

doi: 10.7690/bgzd.2022.12.007

一种六自由度仿生机器海豚

谭祖玮¹, 张骋浩¹, 孙卓慧¹, 高南¹, 贾永霞^{1,2}, 谢广明³

(1. 清华大学航天航空学院, 北京 100084;

2. 清华大学力学国家级实验教学中心, 北京 100084; 3. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘要: 为提升机动性与灵活度, 设计一种具有图像传输功能的六自由度仿生机器海豚。对机器海豚的刚性头部、偏航腰部和两关节俯仰尾部的四关节系统进行设计; 采用 Arduino Uno3 单片机输出 PWM 信号控制 7 路舵机, 制定电气系统控制方案和防水密封方案, 利用 PS2 手柄遥控机器海豚, 通过尾部两关节上下摆动实现推进, 腰部偏航关节实现转弯, 舵机驱动配重块和一对单自由度的胸鳍实现俯仰姿态调节, 通过实验验证方案的可行性。结果表明, 该设计能实现机器海豚加减速前进、偏航、俯仰、原地转弯和双胸鳍拍水的运动姿态。

关键词: 机器海豚; 仿生; 背腹式推进; 偏航; 俯仰

中图分类号: TP242 **文献标志号:** A

A Six-degree-of-freedom Bionic Robot Dolphin

Tan Zuwei¹, Zhang Chenghao¹, Sun Zhuohui¹, Gao Nan, Jia Yongxia^{1,2}, Xie Guangming³

(1. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In order to improve the mobility and flexibility, a six-degree-of-freedom bionic robot dolphin with image transmission function is designed. A 4-joint system consisting of a rigid head, a yawing waist and a 2-joint pitching tail of the robot dolphin is designed. Arduino Uno3 MCU is used to output PWM signals to control 7 steering engines, the electrical system control scheme and waterproof sealing scheme are formulated, PS2 handle is used to remotely control the robot dolphin, the tail joint swings up and down to achieve propulsion, the waist yaw joint turns, and the steering engine drives the counterweight block and a pair of single-degree-of-freedom pectoral fins to achieve pitch attitude adjustment. The feasibility of the scheme is verified by experiments. The results show that the robot dolphin achieves the motion postures of acceleration and deceleration, yaw, pitch, turning in place and double pectoral fins beating water.

Keywords: robot dolphin; bionics; dorso-ventral propulsion; yaw; pitch

0 引言

海豚具有优良的游动性能, 采取背腹式游动, 依靠尾部和尾鳍的上下摆动及鳍肢的配合, 不仅具有较高的游速, 而且游动效率高、扰动小、转弯灵活、机动性高, 能够完成跃水、空中转体等复杂动作。与鱼类等水生生物相比, 海豚在减阻性能、游动性能、学习能力等方面表现优秀。机器海豚在海洋工程领域具有广阔的应用前景与价值, 可用于近海防御作战、水下勘探、水下考古等; 同时, 可用于科技馆普及知识、高端智能玩具的开发等。

至今, 国内外已研制出多款仿生机器海豚。Nakashima 等^[1]开发出两关节的机器海豚; Dogangil 等^[2]开发了四连杆的机器海豚, 并进行了相应的建模与仿真研究, 利用胸鳍结构实现转向和浮沉运动; 王龙和 Yu 等^[3-5]研制出可利用胸鳍结构实现俯仰运

动和采用可调幅值的曲柄连杆机构实现背腹式推进的机器海豚; 汪明等^[6]研究了机器海豚多模态游动的 CPG 控制, 通过滑块机构、转弯单元、摆动单元与尾鳍驱动单元实现多模态运动; 张磊等^[7]开发了一款基于尾鳍推进的三关节机器海豚, 可实现沉浮和平面运动; 梁胜文等^[8]设计了一种基于 STM32 的多自由度机器海豚; 杨忠华等^[9]研究了机器海豚直游运动时胸鳍/尾鳍协同推进的运动学和动力学模型。

为提升机器海豚的机动性和灵活度, 最大程度地模拟真实海豚的游动特征, 笔者采用颈部关节、腰部关节、尾部关节与两侧胸鳍的一体化结构设计, 实现机器海豚的加减速前进、偏航、俯仰、升潜、原地转弯运动模式, 并展示了机器海豚在实验水池和自然水域中游动的实验结果。为新一代集高效性、

收稿日期: 2022-08-27; 修回日期: 2022-09-23

基金项目: 清华大学本科教学改革项目(ZY01_02)

