

doi: 10.7690/bgzdh.2015.12.020

一种新型混合游动模式机器鱼的设计方案

张加魁^{1,2}, 李卫京², 王东亮², 韩亚慧², 徐敏², 张宇²

(1. 中国人民解放军 95903 部队 72 分队, 武汉 432200; 2. 陆军航空兵学院, 北京 101123)

摘要: 为充分利用水流、水层密度差等水下条件来游动以达到节省电量、增大航程的目的, 介绍了一种综合多种运动模式于一体的水下机器鱼设计方案。从机械结构、运动模式和控制系统 3 大部分入手详细介绍机器鱼的设计制作过程。对影响机器鱼游动的重要参数进行水下试验, 利用 Matlab 对得到的数据离散化处理, 进行曲线拟合, 分析不同控制参数对同一款机器鱼的影响。实验结果表明: 该设计新型机器鱼可实现 9 种运动模式, 并能顺利切换原设计的多种游动模式。

关键词: 水中机器鱼; 混合游动模式; 机械结构; 运动模式; 控制系统

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Design on the Hybrid Control Model of Robot Fish Swimming

Zhang Jiakui^{1,2}, Li Weijing², Wang Dongliang², Han Yahui², Xu Min², Zhang Yu²

(1. No. 72 Team, No. 95903 Unit of PLA, Wuhan 432200, China; 2. Army Aviation Institute, Beijing 101123, China)

Abstract: In order to make full use of the flow of water and the difference of density between water layer to save the electricity and achieve the maximum voyage. This paper introduce a comprehensive various movement modes of the underwater robot fish design process. The author introduced the design process of robot fish detailed from the mechanical structure design, pattern design and the control system design. Then the author experiment with the important parameters of the robot fish. Used the Matlab to get the data discretion processing, and curve fitting. The influence of different control parameters on the robot fish of the same type is analyzed. Experiments show this kind of design can achieve 9 kinds of swimming mode, and can switch different patterns smoothly.

Keywords: robot fish; mingling mode; mechanical structure; movement patterns; control system

0 引言

新时期我国要走出陆地成为海洋强国, 水中机器人的运用前景不可估量。尽管目前我国在机器鱼研究方面取得了许多可喜成果, 但能够综合多种游动方式于一体的机器鱼还很少。开展混合游动模式机器鱼研究意义重大: 1) 机器人水下作业环境复杂多变, 需要一种能够在不同水下环境自由游动的机器鱼; 2) 机器鱼在水下作业, 电池电量是制约其工作范围和作业效率的致命因素。新型混合游动模式机器鱼的研制成功使得机器鱼水下游动时, 在不同的水文环境中选择不同的游动模式, 充分利用水流、水层密度差等水下条件来游动以达到节省电量、增大航程的目的。基于此, 笔者提出了一种以 STC89C516RD+单片机作为主控芯片, 综合多种运动模式于一体的水下机器鱼设计方案。

1 机械结构设计

笔者提出机器鱼的单元体结构设计^[1]思路, 将机器鱼主体结构进行模块化处理, 利用 Solidworks

绘制出其外壳并用 3D 打印机打印出实物。笔者设计的机器鱼主体骨架为圆台式流线型设计, 力争最大程度地减小机器鱼在水下运动时的阻力。机器鱼机械结构如图 1, 划分为鱼头舱(1 号单元体)、中部储水舱(2 号单元体)、重心控制舱(3 号单元体)和尾部动力舱(4 号单元体)4 个部分, 4 部分相互独立, 拆卸组装方便。机器鱼整体结构流线型设计具有坚固、美观、质量轻和设计阻力小等特点。



