

doi: 10.7690/bgzdh.2016.12.020

基于尾鳍推进模型的三关节仿生机器海豚系统

张磊, 孟中杰

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

摘要: 为设计一种新型、游动效率高、可以实现沉浮运动的仿生机器人, 以海豚为仿生对象, 利用仿生学原理对基于尾鳍推进模型的三关节仿生机器海豚系统进行改进。研究海豚的背腹运动尾鳍推进模型, 对原有模型中不利于工程实现的方面进行修正。在验证修正后模型可行性的基础上, 设计一种三关节柔性尾部加刚性头部的机械结构以及控制流程和配套的电路系统, 对机器海豚的沉浮运动进行动力学分析, 提出利用 PID 控制实现平面运动的方法, 通过实验验证机器海豚沉浮运动和平面运动的可行性, 并给出机器海豚游动速度和尾鳍摆动频率及尾鳍摆幅之间的关系。实验结果表明, 基于尾鳍推进模型的机器海豚具有较高的效率和游动速度。

关键词: 机器海豚; 仿生; 尾鳍运动模型; 机构设计; 运动分析

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Three Joints Bionic Robot Dolphin System Based on Tail Fin Propulsion Model

Zhang Lei, Meng Zhongjie

(School of Aerospace, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: For designing a new-type bionic robot with high efficiency and realizing up and down motion, taking dolphins as bionic objects, use bionics principle to improve three joints bionic robot dolphin system based on tail fin propulsion model. Research on dolphin dorsoventral motion fin propulsion model, modify subject which is not easy for engineering realization in original model. Based on verification for modified model feasibility, design mechanical structure of the three joints flexible fin and rigid head, control procedure and related circuit system, carry out dynamics analysis for up and down motion, puts forward the method of using PID control to realize the planar motion, and verifies the feasibility of dolphin ups and downs motion and planar motion by experiment, then give relation among robot dolphin swimming speed, fin swing frequency and fin amplitude of oscillation. The experimental results show that the model dolphins with tail fin propulsion have high efficiency and swim speed.

Keywords: robot dolphin; bionic; tail fin propulsion model; mechanism design; kinematic analysis

0 引言

近年来, 机器人已被广泛运用于军事、航空、制造业以及家庭等各个方面^[1]。随着海洋资源开发需求的增长及机器人技术的进步, 适应各种非结构化环境的水下机器人得到了迅猛发展。与当前螺旋桨船舶相比, 鱼类具有很高的推进效率^[2]、很好的机动性以及很低的噪音, 因此被广泛运用于军事侦察、海洋生物观察和娱乐等方面。

目前, 机器鱼沉浮的实现方法主要有储水舱法、胸鳍法和改变重心法。储水舱法利用鱼鳔的工作原理, 在机器鱼体内安装一个储水舱, 并配备一个水泵, 通过调节储水舱内水的多少, 调节机器鱼的身体重力和浮力之间的关系以实现上浮下潜运动; 胸鳍法是在机器鱼上利用电机驱动改变胸鳍的方向, 在倾斜的胸鳍上对推进力进行分解得到垂直于游动方向的升力, 从而实现机器鱼的沉浮运动; 改变重心法是在机器鱼体内安装一个可以活动的配重物,

通过改变重物位置进而改变机器鱼的重心, 从而使机器鱼的身体产生倾斜来完成沉浮运动^[3]。

区别于目前常见的实现机器鱼沉浮运动的方法, 笔者通过对海豚的背腹式运动的研究, 设计了一套基于尾鳍推进模型实现机器海豚沉浮运动的方法。文献[4]中给出了一种尾鳍推进模型, 但是在工程实际中仍存在一定的实现难度。通过与实际情况相结合, 笔者对原有的尾鳍推进模型进行了改进, 并对改进模型的可行性进行了论证分析。在改进模型的基础上, 笔者设计了一种三关节柔性尾部和刚性头部的机械结构和辅助的相应机电系统, 最终完成了样机的研制, 并通过实验对系统进行了验证。

1 尾鳍推进运动模型

1.1 模型简述

文献[4]给出了一种海豚的尾鳍运动模型。根据对海豚座稳态背腹式推进的仿生学研究, 描述海豚

收稿日期: 2016-08-10; 修回日期: 2016-09-20

基金项目: 2015 年国家级“大学生创新创业训练计划”创新项目(201510699026)