作者简介: 谭祖玮(2000—), 男, 江西人, 硕士, 从事工程力学研究。E-mail: 2387045397@qq.com。

通信作者简介: 贾永霞(1983—), 女, 山西人, 博士, 高级工程师, 从事实验流体力学、仿生机器鱼研究。E-mail: yongxiajia@tsinghua.edu.cn。

机动性、灵活性和隐形性于一体的水下仿生航行器的设计提供了研究思路 and 基础实验数据。

1 机器海豚的结构设计

海豚隶属鲸目齿鲸亚目海豚科，是体型较小的鲸类，呈流线型，具有胸鳍、背鳍和新月形尾鳍^[10]。海豚的游动模式类似于鱼类的鲹科加月牙尾推进，其身体的前 1/3 部分为刚性，通过鱼体的后 1/3 部分的尾鳍和尾柄的大范围摆动，实现高效游动。笔者依据海豚的仿生学特性，设计了海豚的外壳。根据推进效率较高的鲹科加新月形尾鳍的推进模式，设计了海豚刚性头部、偏航腰部和两关节俯仰尾部的四关节系统，双侧胸鳍与重心调节机构。

1.1 海豚外形设计

本机器海豚的外形是仿照宽吻点斑原海豚的体型和骨骼特征进行仿生设计。对于 3D 打印结构，胸鳍、尾鳍采用光敏树脂 8 000，其余部分采用 SLA 材料。整体设计如图 1 所示，总体尺寸如图 2 所示。

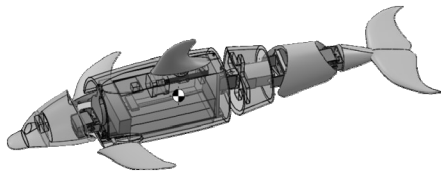


图 1 机器海豚整体设计

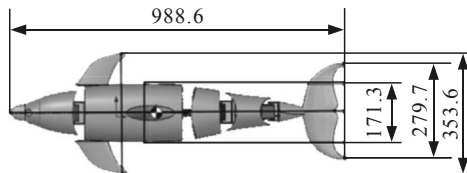


图 2 机器海豚总体尺寸(单位: mm)

1.2 海豚运动设计

为实现机器海豚的高机动性和灵活性，依据海豚的运动姿态设计了 6 个运动自由度：颈部关节可通过上下摆动辅助实现俯仰运动；两侧胸鳍可改变攻角辅助调整运动姿态；腰部偏航关节左右摆动实现海豚的转向运动；尾部设置 2 个上下摆动的关节，通过拟合正弦波形，实现海豚的加减速前进和俯仰运动。另外，在海豚内腔设置有一个重心调节机构，可调节重心前后位置，辅助实现浮潜运动。

1.3 海豚防水设计

该样机采用总体防水和局部防水结合的方式。总体防水是对海豚壳体及连接处做防水处理，局部防水是对海豚内部关键器件进行防水处理。机器海豚的运动模态由多个关节协调配合实现，各关节连

接处采用弹性膜进行密封；同时，采用多种胶水对机器海豚进行关节处的防水处理。在海豚内部，将树莓派、Arduino 等电子器件封装于防水盒中，防水盒盖处打孔便于走线。在盒盖的凹槽内嵌入密封条，四周用螺丝将其与盒身压紧。盒盖的走线处用电硅橡胶进行密封处理。定制防水舵机实现局部防水。充电口和数据传输口通过背鳍引出。

1.4 海豚配重设计

机器海豚自重为 5.6 kg。用 Solidworks 计算出机器海豚的体积(10 700 cm³)，得出恰能使海豚悬浮于水中，并且前后左右都能达到平衡所需的配重块质量和位置。通过多次组装调试得到海豚悬浮于水中的最终配重方案。

2 机器海豚的电气设计

2.1 电路设计

机器海豚的电气设计原理图如图 3 所示。采用 ArduinoUno3 微控制器对机器海豚运动姿态进行控制。Arduino 通过 7 个通道输出 PWM 信号分别控制 7 个舵机。Arduino 控制程序通过预留的 USB 接口从 PC 上下载。通过 PS2 手柄发射信号实现对机器海豚的遥控。

电源采用 3 s 锂电(容量 2 500 mAh，电压 11.1 V)，经过稳压模块降压到 8.4 V，对舵机和 Arduino 供电；Arduino 的 5 V 电压出口为天线供电，用来接收 PS2 手柄发出的控制信号；利用稳压模块自带的开关作为整个电路的开关。

