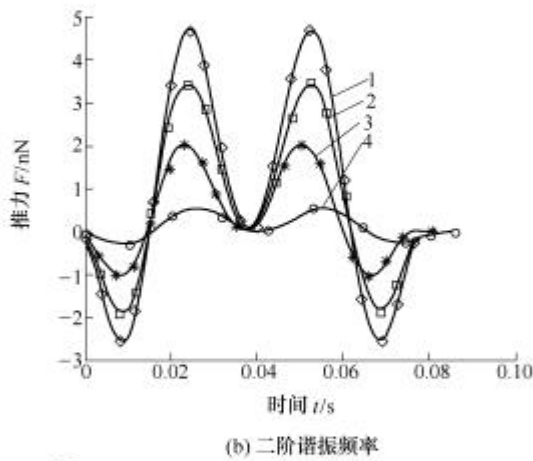
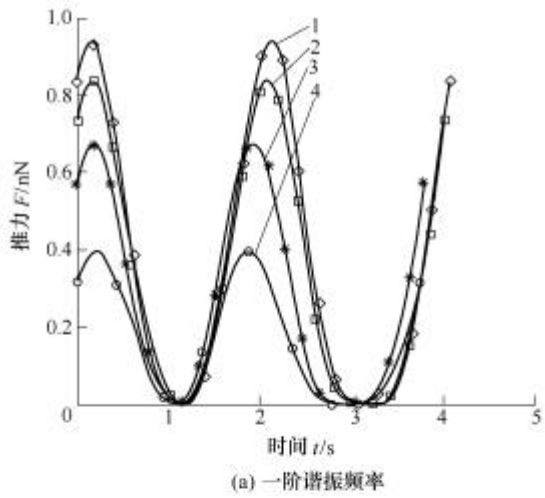


图6 尾部在一个周期内的推进力

- 1. $b_1(x) = 20x^3 + 0.002$ 2. $b_1(x) = 0.833x^2 + 0.002$
- 3. $b_1(x) = 0.033x + 0.002$ 4. $b_1(x) = 0.003$

对薄膜进行了动力学的分析，它的二阶振动模型类似于鱼类的波状推进方式，一阶振动是摆动推进，三阶振动类似于水蛇的鳗鲡模型，从这也可以得出二阶振动方式最适合于游动微机器人的推进，与仿真计算结果是一致的。

4 试验与结果

研制的机器人试验装置如图7所示，包括磁场驱动控制器，双线圈激励磁激励系统^[7]，机器人超声波定位系统^[8]，试验台和机器人等。机器人如图7局部放大图所示。

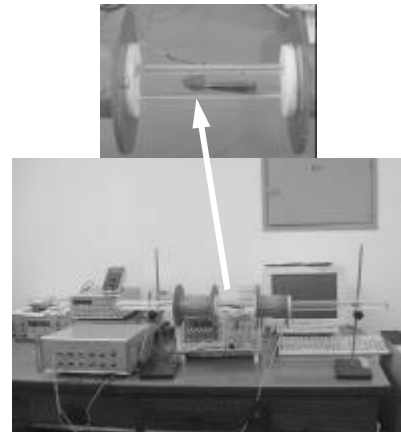


图7 机器人游动试验装置

为了便于比较，选择同一长度为 60 mm，三种不同尾鳍形状的薄膜进行对比试验，分别为

$$b_1(x) = 20x^3 + 0.002$$

$$b_2(x) = 0.833x^2 + 0.002$$

$$b_3(x) = 0.003$$

取驱动电流为 1 A，改变驱动频率的大小进行了游动试验，得出游动速度与磁场驱动频率的关系曲线，如图8所示，得出如下结论。

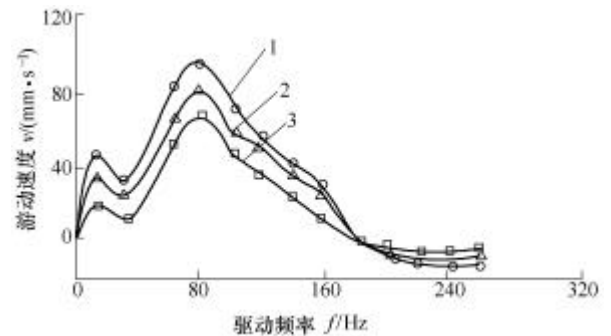


图8 机器人的游动试验曲线

- 1. $b_1(x) = 20x^3 + 0.002$ 2. $b_1(x) = 0.833x^2 + 0.002$ 3. $b_1(x) = 0.003$

(1) 以一阶谐振频率附近驱动时，机器人向前游动，但速度不是最大值。以二阶谐振频率附近驱动时，机器人向前游动，速度达到最大值，机器人姿态稳定；以三阶谐振频率附近驱动时，机器人向反向游动，但游动速度较慢。

