

# 新型仿生水下水子母机器人系统设计

郭书祥<sup>1,2,3</sup>, 孙珊<sup>1</sup>, 郭健<sup>1†</sup>

(1. 天津理工大学 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384;  
2. 北京理工大学 生命学院, 北京 100081; 3. 日本香川大学 工学部, 高松 761-0396)

**摘要:** 传统的水下水子母机器人在水下作业时母机器人会有噪音大、体积大和隐蔽性差的缺点,而且子机器人作为提高水下机器人位置精度和续航时间的重要手段大多采用尾部摆动、机身两侧划水、小型螺旋桨推进等方式,造成运动过程中稳定性差、噪音大而且尺寸难以微型化的缺点.为了克服这些不足,设计一种新型仿生水下水子母机器人系统.该系统球形母机器人采用喷水电机进行喷水推进,减少噪音,增加隐蔽性,并为微型子机器人提供控制信号和能源.微型子机器人以樽海鞘为原型基于仿生原理设计,在水下运动透明度高、隐蔽性强、稳定性高.建立球形母机器人的喷水推进器和微型子机器人的微型驱动器的驱动力计算模型,同时建立微型子机器人的水下转向模型.最后制作子母机器人样机并进行子母机器人的水下运动实验,以验证所设计的子母机器人系统的有效性.

**关键词:** 水下机器人; 子母机器人系统; 微型机器人; 形状记忆合金丝; 樽海鞘; 仿生学  
**中图分类号:** TP242      **文献标志码:** A

## Design of a novel biomimetic underwater mother-son robot system

GUO Shu-xiang<sup>1,2,3</sup>, SUN Shan<sup>1</sup>, GUO Jian<sup>1†</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Application in Complicated Systems, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. School of Life Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. Faculty of Engineering, Kagawa University, Takamatsu 761-0396, Japan)

**Abstract:** When executing operations in underwater space, the traditional underwater mother robot has some limitations, such as loud noise, large size and poor concealment, and the movement mode of the son microrobot usually uses the way of tail swing, fin oscillating water and propeller impetus, which causes it hard to scale down and lack of stability. In order to overcome these shortages, a novel biomimetic underwater mother-son robot system is designed. In this system, the spherical underwater mother robot uses the water-jet as the actuator to reduce noise and increase concealment, which can provide the energy and signal for the microrobot. Based on the principle of bionics, the microrobot is designed according to the salps, which has the advantages of high sports transparency, high concealment, and high stability. The calculation model of the actuators of the mother-son robot are established respectively, and the rotating models of the son microrobot is also established. Finally, the prototype of the mother-son robot is made, and the underwater motion tests of the robot are carried out to verify the effectiveness of the designed mother-son robotic system.

**Keywords:** underwater robot; mother-son robot system; microrobot; shape memory alloy wire; salps; bionics

## 0 引言

陆地资源的枯竭和人类社会生产的增长,很多国家将海洋作为获取资源的重要途径.而许多传统的水下机器人在水下作业时无法完成水下狭小空间内的勘测,在微型结构、运动模式、位置精度以及续航时间等方面也有所欠缺.因此,水下水子母机器人的研究和广泛应用对海洋资源的勘测有着重要的意义<sup>[1-2]</sup>.

国内外水下水子母机器人方面的研究正在逐步发展中.北京信息科技大学研究的一种桨身融合蛇形两栖子母机器人,除了具有传统蛇形两栖机器人的水陆运动能力,还具有桨叶推进的辅助运动方式,增强了机器人在水中的适应能力<sup>[3-4]</sup>.由日本香川大学郭书祥教授带领团队研制的水下水子母机器人可以实现基于LED的水下光通信,其中球形母机器人的运动

收稿日期: 2017-10-31; 修回日期: 2017-12-28.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61375094).

责任编辑: 高会军.

作者简介: 郭书祥(1963—),男,教授,博士,从事机器人技术等研究;孙珊(1994—),女,硕士生,从事球形两栖子母机器人系统的研究.

†通讯作者. E-mail: jianguo@tjut.edu.cn.

方式为两栖,微型子机器人的结构为龙虾式,其采用功能性材料ICPF驱动,同时可以实现对水下小直径物体的抓取<sup>[5-7]</sup>. 意大利仿生机器人研究所研究了微型水下机器人的对接、信息交换和能源供应,促进了水下机器人的模块化和信息传递<sup>[8-9]</sup>.