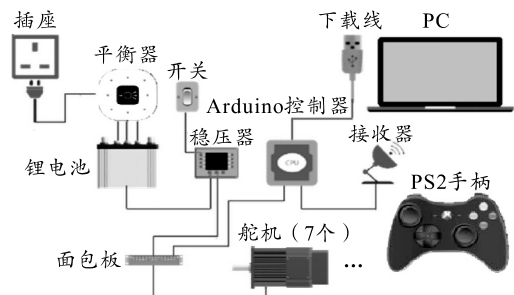


图 3 电气设计原理

此外，在机器海豚头部装有摄像头，与树莓派连接并通过树莓派实时回传图像信息。树莓派同时也与 Arduino 控制器连接，从而可以通过树莓派实现对机器海豚控制程序的远程下载更新。

2.2 控制程序设计

定义相位变量 time0，使其以 20°为步长在 0°~360°内变化。为每个相位点设置固定的角度偏移量

并转换成 PWM 值，反映各个舵机在一个周期内的角度变化。在经历一个周期后，对相位进行清零，使得舵机运动持续循环。对于每个运动姿态（前进、上浮、下潜、左转与右转）均编写运动函数，使舵机主轴按照预设的函数图像转动。其中：前进函数增大了摆动的幅度，使海豚能够更有效地向前推进；上浮和下潜函数在前进函数的基础上增加了初始的偏移量，从而实现尾鳍的不对称摆动；左转右转函数改变偏航舵机的转角并配合胸鳍攻角变化。调用 <Servo.h> 舵机控制库，使用库函数 servo.writeMicroseconds() 为各个舵机写入 PWM 值；使用 delay 函数调控各个相位点之间的时间间隔，实现摆动频率变化，完成海豚加减速前进。调用 <PS2X_lib.h> 手柄控制库，使用库函数 ps2x.read_gamepad() 读取手柄状态，为每个手柄按键关联特定的运动函数，实现对不同运动姿态的控制。

3 机器海豚运动学和动力学仿真

对机器海豚 3D 模型进行运动学和动力学仿真，分析机器海豚在水中的运动与受力，并用仿真结果指导后续的制作与测试。

3.1 机器海豚运动学仿真

根据海豚的背腹式游动特点，对模型进行简化，使其头部为刚性、仅保留腰部偏航关节、尾部 2 个俯仰关节的自由度，简化模型如图 4 所示。利用 SolidWorks 中的运动算例得到运动仿真。尾部两关节摆动角度分别如式(1)、(2)所示。

$$\theta_1 = \arcsin(H/l)\sin(2\pi ft); \quad (1)$$

$$\theta_2 = \left(\frac{2\pi fH}{U} - \alpha \right) \sin(2\pi ft + \phi) - \arcsin\left(\frac{H}{l}\right) \sin(2\pi ft)。 \quad (2)$$

式中： θ_1 是靠近腰部的关节角度； θ_2 是靠近尾鳍的关节角度； f 是摆动频率； ϕ 是两关节运动的相位差； H 是尾鳍摆动的中心轴最大垂直位移； l 是靠近腰部的关节到尾鳍末端的距离； U 是海豚前进速度； α 是海豚尾鳍击水角度，文中选取为 20° 。

3.2 机器海豚动力学仿真

3.2.1 海豚整体压力分布

对机器海豚装配体模型进行了简化，将关节处平滑连接称为一体，与原始模型尺寸一致。利用 ANSYS WORKBENCH 对海豚进行了流固耦合仿真。导入 ANSYS 中进行智能网格划分，计算模型

采用 $k-\epsilon$ 湍流模型，入口处边界条件为速度 0.5 m/s 。

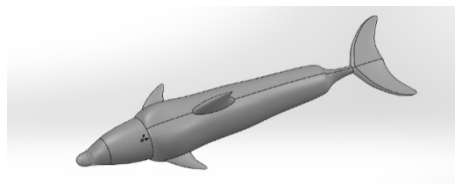


图 4 机器海豚简化模型

不可压缩流动的 $k-\epsilon$ 模型方程如式(3)、(4)所示。

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j K)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{e1} \frac{\epsilon}{K} G_k - C_{e2} \rho \frac{\epsilon^2}{K}。 \quad (4)$$

$k-\epsilon$ 模型通过湍动能方程(3)和湍动能耗散率方程(4)封闭湍流 Navier-Stokes 方程。其中 G_k 是 K 的生成项； $-\rho \epsilon$ 是 K 的耗散项； $C_{e1} \frac{\epsilon}{K} G_k$ 是 ϵ 的生成项； $-C_{e2} \rho \frac{\epsilon^2}{K}$ 是 ϵ 的耗散项。

在 WORKBENCH 中进行流固耦合分析得到了压力分布和最大、中间、最小主应力分布，如图 5—8 所示。结果表明，海豚的头部、背鳍前端有着较大的应力分布，所以在结构的相关部分进行加固处理。