作者简介: 张磊(1994—), 男, 四川人, 学士, 从事智能仿生机器人研究。

身体及海豚尾的运动学参数主要包括：

$$\{f, H, U, St, A_{Tmax}, \alpha_{max}, \psi\}。$$

其中： f 为身体摆动频率； H 为尾鳍摆动轴沉浮运动的幅值； U 为海豚的游动速度； St 为尾流结构参数——斯德鲁哈尔数，表明漩涡生成的频率及其之间的距离； A_{Tmax} 为尾鳍后缘的最大摆幅，通常取尾鳍末梢的峰—峰值 α_{max} 为尾鳍最大击水角度； ψ 为尾鳍俯仰运动与沉浮运动相位差。

尾鳍摆动周的轨迹曲线方程为

$$H_{fpp} = H \sin(2\pi ft)。 \quad (1)$$

尾鳍绕自身摆动轴的俯仰运动表示为：

$$\theta(t) = \theta_{max} \sin(2\pi ft + \psi)。 \quad (2)$$

式中 θ_{max} 为尾鳍俯仰运动幅值。

笔者建立了一个定坐标系 Oxy 和一个动坐标系 $O'x'y'$ ，从 x 轴到 x' 轴的转角为 0° 。 M 是动点表示尾鳍上一点， O' 表示尾鳍摆动轴， M 与 O' 间的距离为 d ，则动点的相对运动方程为

$$\left. \begin{aligned} x' &= -d \cos(\theta(t)) \\ y' &= -d \sin(\theta(t)) \end{aligned} \right\}。 \quad (3)$$

通过推导可以得到：

转动轴在定坐标系下的运动方程为

$$\left. \begin{aligned} x_o &= Ut \\ y_o &= H \sin(2\pi ft) \end{aligned} \right\}。 \quad (4)$$

尾鳍沉浮—俯仰符合运动的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} x &= Ut - d \cos\left[\left(\frac{2\pi fH}{U} - \alpha_{max}\right) \sin(2\pi ft + \psi)\right] \\ y &= H \sin(2\pi ft) - d \sin\left[\left(\frac{2\pi fH}{U} - \alpha_{max}\right) \sin(2\pi ft + \psi)\right] \end{aligned} \right\}。 \quad (5)$$

并且建立起了参数的联系：

$$\theta_{max} = \frac{2\pi fH}{U} - \alpha_{max}； \quad (6)$$

$$H = \frac{U(A_{Tmax} - 2d\alpha_{max} \cos\psi)}{2(U - 2\pi fd \cos\psi)}。 \quad (7)$$

1.2 模型仿真

针对上述模型，笔者利用 Matlab 对其进行了仿真，初始条件如下(l 为海豚体长)：

- 1) 游动速度 $U = 2l(\text{m/s})$ ；
- 2) 斯德鲁哈系数 $S_t = 0.25$ ；
- 3) 尾鳍最大击水角度 $\alpha_{max} = 20^\circ$ ；
- 4) 尾鳍俯仰运动比沉浮运动相位超前相角 $\psi = 90^\circ$ ；

5) 尾鳍最大摆幅 $A_{Tmax} = 0.2l$ ；

6) 身体摆动频率 $f = 2.5 \text{ Hz}$ 。

对海豚尾部游动的距离和纵向位移做无量纲处理：

$$\begin{cases} ydis = \text{纵向位移} / \text{体长} \\ xdis = \text{游动距离} / \text{体长} \end{cases}。$$