图 1 新型混合游动模式机器鱼实物图

储水舱内部单独设计一个主控制舱, 用于放置机器鱼的主控制电路板、无线串口通信等模块。储

收稿日期: 2015-09-06; 修回日期: 2015-09-25

作者简介: 张加魁(1991—), 男, 河北人, 本科, 助理工程师, 从事飞行器系统与工程研究。

水舱内壁和主控制舱外壁之间用于注水，如图 2。主控制舱靠近储水舱后部，经调平后再注水，机器鱼头部偏重会自动出现“低头”动作，便于机器鱼俯仰运动的设计。

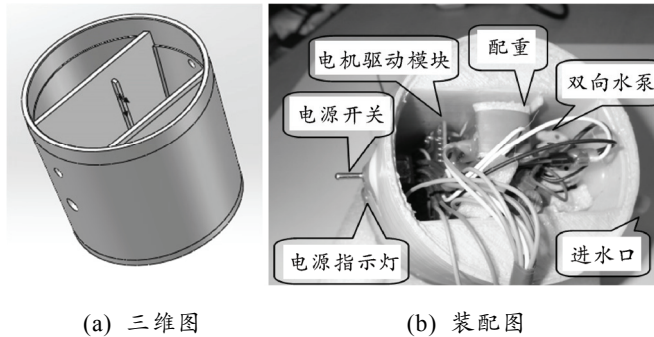


图 2 中部储水舱三维图和装配图

重心控制舱如图 3 和图 4，其前部设计有重心旋转轴，通过 L 形金属支架与 4 号舵机的保持架相连。金属支架下部装有多层配重片，通过 4 号舵机的旋转可控制机器鱼重心绕鱼身中轴线旋转，进而控制机器鱼鱼体在水中旋转不同角度，使得机器鱼尾鳍能停留在任意角度。同时机器鱼重心控制舱的重量可根据不同需要来改变。在重心控制舱顶端，笔者设计了尾部动力舱与主控制舱连接的导线通道，充分利用了空间，使整体走线布局合理。

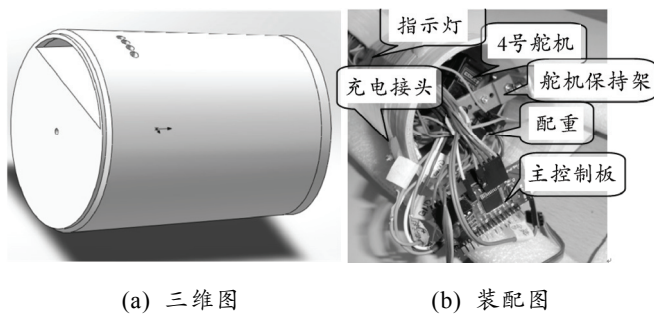


图 3 重心控制舱三维图和装配图

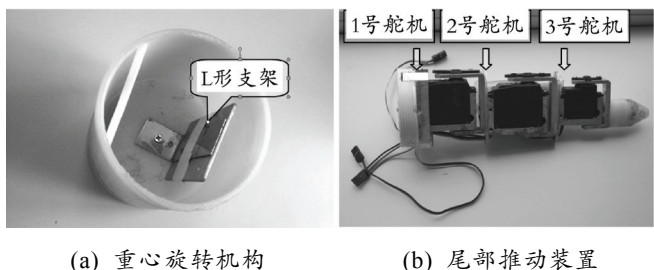


图 4 重心旋转机构和尾部推动装置

仿生机器鱼动力推动舱机械结构采用三关节机器鱼尾部动力设计^[2]。动力推进舱内部有 3 个活动关节，外部用仿鱼身橡胶皮套包裹，尾部加装满月形尾鳍。

2 运动模式设计

笔者综合几种流行的机器鱼运动方式，最终实现了机器鱼模拟鳐科鱼类和海豚类游动，并利用三舵机角度动静混合输出法，控制机器鱼的推动方式分为波动式和摆动式。同时，笔者提出一种综合俯仰运动生成方式，实验调试结果证明能控制机器鱼上升与下潜，实现机器鱼的三维游动。

2.1 拟鱼类游动方式设计

笔者设计的仿生机器鱼的初始模态为鳐科模式，即正常三关节鱼波动式推进方式。鳐科鱼类的波动输出曲线可近似看作鱼体波幅包络线和正弦曲线的合成^[3]，如图 5，其曲线方程可表示为

$$y(x, t) = (c_1x + c_2x^2)\sin(kx + \omega t) \quad (1)$$

其中： y 是鱼体横向位移； x 是鱼体的轴向位移； k 是鱼体波数 ($k=2\pi/\lambda$)； λ 是鱼体波的波长； c_1 、 c_2 是鱼体包络线的一次项和二次项系数； ω 是鱼体波频率 ($\omega=2\pi/f$)。

