

doi: 10.7690/bgzd.2020.11.020

一种双自由度胸鳍仿生机器鱼

梁 准¹, 张子扬¹, 林子雄¹, 王清昊³, 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示范中心, 北京 100084;
3. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘要: 为提升机动性, 设计一种由双自由度胸鳍和仿鲹科鱼尾部相结合的运动推进型仿生机器鱼。分别对机器鱼的双自由度胸鳍、身体与尾部弹簧传动机构进行设计, 采用 Arduino 控制板及一体化的硅胶膜, 基于电气系统控制方案和防水密封方案, 通过对 CPG 单元进行建模与控制, 给出机器鱼在不同运动形态下的控制方法, 并通过实验验证了方案的可行性。结果表明, 该设计实现了双自由度胸鳍机器鱼直行、转弯、下潜的运动姿态。

关键词: 机器鱼; 双自由度胸鳍; CPG; 运动控制**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A

A Bionic Robotic-fish with Two Degrees of Freedom Pectoral Fin

Liang Zhun¹, Zhang Ziyang¹, Lin Zixiong¹, Wang Qinghao³, 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: To increase its mobility, a new biomimetic robotic-fish propelled by pectoral fins with two degrees of freedom and the flapping tail was designed. The pectoral fins, fish body, and the tail spring transmission mechanism were designed separately. An Arduino control board and integrated silica gel membrane were used. A CPG unit was used to model and control the robotic fish under different moving postures based on the electrical system control and waterproof sealing scheme. The feasibility of the model and control method was verified by simulations and experiments. The results show that the design successfully achieved rectilinear motion, turn, and dive of two-degree of freedom pectoral fin.

Keywords: robotic fish; two-degree of freedom pectoral fin; CPG; motion control

0 引言

机器鱼是以仿生为主题的新型水下探测器, 具有噪声小、仿生性强等特点, 在推进效率、机动性等方面具有巨大的研究价值, 是近年来水下探测器的研究热点之一。机器鱼游动的推进模式可以分为中央鳍/对鳍 (the median and/or paired fin, MPF) 推进和身体/尾鳍 (the body and/or caudal fin, BCF) 推进。Triantafyllou 介绍了麻省理工学院开发的第 1 条仿生机器鱼 RoboTuna, 采用多关节传动尾鳍驱动模式, 实现了鱼体在水下推进的高效性能^[1]。王田苗等详细介绍了 MPF 模式运动优势的研究工作^[2]。王安忆等介绍了 BCF 推进模式运动优势的研究工作^[3]。部分鱼类也采用胸鳍摆动方式实现推进, 推进效率较低, 但是具有很好的机动性和稳定性, 适用于执行特殊任务的水下机器人开发^[4]。汪明等提出一种单自由度胸鳍拍动推进的仿生机器鱼设计模型, 实现直游、倒游、胸鳍-尾鳍协调运动^[5]。李宗

刚等设计了一款双自由度胸鳍机器鱼, 最大巡游速度为 0.07 m/s^[6-7]。张志刚等设计了一款多关节仿鱼运动推进机构, 模拟了鱼体运动曲线^[8]。Katzschmann 等设计制作了一款 3D 打印的软体机器鱼, 并利用声学控制对水下生物进行探索^[9]。该软体机器鱼在自适应模拟鱼体曲线方面表现良好, 其制作难度较大、成本较高。

笔者介绍 CPG 模型设计运动算法^[10-11], 采用双自由度胸鳍、身体与尾鳍的一体化结构设计, 实现鱼机器鱼的直行、后退、转弯、上升、下潜运动模式, 并展示了机器鱼在实验水池和自然水域中游动的实验结果。

1 总体结构设计

如图 1 所示, 双自由度胸鳍机器鱼整体结构由流线型头部、一体化身体与尾鳍、双自由度胸鳍 3 个部分构成。

流线型头部为刚性结构, 放置控制机器鱼运动

收稿日期: 2020-06-24; 修回日期: 2020-07-07

基金项目: 清华大学国强研究院(2019GQG1012)

作者简介: 梁 准(1999—), 男, 河南人, 学士, 从事工程力学研究。E-mail: liangz17@mails.tsinghua.edu.cn.

通信作者: 贾永霞(1983—), 女, 山西人, 博士, 高工, 从事实验流体力学、智能水下机器人研究。E-mail: yongxiajia@tsinghua.edu.cn.