仿真结果如图 1 所示。

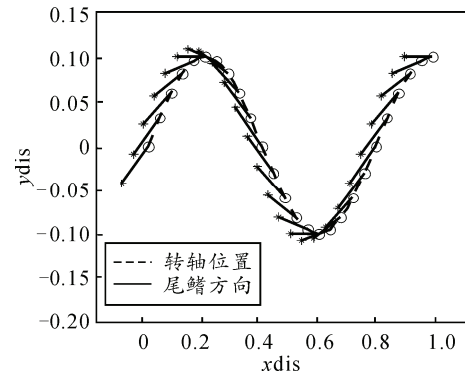


图 1 尾鳍摆动轴及尾鳍轨迹

图 1 中转轴位置特指尾鳍转动轴自对应时刻所处的位置。该曲线基本再现了海豚尾鳍的运动，通过与观察记录的海豚尾鳍运动方式比较，结果与真实的海豚运动相符。

2 尾鳍推进运动模型的修正与仿真

2.1 模型修正

由方程组(4)可以得出结论：文献[4]中的运动模型建立在尾鳍转动轴的水平运动为匀速运动的基础上，但是在工程中，关节的运动是通过电机的转动来实现的，两电机之间的链接也需要通过一只刚性连杆，而尾鳍转动轴的纵向运动比水平运动更为重要，这样转动轴水平的匀速运动就很难保证。所以，在工程上，要实现尾鳍转动轴的匀速运动是非常困难的，相较之下，要保证质心在水平方向上的匀速运动则简单的多；因此，需要在设定质心在水平面上的匀速运动的情况下，对推进模型稍作修正^[5]。

笔者首先建立新的坐标系，包含 1 个定坐标系和 2 个动坐标系，如图 2。

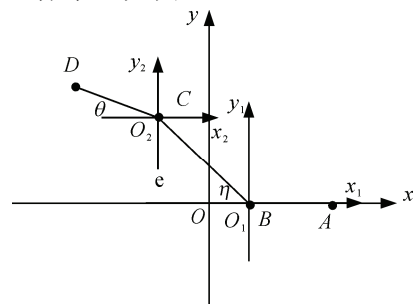


图 2 坐标系

其中： O_{xy} 为定坐标系； $O_1x_1y_1, O_2x_2y_2$ 为顶坐标系，并且 x_1 轴 x_2 轴相对于 x 轴角度为 0° ； B 为海豚质心； C 为海豚尾鳍转轴； D 为尾鳍尾部一点； BC 间连接杆长度为 d_1 ； C 点后直线代表尾鳍长度为 d_2 。

假设 BC 相对于 x_1 轴角度为 η (在 x_1 以下为正)， CD 相对于 x_2 轴角度为 θ (在 x_2 轴以下为正)。这样 B 点在定坐标系下的运动可以表示为：

$$\left. \begin{aligned} x &= Ut \\ y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

C 点相对于动坐标系 $O_1x_1y_1$ 的运动可表示为：

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= -d_1 \cos(\theta(t)) \\ y_1 &= -d_1 \sin(\theta(t)) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

D 点相对于动坐标系 $O_2x_2y_2$ 的运动可表示为：

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= -d_2 \cos(\theta(t)) \\ y_2 &= -d_2 \sin(\theta(t)) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

可以得到：

$$\eta(t) = \arctan\left(\frac{H \sin(2\pi ft)}{d_1}\right); \quad (11)$$

$$\theta(t) = \theta_{\max} \sin(2\pi ft + \psi), \psi = \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

经过坐标变换，可以得到 CD 两点的绝对运动方程。 C 点为：

$$\left. \begin{aligned} x &= Ut - d_1 \arctan\left(\frac{H \sin(2\pi ft)}{d_1}\right) \\ y &= H \sin(2\pi ft) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

D 点为：

$$\left. \begin{aligned} x &= Ut - d_1 \arctan\left(\frac{H \sin(2\pi ft)}{d_1}\right) - d_2 \cos\left[\left(\frac{2\pi fH}{U} - \alpha_{\max}\right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \sin(2\pi ft + \psi)\right] \\ y &= H \sin(2\pi ft) - d_2 \sin\left[\left(\frac{2\pi fH}{U} - \alpha_{\max}\right) \sin(2\pi ft + \psi)\right] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2.2 改进模型的仿真

仍采用 1.2 节中条件，并且取 $d_1 = 0.3l$ ， $d_2 = 0.2l$ ，仿真结果如图 3。

图 3 中连接轴特制第二关节和第三关节间的连接轴。该仿真曲线再现了海豚尾鳍的运动，通过与观察记录的海豚尾鳍运动方式比较，结果与真实海豚运动较为相符，但改进后的运动图像尾鳍转轴运动函数与文献[4]中仿真图像略有出入，对比如图 4。