传统的水下子母机器人在水下作业时,母机器人有噪音大、体积大、隐蔽性差的缺点,而且子机器人的运动多采用尾部摆动、机身两侧划水或小型螺旋桨推动的模式实现,造成运动时稳定性差、噪音大,而且尺寸难以微型化无法进入狭小空间. 为解决这些问题,本文设计一种新型仿生水下子母机器人系统. 其中,球形母机器人可实现无线控制,驱动器采用喷水推进器代替传统水下机器人常用的螺旋桨,运动过程中无水分解,具有隐蔽性强、无噪声、无污染的特点,球形结构增加其水下运动的灵活性. 微型子机器人结构采用仿生原理以樽海鞘为原型设计,通过形状记忆合金(SMA)丝产生驱动力对机体内部的水进行挤压实现喷水推进,以提高稳定性并实现运动无声,机体材料选用硅胶,在水下游动时接近透明,可增强其隐蔽性和柔软性,微型子机器人内部有独立电源. 当与球形母机器人失去联系时为信号发送模块提供能源. 球形母机器人通过缆线向微型子机器人提供控制信号和能源,同时方便微型子机器人的回收.

## 1 子母机器人系统设计

### 1.1 球形母机器人系统

#### 1.1.1 球形母机器人结构设计

球形母机器人的结构设计如图1所示,分为上、下两部分,其中上半部分包含球壳和机器人底板,下半部分包含4组驱动装置、微型子机器人仓和2个四分之一球壳,中心对称分布在圆板上.

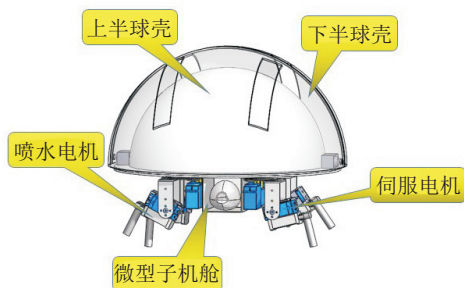


图1 球形母机器人结构设计

上半球壳内部安装有供电电池、单片机控制芯片、直流电机控制模块以及无线通讯模块等. 下半部分的每组驱动装置分别由2个伺服防水舵机、1个喷水推进电机组(喷管和喷水电机)以及多个舵机支架构成. 球形两栖机器人的上半球壳外侧,在机器人的中心线的两侧分别装有一个防水小型舵机和2个旋

转轴,分别用于控制两个下半(四分之一)球壳的开启与关闭.

#### 1.1.2 球形母机器人硬件电路

球形母机器人的控制主板采用AVR Atmega 2560,通过发送PWM波信号控制驱动装置和小型舵机. 基于ZigBee通信协议的XBee无线通信模块实现上位机与子母机器人之间的通信. 供电电源采用的是锂电池,型号为DC 1298 A,输入为DC 12.6 V,输出为DC 10.8-12.6 9 800 MAH.

#### 1.1.3 球形母机器人水下运动方式

球形母机器人在水中运动时2个四分之一半球壳被放下,此时球形两栖机器人的整体形状基本为球形形状,重心稳定. 喷水电机由于采用其产生的反向作用力喷水推进,故运动低噪音、稳定性高,不易被外界发现. 水下运动多个自由度的控制可以通过调整防水伺服舵机的偏转角度,使4个喷水电机的喷水管与水面形成不同的夹角,实现在水中的水平、自转和垂直方向的运动. 当喷水电机的喷水管与水面平行时,同侧喷水电机施加大小相等的喷水推力,实现水平方向运动;保持喷水电机的喷水管与水面平行时,给对角两个喷水电机施加相等的喷水推力,机器人实现自转运动;当喷水电机的喷水管与水面垂直时,4个喷水电机同时产生大小相等的喷水推力,实现垂直运动. 由于向上垂直喷水时母机器人底板会阻碍推力的产生,将喷水电机偏转一定的角度. 球形母机器人的水下游动速度与喷水电机的推力大小有关.

### 1.2 微型子机器人系统

仿生机器人是仿生学与机器人结合的产物,通过模仿生物结构、运动特性等设计性能优越的机器人系统<sup>[10-11]</sup>. 仿生机器人通过模仿生物外部形状及其运动特点设计出能够完成复杂任务的机器人系统,具有很大的研究价值和意义.