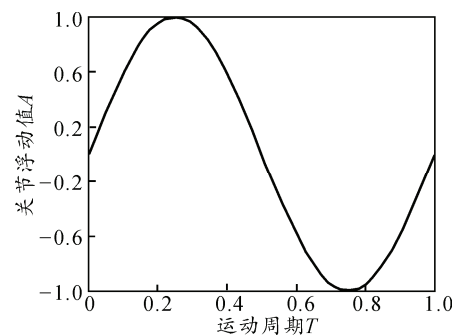


图 5 单舵机理论输出正弦曲线

对于三关节机器鱼，可以在时间上对式 (1) 进行离散处理，计算得到每一时刻 3 个舵机的轴向、径向坐标，由于程序中控制舵机需要给出 3 个舵机各个时刻的角度值，再转化为舵机的占空比。对式 (1) 离散化处理等效出机器鱼与角度相关的波动方程为

$$\theta_i = \theta_{i\max} \sin[2\pi k(L_{bi}) + \omega t + \varphi] \quad (2)$$

式中： θ_i 为第 i 关节与 x 轴的夹角； L_{bi} 为第 i 关节到坐标原点的距离； φ 为相邻坐标相位差。

若要实现转弯，实际上就是调整摆动中的中值，那么也就是对函数多项式进行上下平移，得

$$\theta_i = \theta_{i\max} \sin[2\pi k(L_{bi}) + \omega t + \varphi] + \text{dir} \quad (3)$$

式中 dir 是和转弯档位相关的一个量。

仿海豚模式是在鳐科模式基础上，笔者自行设计出的一种模拟海豚在水中运动的模式。在此种模

式下，机器鱼的尾鳍成水平姿态，运动时通过上下波动或摆动来获得向前的推力。

考虑到切换游动模式的方便、快捷，笔者在设计中采用重心旋转法来切换其游动方式。通过装在重心控制舱内的 4 号舵机来旋转配重块，使机器鱼重心绕中轴线旋转 90° 来实现 2 种游动方式的切换。

2.2 尾部推动方式设计

波动式又称鳗科模式，这种游动方式犹如正弦波形的前进一样，把身体当作推进器，所需推力最小，其速度、加速度和操纵性等综合性能比较高。摆动式推进是利用身体的短鳍，依靠较大展弦比的尾鳍划水，其产生向前推力的过程与波动式类似。摆动式相比波动式推进具有更好的机动性^[4]。

2.2.1 波动式推进法

笔者设计的机器鱼，利用装在尾部动力舱内的铝质传动骨架来耦合 1 号、2 号和 3 号 3 个舵机运动输出正弦波，模拟鳗科鱼类的尾部波动产生向前的推力。笔者设计的机器鱼在波动式推进方式的基础上，利用三舵机角度动静混合输出法可实现摆动式推进。

2.2.2 三舵机角度动静混合输出法

在尾部三路舵机控制信号中，通过舵机顺序控制法固定其中 2 个舵机的输出角度值，锁定其中立位置。同时使另外一路舵机按舵机偏摆角曲线输出。机器鱼可以分别实现以 1 号舵机、2 号舵或以 3 号舵机为活动关节进行摆动式推进，2 种方式通过改变机器鱼尾鳍的形状来获得不同的推力。

机器鱼可实现波动式和 3 种摆动式共 4 种推进方式。推进方式转换，笔者所设计的通信口令由两位 16 进制数 (0x00—0xFF) 组成。高位 0 代表推进方式选择，低位的 0—F 代表不同的推进方式，具体如下：

- 00 选择的模态为波动式推进方式；
- 01 以 1 号舵机为活动关节的摆动式推进；
- 02 以 2 号舵机为活动关节的摆动式推进；
- 03 以 3 号舵机为活动关节的摆动式推进；
- 04 是使机器鱼保持住当前姿态。