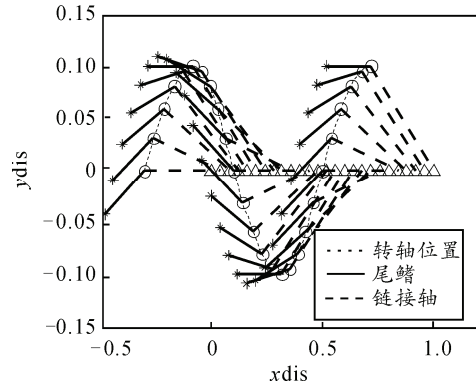


图 3 改进模型仿真结果

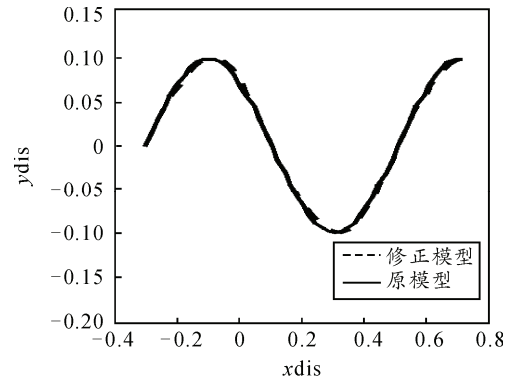


图 4 修正前后模型对比

虽然波形略有改变，但是游动方向最大误差仅为 $0.0172l$ 小于波长的 10%，可以忽略。

2.3 运动模型的离散化

将式(11)、式(12)进行离散化，假设在 1 个周期内选取 M 个特殊时刻，则此时两舵机的偏转角为：

$$\eta(N) = \arctan\left(\frac{H \sin(2\pi \frac{N}{M})}{d_1}\right), N = 1, 2, 3, \dots, M-1, M; \quad (15)$$

$$\theta(N) = \theta_{\max} \sin(2\pi \frac{N}{M} + \psi), \psi = \frac{\pi}{2}, N = 1, 2, 3, \dots, M \quad (16)$$

在对应时刻，将舵机偏转到对应的偏转角即可。

3 样机研制

3.1 3 自由度尾鳍推进机构设计

整个仿生机器由 2 部分组成，刚性的头部和柔性的尾部^[6]。整体平均密度略大于水，体积为 625.4 cm^3 ，质量为 738.3 g ，密度为 1.18 g/cm^3 。

海豚的升力来源于其流线型的外形，所以头部刚性部分设计为流线型，并通过 3D 打印技术打印成型，并利用热缩蒙皮进行密封处理。

主要运动部分即柔性尾部设计如图 5。

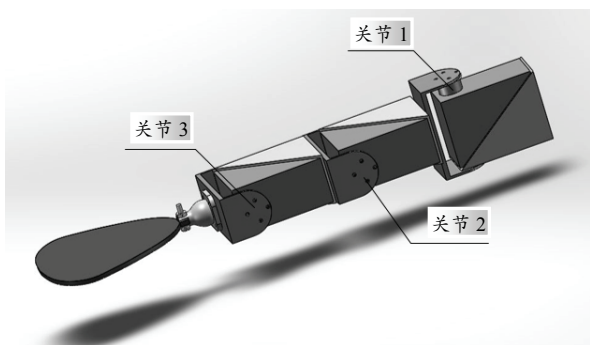


图5 尾部结构设计

尾部拥有3个自由度，其中：关节1的转动带动仿生海豚的头部转向，从而实现整个机器海豚运

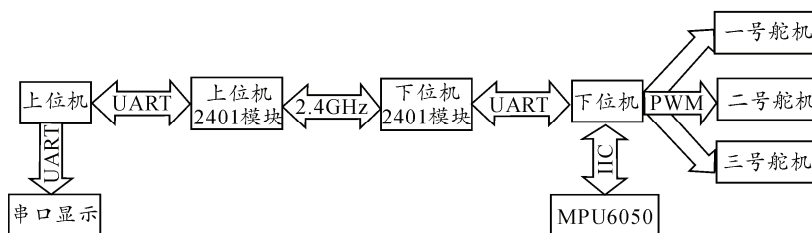


图6 控制流程

3.3 电路设计

电路包括 ATmega128 单片机、MPU6050 模块和 NRF24I01 模块，此外还要包括降压模块、电源系统、三路 PWM 输出及其他外围电路。笔者设计并制作了 PCB 电路板如图 7。