#### 1.2.1 微型子机器人结构设计

基于仿生原理,以樽海鞘的外部形状及其运动特点为原型对微型子机器人结构进行设计,并为了适应微型子机器人在水下运动的适应性和灵活性在其基础上进行了改进. 樽海鞘是一类小型远海胶质脊索动物,属樽海鞘纲,背囊薄而透明可使其免受天敌的伤害. 身体呈桶状且前后端两口均开,分别为入水口和出水口,这种运动方式使得樽海鞘比其他生物的游动更趋近于稳定. 其身体上有环状肌带,通过从前到后的依次收缩,使体腔内的水被挤压出去,产生推力从而实现喷水推进.

微型子机器人结构设计如图2所示,由4部分组

成:上半壳、微型驱动器、下半壳、尾部. 其驱动力由微型驱动器对子机器人腔体内的水进行挤压产生. 上半壳与微型驱动器之间的空腔,增加子机器人机身的浮力. 尾部由4根SMA丝呈菱形分布与机身相连,通过改变尾部形状从而对挤压出的水进行引导,从而改变方向. 下半壳密封,装有子机器人的控制部分.

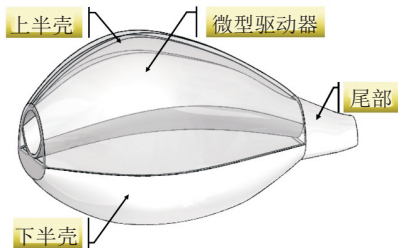


图2 微型子机器人结构设计

本文设计的微型驱动器由记忆合金丝(SMA)和硅胶外膜组成. 其中, SMA<sup>[12-13]</sup>是一种能在加热升温后完全消除其在较低温度下发生的形变的材料,硅胶的密度和水最为接近且透明,增加机器人的隐蔽性而且能存储部分弹性势能,使微型驱动器被压缩后能回复原状. 微型驱动器通过SMA丝的时序运动对腔体内的水进行挤压产生驱动力.

### 1.2.2 微型子机器人硬件电路

微型子机器人采用独立于球形母机器人的控制电路进行控制. 子机器人的硬件电路的主控板采用MCU, 开关电路中的微型光电耦合继电器,其型号为AQY272, 负载电流为2A,可以满足驱动回路的电流负载要求. 当微型子机器人的控制主板的引脚为高电平时,继电器导通,驱动器端连接的相应的合金丝上电.

微型子机器人采用的SMA丝是直径为0.3 mm的Ni-Ti基,每根SMA丝丝长为50 mm,在无应力时的相变温度为:  $M_f = 18.7^\circ\text{C}$ ,  $M_s = 31.54^\circ\text{C}$ ,  $A_s = 50^\circ\text{C}$ ,  $M_f = 65^\circ\text{C}$ .

### 1.2.3 微型子机器人水下运动方式

微型子机器人的水下运动的实现主要通过对硬件电路板中开关电路的时序控制,使SMA丝通电对微型驱动器腔体内的水进行挤压产生驱动力. 4根SMA丝分布在微型驱动器上,并由硅橡胶涂抹用于防水.

第1根SMA丝通电使微型子机器人的入水口紧闭时,快速压缩第2根SMA丝,使微型驱动器腔体内的水向出水口挤压. 第1根SMA丝断电后,进水口打开,但仍保持第2根SMA丝通电,然后快速压缩第3根SMA丝. 以此类推,直到微型驱动器回复初始状态,则一个运动周期结束. 整个运动过程中,始终保持

有通电SMA丝将进水口和出水口隔离,使进水和出水同时进行,提高了驱动器的推力和微型子机器人的运行速率,也保证了对水挤压时不会从出水口溢出,而且前后两端均开口使得机器人的运动更趋近于稳定.

微型子机器人通过4个基板连接尾部,用于方向的控制,其中每个基板均由记忆合金丝和硅胶制成,4个基板呈菱形分布在机身和尾部的连接处.

左右转向通过左右两个基板控制,上浮下潜通过上下两个基板控制. 当其中一个基板通电受热超过其相变温度时,产生回复初始状态的力拉动尾部发生偏转,同时硅胶存储弹性势能. 微型子机器人的移动方向与尾部偏转方向相反. 当通电的基板断电时,其硅胶存储的弹性势能和其相反的基板硅胶存储的弹性势能带动尾部回复初始状态.

### 1.3 子母机器人间的通信及微型子机器人释放装置

球形母机器人和微型子机器人的控制系统框图如图3所示. 球形母机器人和微型子机器人的通信采用点对点的有线串行通信. 子母机器人通过软铜线连接,保证子机器人运动的灵活性,子机器人被释放时通过游动距离来缓慢释放连接线,避免对微型子机器人运动产生影响. 两个单片机系统之间通过控制字符作为通信协议. 球形母机器人的主控板AVR Atmega2560发送不同的字符,微型子机器人采用串口中断方式接收控制字符执行对应操作,如:前进、上浮、下潜、左转和右转. 同时也可通过上位机对母机器人进行控制,从而控制子机器人的运动.