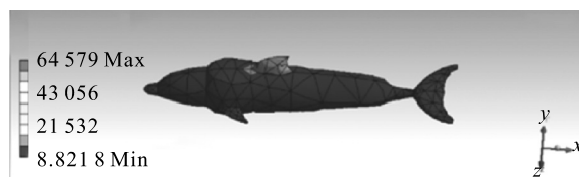


图 5 机器海豚等效压力分布(单位: Pa)

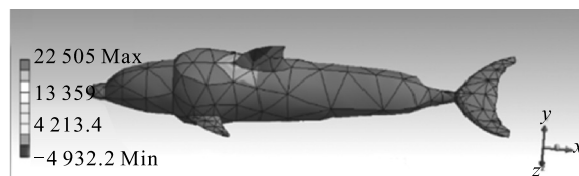


图 6 机器海豚最大主应力分布(单位: Pa)

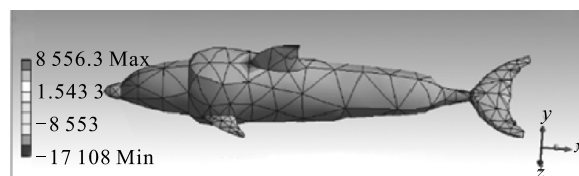


图 7 机器海豚中间主应力分布(单位: Pa)

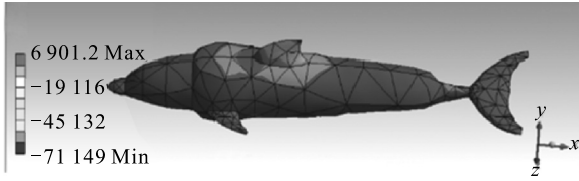


图 8 机器海豚最小主应力分布(单位: Pa)

3.2.2 海豚攻角改变时的升阻力

对海豚尾部进行流体仿真, 得到不同攻角时尾部的升力和阻力, 这对于运动轨迹设计具有指导意义。将海豚刚体模型攻角设置为 0° 、 10° 、 20° 、 30° , 导入 Fluent 中进行智能网格划分, 计算其升力与阻力。计算模型采用湍流模型, 入口处边界条件为速度 0.5 m/s 。得到各攻角对应升力与阻力如表 1 所示。可以看出, 随着攻角增大, 阻力和升力同时增大, 且升力增幅大于阻力。

表 1 不同攻角下机器海豚尾部的升阻力

攻角/ $(^\circ)$	阻力/N	升力/N	升阻比
0	12.930	-1.095	-0.085
10	14.865	13.346	0.898
20	21.167	25.491	1.204
30	31.033	34.573	1.114

4 仿生机器海豚实现功能

机器海豚样机如图 9 所示, 能够实现基本的游动及部分复杂姿态游动, 包括直行、加减速、直行转弯、原地转向、上升和下潜等。



图 9 机器海豚样机

4.1 直行

通过尾部的 2 个关节以大约 60° 的相位差进行正弦转动形成正弦波, 推动海豚向前。海豚前进速度平稳、姿态较为优美、平衡性较好。机器海豚直行姿态如图 10 所示。



图 10 机器海豚直行姿态

4.2 加减速

通过改变 Arduino 输出相邻目标 PWM 信号的间歇时间, 控制舵机转动的速度以实现机器海豚的加减速运动。机器海豚加减速较为灵敏, 能够较快地实现加速和减速运动。

4.3 直行转弯

在直行过程中, 通过腰部偏航关节的转动配合胸鳍的转动实现机器海豚的直行转弯, 在中速游动情况下, 转弯半径大约为 2~3 倍体长。机器海豚转弯姿态如图 11 所示。



图 11 机器海豚转弯姿态

4.4 原地转向

通过转动腰部偏航关节并以适当的速度摆动尾部关节可实现海豚原地转圈, 从而实现向任意方向的转向, 增强了海豚的机动性和灵活性。同时, 这一游动姿态较为优美, 可用于机器海豚的表演。机器海豚原地转向姿态如图 12 所示。



图 12 机器海豚原地转向

4.5 上升和下潜

通过尾鳍的不对称摆动实现了机器海豚的上升和下潜。当海豚身体形成“U”字形摆动时, 海豚尾部摆动产生的推进力带动海豚上升, 能够将头部持续暴露在水面上, 类似人类游泳姿态中的踩水。这一游动姿态配合头部的抬起, 可以用于机器海豚表演中的问好、顶球等动作。上升姿态如图 13 所示。当海豚身体形成“倒 U”字形摆动时, 尾部产生的推进力将推动机器海豚下潜。上升和下潜姿态配合海豚头部的摆动可以实现海豚在水中的起伏游动, 有较好的观赏性。下潜姿态如图 14 所示。