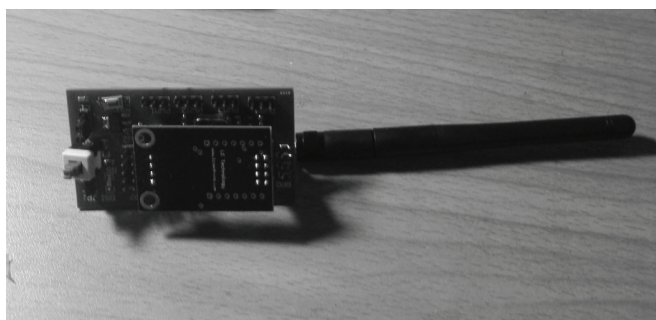


图7 电路板

根据前述基础，笔者设计了仿生海豚的样机，如图 8 所示。



图8 机器海豚样机

动的转向；关节2的转动带动关节2与关节3间的链接轴运动，使尾鳍转动轴达到预期目标点；关节3带动尾鳍转动，以达到运动函数预期的目标角度。

3.2 控制流程设计

整个系统包括上下位机，上下位机之间通过 NRF24I01 模块进行无线通信，下位机由 Atmel 公司的 ATmega128 单片机作为主控芯片，1 块 MPU6050 模块，该模块包含 1 个加速度计和 1 个陀螺仪，作为位置和姿态测算的敏感器，预先将各个运动模式的程序写入单片机，由上位机发送指令，下位机执行指令控制舵机完成运动，控制流程如图 6。

4 运动分析

4.1 下潜运动

在 1 个周期内，关节 2 的摆动是关于线 $\eta=0$ 对称的，在这里称 $\eta=0$ 为关节 2 摆动的基准轴。

水平面内运动时，第 2、3 关节的偏转角度分别为式(15)、式(16)，此时，在 1 个周期的平均作用下推力可以认为是水平向前。若希望使海豚实现下潜运动，需要在第二关节的偏转角基础上添加 1 个额外的角度 σ ，假设此时 σ 为正值，即

$$\eta(N) = \arctan\left(\frac{H \sin(2\pi \frac{N}{M})}{d_1}\right) + \sigma, \quad (17)$$

$$N = 1, 2, 3, \dots, M-1, M, \sigma > 0.$$

这样第二关节摆动的基准轴和海豚头部刚性部分会产生 1 个 σ 的夹角，受力分析如图 9。

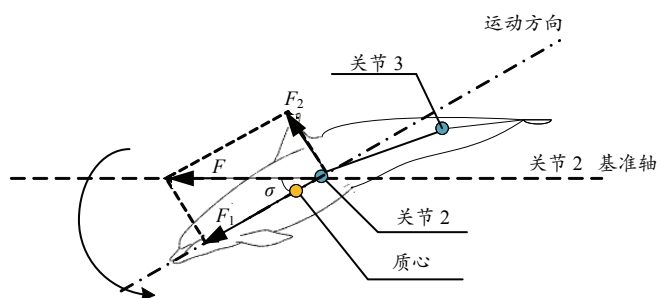


图9 机器海豚下潜运动

图 9 中，海豚在尾鳍推进的作用下会受到图中 F 的推进力，而该推进力与运动方向之间存在 1 个夹角 σ ，这样力 F 可以分解为沿运动方向的力 F_1 ，和垂直运动方向的力 F_2 ：

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= F \cos \sigma \\ F_2 &= F \sin \sigma \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

在垂直于运动方向的力 F_2 的作用下，海豚整体产生绕质心的顺时针转动，使关节 2 基准轴产生顺时针转动进而使力 F 产生顺时针转动，从而产生向下的推力分量使机器海豚完成下潜运动。

4.2 上浮运动

在 4.1 节中已假设下潜运动时，夹角 σ 为正。同理，上浮运动时，仅需要夹角为负值，即：

$$\eta(N) = \arctan\left(\frac{H \sin(2\pi \frac{N}{M})}{d_1}\right) + \sigma, \quad (19)$$

$N = 1, 2, 3, \dots, M-1, M, \sigma < 0.$

运动原理同 4.1，笔者不做赘述。

4.3 平面运动

笔者设计的机器海豚密度略大于水，而产生浮力的方式是利用流线外形，在一定的速度下由伯努利方程的解释产生的升力。在不进行沉浮运动情况下，过大的速度会使浮力大于重力而使机器海豚上浮，而过小的速度又会使重力大于浮力而使海豚下潜；因此，要保证海豚的平面运动就不能单靠运动本身^[7]。笔者设计了 1 套 PID 控制系统，以加速度计作为传感器获取海豚目前的深度，在不同的速度下配合不同的 σ 值以机器海豚的平面运动，控制框图如图 10。