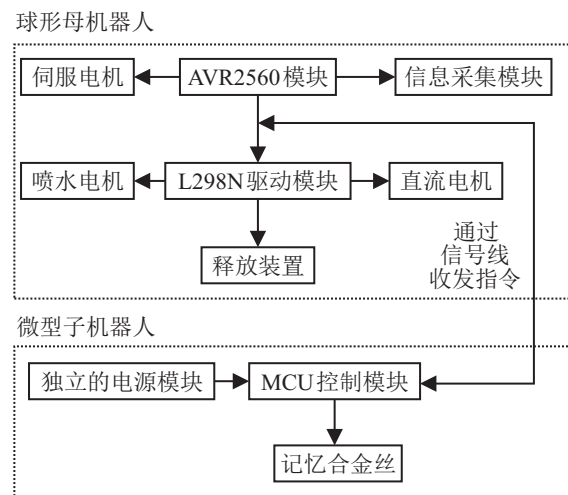


图3 仿生水下子母机器人控制系统框图

微型子机器人释放装置的上半部分固定在球形母机器人底板上,抓手部分与上半部分的相对运动通过弧槽形滑轨. 连接部分涂抹油以减少摩擦. 初始状态时释放装置的抓手连接部分,由于受到提拉力,夹

紧微型机器人. 当去掉提拉力时, 由于抓手部分的重力和弹簧的作用使微型子机器人释放. 微型子机器人释放前, 与球形母机器人连接的导线存储于子机器人舱. 子母机器人之间的连接导线为软铜线, 方便微型子机器人的运动和存储, 其对微型子机器人在运动时产生的阻力可忽略不计.

## 2 仿生子母机器人驱动器分析

### 2.1 球形母机器人喷水推进器推力计算模型

球形母机器人喷水推力原理如图4所示. 由于喷水电机固定在U形支架上, 塑料尺固定在U形支架的一侧, 初始位置以竖直方向重合, 塑料尺与竖直方向的夹角可以随着喷水推力的大小变化而改变, 当喷水口与水平方向一致时, 根据牛顿第二定律和力的分解原理, 水平方向和垂直方向的力推导公式如下:

$$F_L \cdot \sin \phi = F_G \cos \phi, \quad (1)$$

$$F_G \cdot \sin \phi + F_L \cos \phi = mg. \quad (2)$$

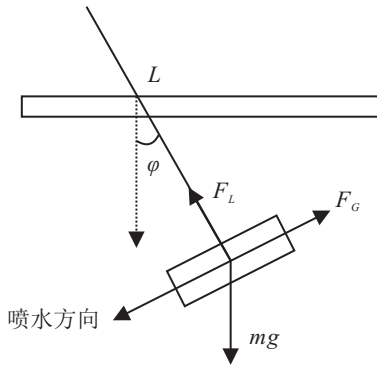


图4 球形母机器人喷水推力原理

根据式(1)和(2)可知, 当喷水口与水平方向一致时, 不同的偏转角度对应的喷水推力大小如下式所示:

$$F_G = mg \cdot \sin \phi. \quad (3)$$

当喷水口与水平方向成30°角时, 喷水推力公式为

$$F_G = \frac{2}{3} \sqrt{3} mg \cdot \sin \phi; \quad (4)$$

当喷水口与水平方向成60°角时, 喷水推力公式为

$$F_G = 2mg \cdot \sin \phi; \quad (5)$$

当喷水口与水平方向一致时推导公式类似, 不再重复推导.

### 2.2 微型子机器人微型驱动器模型

对微型子机器人的微型驱动器进行简化后, 得到如图5所示的模型.