(2) 对上述三种尾鳍曲线形状，试验的游动速度分别由大到小，说明尾鳍曲线的形状对游动速度

的影响较大,也证明了优化结果的正确性。

(3) 基于磁致伸缩薄膜尾鳍的仿生游动原理切实可行,实现了机器人的无缆驱动。

由于推力大,游动速度也大,因此上述结论与理论分析一致,验证了尾鳍振动模态与推力特征关系的正确性,也验证了优选的尾鳍形状具有较理想的驱动效果。

5 结 论

建立了悬臂梁结构变断面超磁致伸缩薄膜尾鳍的受迫振动动态模型,采用瑞利—里兹法解决了该模型的数值求解问题,在保证尾鳍根部强度的基础上,对等面积约束条件下的不同形状薄膜尾鳍的推力进行了仿真与试验验证,进而优化了薄膜尾鳍的最佳形状,结果表明大的展弦比有利于维持足够大的推力和较高的效率;曲线形的尾鳍前缘,可显著改善推进性能;适当增大后掠角有助于改善推进性能。

总之,模仿鱼类尾鳍形状的仿生游动,可以显著改善机器鱼的推进性能,提出的研究方法为进一步进行鱼类仿生游动机理的研究奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] WEBB P W. Form and function in fish swimming[J]. Scientific American, 1984, 251(1): 58-68.
- [2] SFAKIOTAKIS M, LANE DM. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1999, 24(2): 237-252.
- [3] BODY C, REYNE G, Meunier G. Nonlinear finite element modeling of magneto-mechanical phenomenon in giant magnetostrictive thin films[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(2): 1 620-1 623.
- [4] TAKASHI H, KEN I A, MASAHIRO Y. Basic properties of magnetostrictive actuators using Tb-Fe thin film[J]. IEICE transactions on Electron, 1997, E80-C(2): 232-237.
- [5] 方同, 薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000.
- [6] LAURENT G, PIAT E. Efficiency of swimming microrobots using ionic polymer metal composite actuators :proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics &

Automation[C], 2001: 21-26.

- [7] 张永顺, 郭锐, 刘煜. 管内微型机器人的在线定位方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(10): 1 382-1 385.
- [8] 张永顺, 刘巍, 郭锐, 等. 无缆微型游动机器人驱动磁场系统的研究[J]. 机器人, 2005, 27(2): 63-67.

BIOMIMETIC SWIMMING PRINCIPLE OF A MICRO ROBOT FISH USING GIANT MAGNETOSTRICTIVE THIN FILM AS CAUDAL FIN

ZHANG Yongshun LI Hailiang

LIU Wei JIA Zhenyuan

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: According to bionic principle, a fish-like swimming micro robot using giant magnetostrictive thin film actuator as a propulsion caudal fin can improve its reliability and feasibility in the way of non-contact control. As the configuration optimization of caudal fin is the key to modify its propulsive force and drive efficiency of the robot, several kinds of selected caudal fin configurations are selected in the condition of equal caudal area and length. Then their propulsive force is validated by simulation based on established force oscillation dynamic model of GFM in variable cross section area cantilever structures and propulsive models of micro robot in the liquid. As a result an optimal configuration caudal fin is selected, and the stress distribution of inside caudal fin is analyzed by the finite element method. Finally the experimental result validates that the caudal fin as selected configuration can generate more thrust force and better efficiency.

Key words: Micro robot

Biomimetic swimming

Giant magnetostrictive thin film

Optimization of caudal fin configuration

作者简介:张永顺,男,1965年出生,博士,副教授。主要研究方向为机电控制及自动化、机器人技术、磁控微型机器人和医疗微型机器人。发表论文 40 余篇。

E-mail: zyshun@dlut.edu.cn