2.3 俯仰运动方式设计

笔者对机器鱼进行了俯仰运动设计：第 1 种方案主要综合了储水舱法和改变重心位置法；第 2 种方案是结合了笔者自己开发设计的仿海豚游动模

式，通过改变尾鳍的角度来实现俯仰运动。

中部储水舱主视图成梯形，其设计的储水空间比较大。在正常情况下，鱼身成水平状态，当位于主控制舱内的水泵开始正转工作时，储水舱进水，在储水舱内水会向地势低的地方即靠近鱼头方向流去，此时机器鱼会做出“低头”动作。当水泵继续工作储水舱水满时，由于笔者设计的机器鱼单位长度前部比后部储水量大，会导致机器鱼“低头”动作更明显。机器鱼尾鳍运动在竖直方向上产生的分力，机器鱼会向下运动，如图 6。

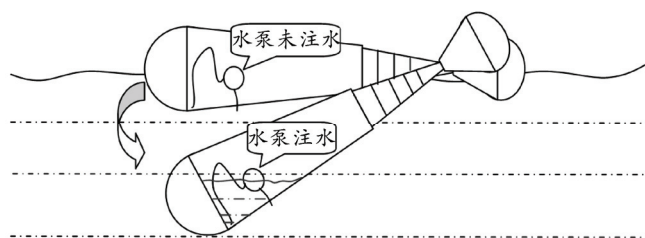


图 6 储水舱控制俯仰运动示意图

当水泵反转向外抽水时，机器鱼会由于水的浮力实现上升。

第 2 种方案是结合笔者自己开发设计的仿海豚类游动模式，通过改变尾鳍的角度来实现俯仰运动。当重心控制舱控制机器鱼重心旋转 90° 后，机器鱼的尾鳍呈水平状态。在此种状态下给机器鱼一个向下转弯的口令，机器鱼尾巴摆过一定的角度，鱼头部分自然呈现下潜的动作。当再给机器鱼一个向上转弯的口令时，尾巴向相反的方向偏转，机器鱼会呈现出上升动作^[5]。

3 控制系统设计

机器鱼的控制部分接收、处理、传输和反馈操作者发出的命令。控制结构如图 7。

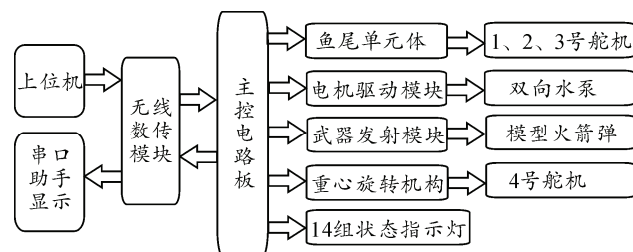


图 7 控制系统结构图

3.1 硬件电路设计

主控制板 (PCB 封装如图 8 所示) 的最小系统由 89C516RD+贴片式芯片和晶振电路组成。除机器鱼实现基本功能系统所需的 8 位状态指示灯、四路舵机控制输出口、直流电机信号控制输出口及无线数