根据动量守恒定律和动量定理, 假定微型驱动器在对水进行挤压时能量损耗为0, 且忽略水被挤压出

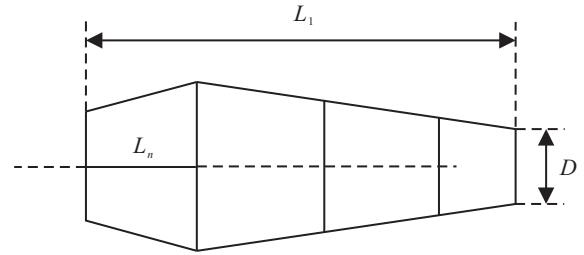


图5 球形母机器人喷水推力原理

时与驱动器出水口的粘性. 微型驱动器初始状态的纵向横截面为椭圆形, 则t时刻微型驱动器加压水的体积为

$$V_m(t) = \int_0^{L_n} \frac{\pi}{4} a(L_n, t) b(L_n, t) v dt. \quad (6)$$

其中:  $L_n$  为两根 SMA 丝之间的距离,  $a(L_n, t)$  为 t 时刻两根 SMA 丝间某纵向横截面的长轴长度,  $b(L_n, t)$  为 t 时刻两根 SMA 丝间某纵向横截面的短轴长度. 微型驱动器尺寸很小, 故本文假设微型驱动器出水口为圆形, 直径为  $D$ , 则尾部水被挤压出来时的速度为

$$U(t) = \frac{4dV_m(t)}{\pi D^2 dt}. \quad (7)$$

由式(6)得

$$U(t) = \frac{va(L_n, t)b(L_n, t)}{D^2}, \quad (8)$$

则微型驱动器的推进力为

$$F_T = \frac{dm_j}{dt} U(t) = \frac{\rho_\omega \pi D^2 U(t)}{4}. \quad (9)$$

其中:  $m_j$  为喷出水的质量,  $\rho_\omega$  为水的密度. 由式(8)可得

$$F_T = \rho_\omega \pi^3 \times \frac{v^2 [a(L_n, t)b(L_n, t)]^2}{D^2}. \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 微型驱动器的驱动力大小与驱动器的出口直径  $D$ 、驱动速度  $v$ 、两记忆合金丝之间的距离  $L_n$  以及 SMA 丝的动作时间有关.

### 2.3 微型子机器人微型驱动器模型

微型子机器人转向时尾部相对于机身偏转一定的角度, 在子机器人的中心产生一个偏转力矩. 在偏转过程中尾部静止, 只作为对微型驱动器腔体内挤出水流的引导作用, 具有较大的转矩.

建立微型子机器人转向的二维模型如图6所示, 则子机器人在转向时受到的阻力为

$$F_D = \int_0^L \frac{1}{2} C_D \rho_\omega u^2 \sin \beta dl = \frac{1}{2} C_D \rho_\omega u^2 L \sin \beta. \quad (11)$$

转弯时力矩  $M$  为

$$F_D = \int_0^L dF_D \times c = \int_0^L \frac{1}{2} C_D \rho_\omega u^2 dl \sin \beta \times l \sin \beta =$$

$$\frac{1}{4}C_D\rho\omega u^2L^2\sin^2\beta. \quad (12)$$

其中： $u$ 为微型子机器人在水下转弯时的速度， $\beta$ 为转弯时子机器人尾部偏转的角度， $l$ 为尾部某微元到尾部与子机器人机身连接点的长度， $L$ 为尾部的整体长度， $c$ 为尾部某微元到子机器人机身中心轴线的距离， $C_D$ 为阻力系数。将常数 $C_D\rho\omega u^2L^2$ 进行归一化处理，则得到尾部偏转幅度与阻力和转弯力矩的关系如图7所示。