图 13 机器海豚上升姿态



图 14 机器海豚下潜姿态

5 结束语

笔者仿照海豚背腹式游动推进模式，设计一款可实现多种运动模式的机器海豚。通过尾鳍和尾部的上下摆动、腰部偏航、配重块调节俯仰姿态、胸鳍改变攻角，可更加逼真地模拟真实海豚的运动，实现加减速前进、偏航、俯仰、原地转弯和胸鳍各自拍水等运动形式，实现机器海豚的多种游动姿态。

参考文献：

[1] NAKASHIMA M, TSUYOSHI I I, ONO K. Experimental Study of a Two-Joint Dolphinlike Propulsion Mechanism

(上接第 8 页)

参考文献：

- [1] 刘卓. 稳像式火控瞄准镜伺服系统设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [2] 李剑峰, 王剑, 李振平, 等. 履带车辆行进间射击的随机响应研究[J]. 车辆与动力技术, 2009(3): 9-12.
- [3] 李小明, 杨志斌. 火炮[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2004: 8-10.
- [4] 王钦钊, 谷晓伟, 李小龙, 等. 基于高机动条件下的坦克火控系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 19-21.
- [5] 王天雄, 薄煜明, 赵高鹏. 高速行进坦克身管速度对射击精度影响[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(1): 8-11.
- [6] 王钦钊, 谷晓伟, 李小龙, 等. 基于高机动条件下的坦克火控系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 19-21.
- [7] 李长兵, 袁东, 马晓军, 等. 高速机动条件下坦克火炮系统扰动力矩谱研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 582-589.
- [8] 韩宝坤, 李晓雷, 王昌田, 等. 高速履带车辆平稳性能

(1st Report, Experiment of Small Machine)[J]. 日本机械学会论文集(B编), 2000, 66(643): 55-62.

- [2] DOGANGIL G, OZCICEK E, KUZUCU A. Modeling, simulation, and development of a robotic dolphin prototype[C]//Mechatronics & Automation, IEEE International Conference. IEEE Xplore, 2005.
- [3] 王龙, 喻俊志, 胡永辉, 等. 机器海豚的机构设计与运动控制[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(3): 294-301.
- [4] YU J Z, HU Y H, HUO J Y, et al. An adjustable Scotch Yoke Mechanism for Robotic Dolphin[C]// Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Sanya, China, 2007: 513-518.
- [5] YU J Z, HU Y H, HUO J Y, et al. Dolphin-like propulsive mechanism based on an adjustable scotch yoke[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(3): 603-614.
- [6] 汪明, 喻俊志, 谭氏, 等. 机器海豚多模态游动 CPG 控制[J]. 自动化学报, 2014, 40(9): 1933-1941.
- [7] 张磊, 孟中杰. 基于尾鳍推进模型的三关节仿生机器海豚系统[J]. 兵工自动化, 2016, 35(12): 72-77.
- [8] 梁胜文, 陈宏, 邵警锋, 等. 一种基于 STM32 的多自由度机器海豚的设计[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(4): 4.
- [9] 杨忠华, 巩伟杰. 胸鳍/尾鳍协同推进的机器海豚动力学建模与仿真[J]. 船舶工程, 2021, 43(9): 7.
- [10] FISH F E, ROHR J J. Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance[R]. United States Navy Technical Report 801, 1999: 1-187.
- *****
- 仿真及影响因素分析[J]. 兵工学报, 2004(5): 513-516.
- [9] 胡继辉, 侯远龙, 高强, 等. 坦克炮控系统神经网络自适应滑模控制方法[J]. 火力与指挥, 2018, 43(6): 118-121, 126.
- [10] 金涛, 严洪森, 李东晓. 坦克行进间发射的 PID 控制[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(7): 18-19, 22.
- [11] HU W W, ZHANG S G, NIU L. Self-Adaptive PID Control Based on RBF Network for Trajectory Tracking of Dual-Mass Servo System[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1871(1): 117-120.
- [12] ZHAO J W, XIANG Y C, PENG Y, et al. The control of the movement of intelligent car based on self-adaptive non-linear algorithm[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(11): 89-98.
- [13] XU L, YAO B. Adaptive robust control of mechanical systems with non-linear dynamic friction compensation[J]. International Journal of Control, 2008, 81(2): 167-176.
- [14] 马晓军, 王福兴, 袁东. 全电式炮控系统非线性特性及其控制策略[J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25(1): 63-67, 82.