传模块插口以外，还预留了武器发射模块插口、4 组供电输出口以及 8 位外接单列排针。

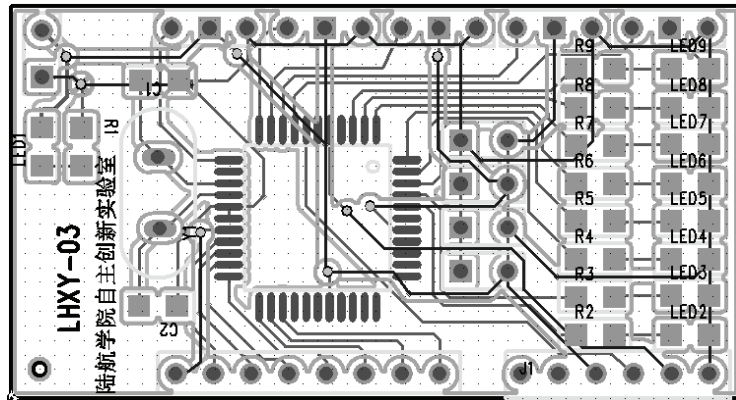


图 8 无线控制模块 PCB 封装

3.2 软件系统设计

软件系统的主要任务是接收无线数传模块接收到的上位机控制命令，经过分析处理将指令解算成对相应执行机构的控制信号，同时根据需要将机器鱼的实时状态信息发送给上位机。

3.2.1 四路电机顺序控制法

由于无线通信需收发数据，数据传输的波特率

固定为 9 600。首先要调整中断的优先级。在初始化过程中将串口中断定为最高优先级，T2 定时中断，其次，T0 定时中断为最低，之后将 4 个舵机置低电平^[6]。在程序中利用 T0 定时器产生 20 ms 的 PWM 波周期，结合 T2 定时器 16 位自动重装定时功能来产生高精度的定时中断，分为 10 步来控制四路舵机的占空比输出，如图 9。

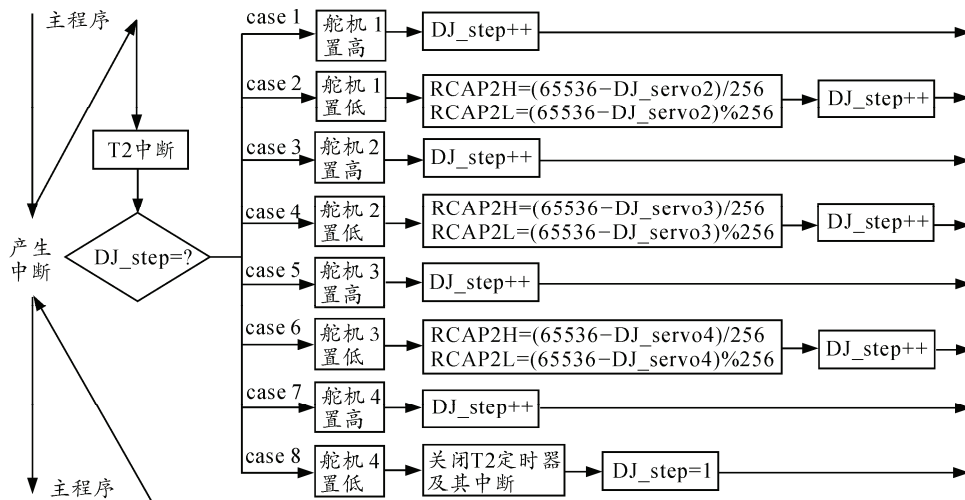


图 9 四路舵机顺序控制法流程

3.2.2 时长控制信号法

在水泵控制中采取时长控制信号法来控制水泵工作。利用信号输出的时长，单片机定时器到一定时长将 I/O 口输出置零，被控元件停止工作。

主控制模块解算处理无线数传模块接收到的控制命令，将得到的结果即需要的水量送入水泵控制函数 SB_Command(uint)，经计算得出水泵需要工作的时间。通过设置 T0 定时器每 20 ms 中断一次，产生脉宽调制 (pulse-width modulation, PWM) 波周

期，利用 PWM 波的周期时间来控制水泵工作时间，从而达到控制进水量的目的。

4 混合游动模式综合实验

机器鱼的游动与机器鱼的整体机构系统设计关系密切。不同机器鱼的外形、控制等设计各不相同，但其运动规律存在着一定的相似性。机器鱼水下实验如图 10。在实验中，笔者主要针对本款机器鱼的摆动频率、摆动幅度和摆动长度 3 个参数做研究，旨在找出其对机器鱼游动速度的影响。



图 10 机器鱼水下实验

4.1 摆动频率

实验中改变机器鱼的游动频率观察其游动规律，实验发现：机器鱼的游动速度在一定范围内随着摆动频率的增加而变快；但当达到一定频率后，速度反而降低，存在转折频率(如图 11)。笔者认为这是受限于机器鱼的机械结构和控制系统。不同的机器鱼甚至是每一条机器鱼都具有转折频率，在摆动频率大于这一频率后，速度不会上升反而降低。