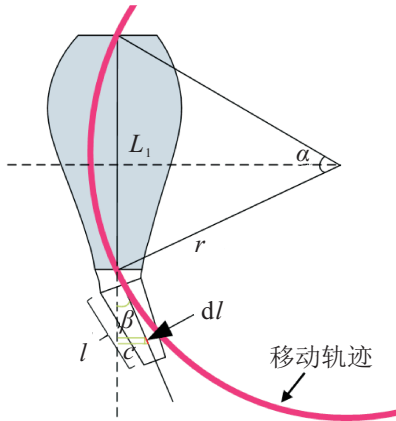


图6 微型子机器人转向二维模型

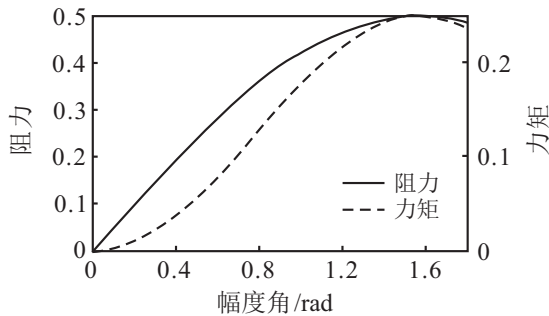


图7 尾部偏转幅度与阻力和转弯力矩的关系

在微型子机器人的简化模型中，子机器人机身长为 $L_1$ ，当子机器人的转弯半径 $r = L_1$ 时，转弯半径最大，从简化图中可以看出

$$\alpha = 2\beta, \quad (13)$$

$$\frac{1}{2}L_1 = r \sin \beta. \quad (14)$$

故当偏转转角 $\beta$ 为 $30^\circ$ 时，微型子机器人的转弯半径最大。

### 3 实验与数据分析

#### 3.1 仿生子母机器人样机

制作仿生水下子母机器人样机如图8所示。微型子机器人样机如图9所示。球形母机壳体采用亚克力板制作，整体尺寸小于40cm，为中心对称结构。微型子机器人的制作材料为硅胶，防水材料选用硅橡胶，增加机器人的隐蔽性。微型子机器人的整体尺寸为 $90 \times 50 \times 50$ ，总体质量为70g。

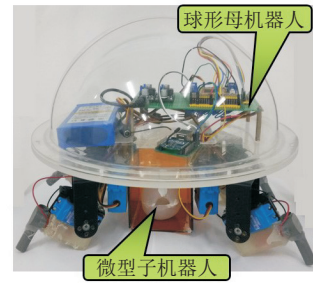


图8 仿生水下子母机器人样机

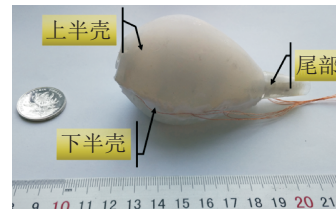
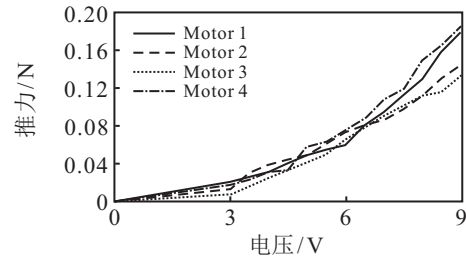


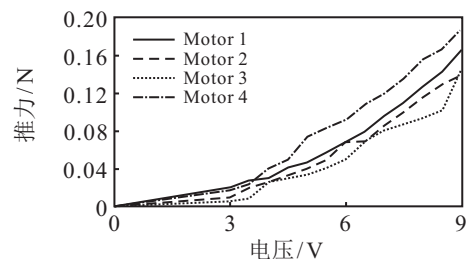
图9 微型子机器人样机

#### 3.2 球形母机器人喷水推进器的推力测试

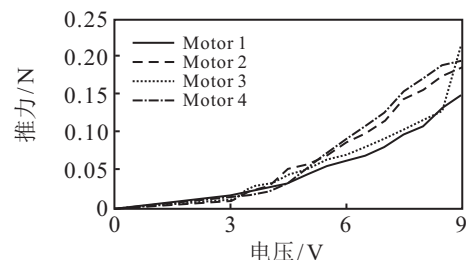
喷水推进器测试实验平台组成部分为AVR控制器、稳压模块、直流电源模块、喷水推进器和架台。实验中，为了减少误差，从0V~9V共选取12个不同的电压作为输入量，分别对机器人的4个喷水推进器进行测试，同时每个推进器分别选取3个角度 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 测试，这样共产生12组样本数据，对其取平均值，实验结果如图10所示。



(a) Angle =  $0^\circ$



(b) Angle =  $30^\circ$



(c) Angle =  $60^\circ$

图10 喷水推进器的推力实验结果

由实验结果可以看出,4个型号相同的喷水电机在相同电压和喷水角度下产生的推力仍有差别.喷水电机推力的差别对上浮、下潜运动稳定性影响较大.由于母机器人机体设计为对称结构,4个喷水电机产生的推力是否相同影响着母机器人上浮、下潜运动的平稳性.

### 3.3 微型子机器人尾部测量实验

为了对微型子机器人尾部进行控制,对尾部与机身之间连接的基板进行水下测试.如图6所示, $\beta$ 为基板的偏转角度.由于基板非常短,电流的差异对偏转角度有很大的影响,在实验中加热电流分别设定为0.5 Hz、1 Hz和1.5 Hz.在加热电流相同的情况下,SMA丝的直径也是重要的影响因素,故实验中选取的丝径分别为0.1 mm、0.2 mm和0.3 mm.