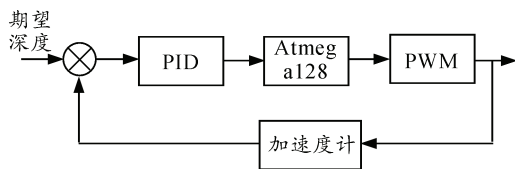


图 10 平面运动控制框图

5 实验

5.1 下潜运动

在实体实验中，仿生海豚按身体摆动频率 $f = 2.5 \text{ Hz}$ ，尾鳍最大摆幅 $A_{Tmax} = 0.2l$ 运动，实验场地为一深水池。在实验条件下，海豚运动图像如图 11 所示，与 4.1 分析情况基本一致。

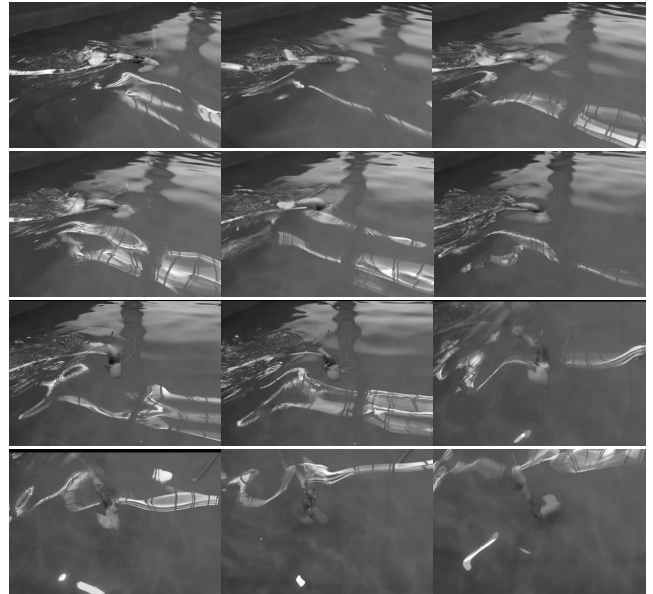


图 11 机器海豚下潜运动

5.2 上浮运动

在实体实验中，海豚初条件与 5.1 相同。在试验条件下，海豚运动图像如图 12 所示，与 4.2 分析情况基本一致。

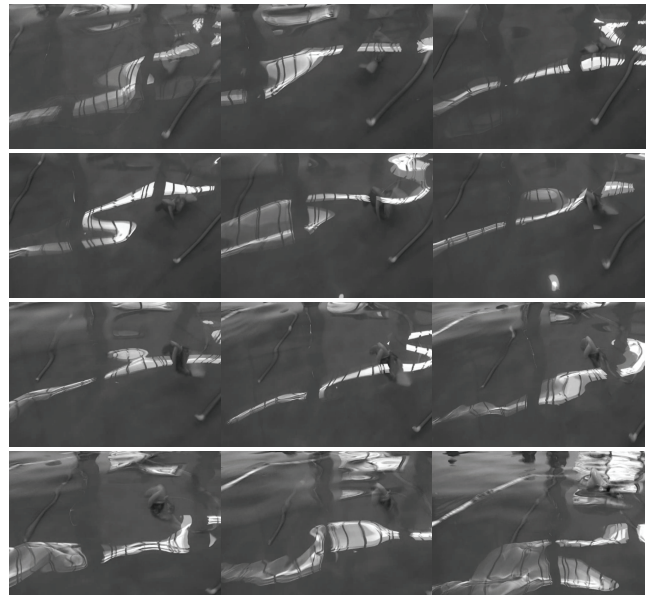


图 12 机器海豚上浮运动

5.3 平面运动

在初值条件下机器海豚相应的速度变化规律如图 13 所示。

图 14 给出了在保持 $A_{Tmax} = 0.2l$ 的情况下，摆动频率 f 分别取 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 Hz 时，机器海豚最大速度、平均速度的变化，图中在频率大于 3 Hz 时速度出现下降，原因为高频时尾鳍受阻力过大电机转速不能满足理论要求，不能在规定时刻完成规