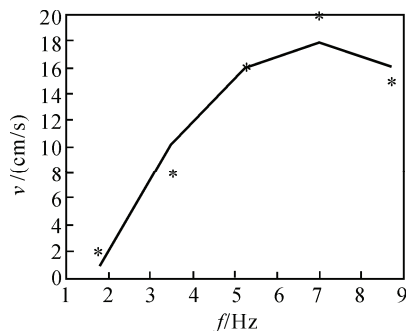


图 11 游动频率对速度的影响

4.2 摆动幅度

鱼类在游动中改变尾鳍摆动的幅度同样可以改变其运动速度。针对本款机器鱼，经实验测得数据绘制出图 12。图中给出了其在不同摆动幅度(DJ_a)下的游动速度值。在同一摆动长度和同一摆动频率下，尾鳍摆动幅度越大速度越快。笔者认为在摆动频率相同时，尾鳍摆幅越大其整合尾部涡流的能力越强；因此，机器鱼游动的速度也就越快。

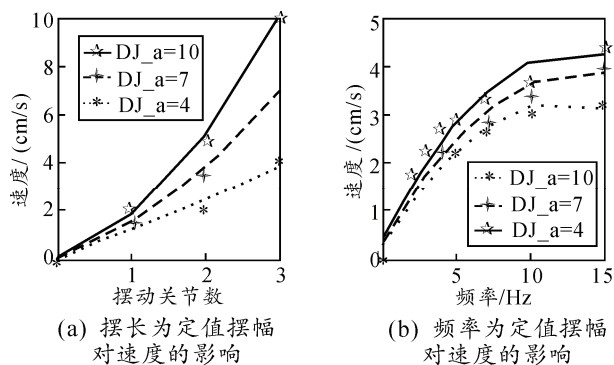


图 12 摆动幅度对速度的影响

4.3 摆动长度

机器鱼鱼体参与游动的长度不同，其游动速度也存在差距。在本款机器鱼的调试过程中，波动式明显比摆动式的速度快。图 13 是尾鳍在同一摆动频率和摆幅下，通过改变参与摆动的机器鱼鱼体长度进行的实验。分别通过锁定 1 号、2 号、3 号不同的摆动关节来调整机器鱼的摆动长度。由图 13 可知：在机器鱼尾鳍全部长度参与摆动时速度最快，随着参与运动的尾鳍长度减短，机器鱼的游动速度会降低，当没有关节参与摆动时速度为零。

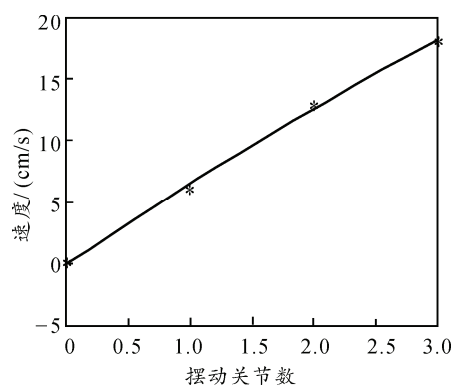


图 13 摆动长度对速度的影响

5 结束语

笔者从机械结构、运动模式和控制系统 3 个方面入手，详细介绍了新型混合游动模式机器鱼的制作和实验过程。在实验后期对机器鱼进行了功能拓展，包括视频传输和武器发射功能。实验调试结果表明：新型机器鱼运动情况良好，能够实现波动式和摆动式前进方式以及仿鳃鱼类和仿海豚类的游动方式；而且将 4 种推进方式和 2 种游动方式结合再加之俯仰运动，共可实现 9 种运动模式，并实现了原设计中多种游动模式的顺利切换。

参考文献：

- [1] 李卫京, 常春雷, 缪万波. 涡轮轴发动机结构与强度 [R]. 陆军航空兵学院, 2010.
- [2] 李卫国, 周晓天, 艾志华, 等. 仿生机器鱼机械结构使用综合加工技术的应用[J]. 兵工自动化, 2014, 33(12): 84-89.
- [3] 苏琦, 李卫京. 三舵机仿鳃科机器鱼动力系统改进与波形实验研究[J]. 兵工自动化, 2013, 12(5): 90-93.
- [4] 王光明, 沈林成. 水下仿鱼推进器的分析[J]. 兵工自动化, 2006, 25(5): 7-9.
- [5] 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.
- [6] 彭非, 苏琦, 李卫京. 三舵机仿鳃科机器鱼控制系统 [J]. 兵工自动化, 2013, 32(12): 90-93.