实验结果如图11所示.由图11可以看出:当丝径为0.1 mm时,基板偏转角度过大,不利于微型子机器人水下的平衡;当丝径为0.3 mm时,由于丝径较大,需通较大的电流以达到需要的理论角度.所以基板由丝径为0.2 mm的SMA丝制作,以满足微型子机器人的转向.

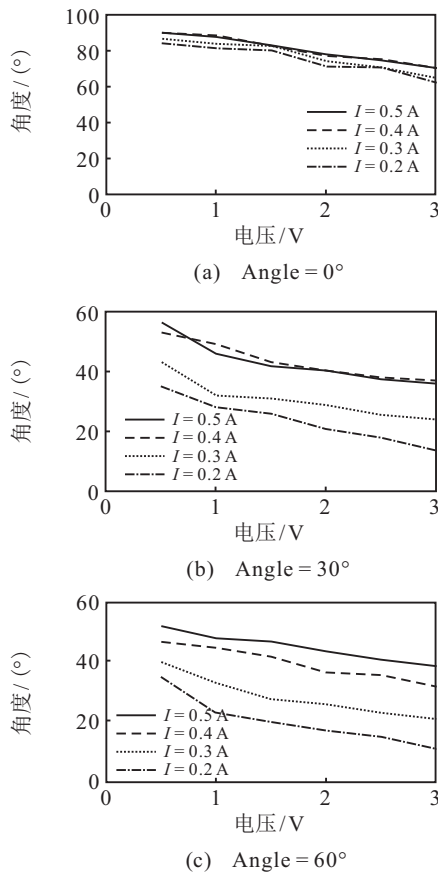


图11 不同丝径下基板的偏转角度

### 3.4 微型子机器人尾部测量实验

为了验证仿生水下子母机器人的游动能力,本文在游泳池中对子母机器人进行了实验.在水下实验

中,水温对SMA丝的加热和散热速度影响非常大,故游泳池水温一直保持在 $23^\circ\text{C}$ 以确保实验数据的稳定性.当球形母机器人遇见无法穿越的狭窄空间时,释放微型子机器人.

在游动实验中,测得球形母机器人水下前进运动速度与占空比关系如图12所示.当喷水电机两端的输入电压在 $1\text{ V} \sim 8\text{ V}$ 时,球形母机器人的速度随着输入的电压增大会越来越快.由于电池经过稳压电源输出的最大电压为 $7.4\text{ V}$ ,当喷水电机两端输入的电压为 $7.4\text{ V}$ 时,球形母机器人水平前进的最大速度为 $11.1\text{ cm/s}$ .微型子机器人前进运动时速度与时间的关系如图13所示.由图13可以看出,微型子机器人在游动时速度不断增加,最大速度为 $8.7\text{ mm/s}$ ,但由于SMA丝的滞后性和微型驱动器硅胶回复力存储的制约,其游动速度的增长逐渐减缓,在 $19\text{ s}$ 后子机器人速度下降.

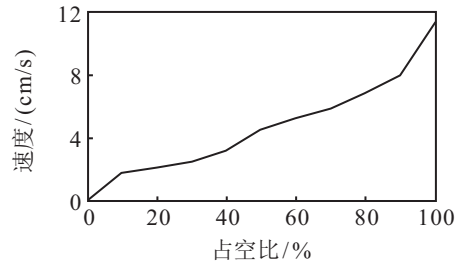


图12 球形母机器人水下前进运动速度与占空比关系

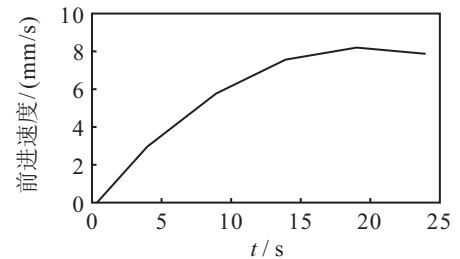


图13 微型子机器人前进运动时速度与时间的关系

同时对微型子机器人转向运动进行实验.微型子机器人的转向速度与时间的关系如图14所示.由图14可以看出,由于SMA丝滞后性,转向速度的增加受到制约,其最大转向速度为 $0.23\text{ rad/s}$ .