定动作。

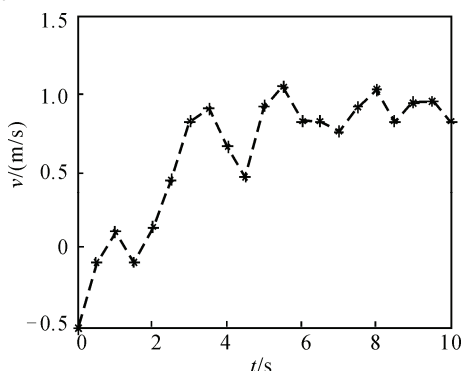


图13 机器海豚平面运动平均游速

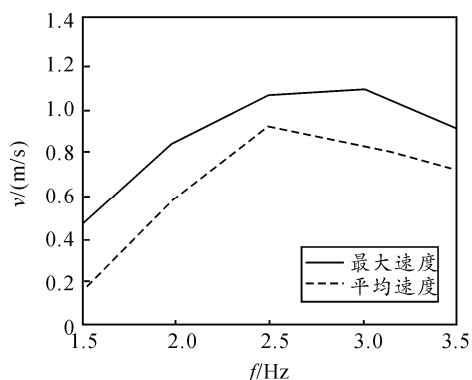


图14 机器海豚游动速度与摆动频率关系

图15给出了在保持 $f=2.5\text{ Hz}$ 的情况下,尾鳍摆动幅值分别取 $A_{T\max}=0.1l$, $A_{T\max}=0.15l$, $A_{T\max}=0.2l$, $A_{T\max}=0.25l$, $A_{T\max}=0.3l$ 时,机器海豚的最大速度、平均速度的变化 ($l=42\text{ cm}$)。

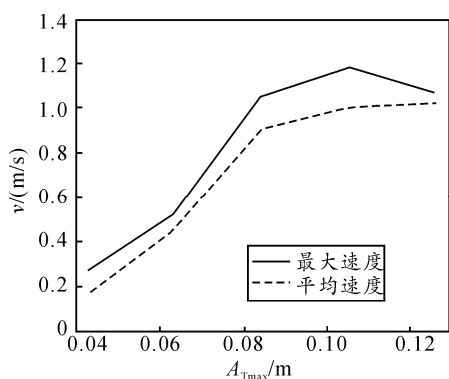


图15 机器海豚游动速度与尾鳍摆动幅值关系

由上述可知,机器海豚的平面运动符合尾鳍推进模型和运动分析。基于此,在满足机电系统的限制条件下,笔者确定了机器海豚的平面运动模式,如表1所示,其中1、2为低速档位,3中速档位,4为高速档位。

表1 运动模式

档位	摆频/Hz	摆幅	游速/(m/s)
1	1.5	0.10l	0.15
2	2.0	0.15l	0.51
3	2.5	0.20l	0.89
3	3.0	0.25l	1.02

6 结论

根据文献[4]所提供的海豚背腹式运动的尾鳍运动模型,笔者对其进行了修正,并在此基础上设计了一种三关节尾加刚性头部的机械结构和相应的控制流程及配套的电路系统,完成了样机的研制。通过运动分析,笔者确定了机器海豚沉浮运动的原理,并利用PID控制实现了其平面运动。实验结果验证了前述方法的可行性,给出了机器海豚游动速度与尾鳍摆动频率,尾鳍摆幅之间的关系。实验结果表明:所设计的机器海豚最大游速能达到1 m/s左右,并且运动过程平稳可靠。

参考文献:

- [1] 魏清平,王硕,谭民. 仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. 系统科学与数学, 2012, 32(10): 1274-1286.
- [2] 宋玉龙,史豪斌,潘炜. 机器鱼高精度实时反馈控制系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(12): 85-89.
- [3] 张毅,杨锐敏,王洲. 机器鱼的研究动态综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2007(5): 598-601.
- [4] 姜世平,郭志,孙晖东. 机器海豚尾鳍运动模型的建立及仿真[J]. 燕山大学学报, 2008(4): 311-315.
- [5] 孙琴,武海健,夏庆锋. 机器鱼游动性能改善方法[J]. 兵工自动化, 2014, 33(12): 67-71.
- [6] 陈华,刘龙,曹彤. 介入机器人运动学及轨迹规划研究[J]. 机电工程, 2014, 31(6): 679-683.
- [7] 李连鹏,苏中,解迎刚,等. 基于遗传算法的机器鱼水中路径规划[J]. 兵工自动化, 2015, 34(12): 93-96.