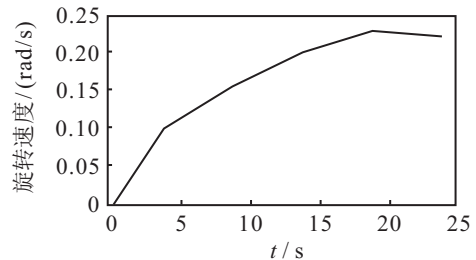


图14 微型子机器人转向速度与时间的关系

由微型子机器人前进和转向实验可以得出驱动器的收缩和舒张频率对子机器人的运动速度影响较

大,而且SMA丝本身具有滞后性.故微型机器人收缩和舒张频率取决于微型驱动器的壁厚,壁厚较薄时收缩时间短,壁厚较厚时舒张时间短.经测量比较后,本文实验选择的微型驱动器壁厚为3mm,可以满足微型子机器人运动.

#### 4 结论

本文设计了一种新型仿生水下子母机器人系统,系统采用球形母机器人作为微型子机器人的搭载平台,为其提供控制信号和能源.设计了一种以樽海鞘为原型的微型子机器人及其释放装置.球形母机器人采用喷水电机进行驱动,微型子机器人采用由SMA丝和硅胶制成的微型驱动器进行驱动.该机器人系统无污染,且在水下运动时无噪声,隐蔽性强.本文对子母机器人的驱动器的推力和微型子机器人的转向进行建模计算,并进行了水下游动实验,实验验证了所设计的子母机器人系统在水下游动的有效性.该子母机器人系统在实际应用中,当球形母机器人遇到无法进入的狭小空间时,对微型子机器人进行释放,增加了运动的灵活性和机器人的续航时间.

#### 参考文献(References)

- [1] 马静,王谋,孙斌.基于可变形结构设计的水陆两栖机器人的研制[J].技术与市场,2016,23(4):16-20.  
(Ma J, Wang M, Sun B. Development of amphibious robot based on deformable structure design[J]. Technology and Market, 2016, 23(4): 16-20.)
- [2] 徐玉如,李彭超.水下机器人发展趋势[J].自然杂志,2014,3:125-132.  
(Xu Y R, Li P C. Development trend of the underwater robot[J]. Nature, 2014, 3: 125-132.)
- [3] 李彦文,李擎,苏中,等.一种桨身融合蛇形两栖子母机器人的机构设计和运动学仿真[J].机器人,2014,36(2):224-232.  
(Li Y W, Li Q, Su Z, et al. Mechanism design and kinematics simulation of a snake-like amphibious mother-daughter robot with blended-oar-body[J]. Robot, 2014, 36(2): 224-232.)
- [4] 刘福朝,李擎,李彦文,等.一种蛇形机器人的直线蜿蜒运动规划[J].机械设计与研究,2014,30(1):35-38.  
(Liu F C, Li Q, Li Y W, et al. Straight serpentine locomotion planning of snake-like robot [J]. Machine Design and Research, 2014, 30(1): 35-38.)
- [5] Li Maoxun, Guo Shuxiang, Guo Jin, et al, Development of a biomimetic underwater microrobot for a father-son robot system[J]. Proce of 2016 IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation, 2017, 23(4): 849-861.
- [6] Guo S, Pan S, Li X, et al, A system on chip-based real-time tracking system for amphibious spherical robots[J]. Int J of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(4): 1-19.
- [7] Li Y, Guo S, Wang Y. Design and characteristics evaluation of a novel spherical underwater robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 94: 61-74.
- [8] Mintchev S, Ranzani R, Fabiani F, et al. Towards docking for small scale underwater robots[J]. Autonomous Robots, 2015, 38(3): 283-299.
- [9] Boyer F, Lebastard V, Chevallereau C, et al. Underwater navigation based on passive electric sense: New perspectives for underwater docking[J]. Int J of Robotics Research, 2015, 34(9): 1228-1250.
- [10] Wang Guobiao, Chen Diansheng, Chen Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot[J]. J of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 27-43.
- [11] 王睿,王硕.仿生机器鱼推进效率实验研究进展[J].系统科学与数学,2016,36(9):1388-1396.  
(Wang R, Wang S. Experimental research development of propulsive efficiency of biomimetic robotic fish[J]. System Science and Mathematics, 2016, 36(9): 1388-1396.)
- [12] 孟南.形状记忆合金研究进展[J].金属材料研究,2017(2):35-41.  
(Meng N. Research progress of shape memory alloys[J]. Metal Materials Research, 2017(2): 35-41.)
- [13] 郝丽娜,郭少飞,陈洋.基于SMA丝驱动的仿人手指传动结构设计与研究[J].机械传动,2014(2):104-107.  
(Hao L N, Guo S F, Chen Y. Design and research of human finger drive mechanism based on SMA wire drive[J]. Mechanical Transmission, 2014(2): 104-107.)

(责任编辑:郑晓蕾)