的单片机、电源、舵机和接收外部遥控信号的通信模块；流线型头内的舵机与尾鳍通过弹簧相连以传递动力，形成机器鱼游动的主要推力。双自由度胸鳍与鱼体内部两侧的舵机连接，形成第 1 个自由度，鱼体外侧的胸鳍部分各包含一个舵机，形成第 2 个自由度。这种双自由度胸鳍结构的功能是，提供机器鱼游行的辅助推力，同时实现转弯、俯仰等运动。在流线型头部外测下方添加配重，实现受力平衡并准确调节机器鱼的重心位置。机器鱼骨架蒙皮采用一体化的硅胶膜，实现机器鱼的自由运动，同时具有密封防水功能。

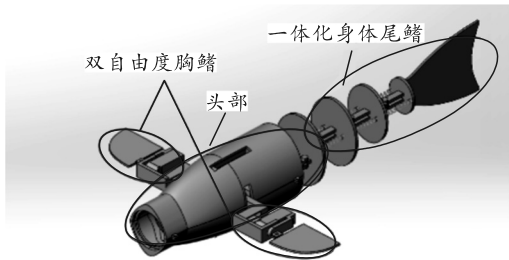


图 1 总体结构

1.1 双自由度胸鳍结构设计

如图 2 所示，双自由度胸鳍结构由 3 个连接件构成，通过舵机驱动实现胸鳍的双自由度运动。连接件 1 与鱼体连接，鱼体内的舵机带动胸鳍实现绕弦向轴的转动。连接件 2、3 组合，和连接件 1 连接，通过连接件 1 上的舵机带动实现绕展向轴的转动；3 个连接件的配合处采用凹槽与凸起方式限制运动自由度。通过 3 个连接件协调运动，实现胸鳍薄片绕弦向和展向的双自由度运动。

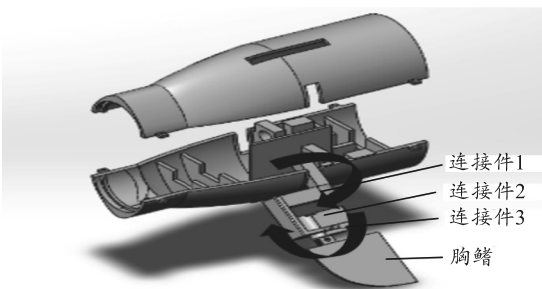


图 2 流线型头部与胸鳍装配

1.2 身体与尾鳍的一体化结构设计

机器鱼身体与尾鳍结构如图 3 所示，采用身体与尾鳍间弹簧传动的一体化设计。结构共有 3 个转动副，每个转动副辅之以 2 个弹簧实现鱼体波动与尾鳍的周期摆动。尾鳍形状参数与文献[12]中给出的最优尾鳍参考尺寸一致，可以提高机器鱼推进效率和游动速度。

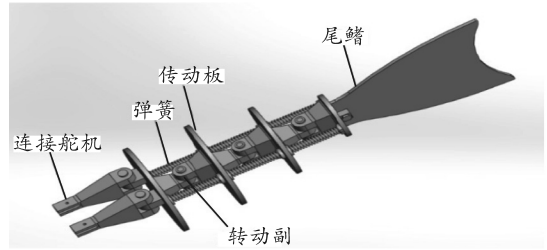


图 3 身体与尾鳍结构

1.3 电气系统设计

如图 4 所示，机器鱼的芯片采用 Arduino 控制板，控制输入单元采用 PS2 手柄及接收器作。双胸鳍的双自由度的输出单元采用 4 个 sg90 小舵机，尾鳍输出单元采用 mg995 大舵机。供电系统采用 7.4 V 锂电池。机器鱼控制原理：Arduino 单片机接收 ps2 手柄的无线信号以控制舵机周期转动，从而实现不同运动模式下胸鳍和尾鳍的协作运动。

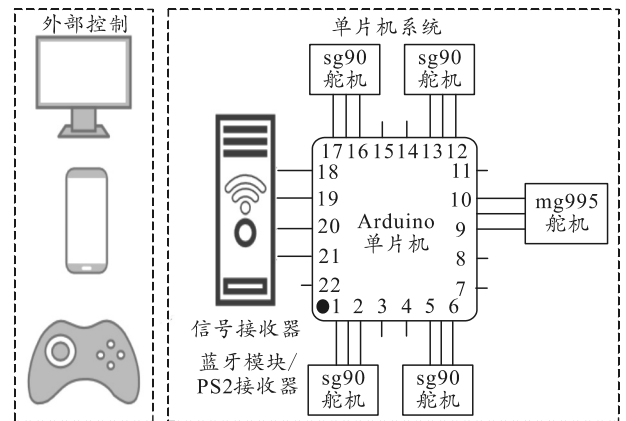


图 4 电气系统

1.4 蒙皮防水密封设计

蒙皮材料采用具有一定延展性的硅胶，厚度为 0.5 mm。硅胶之间采用 704 硅橡胶密封缝隙。704 硅橡胶具有优良的密封性和耐老化性，可以保证蒙皮结实可靠。流线型头部正前方硅胶开一个小孔，小孔与流线型头部预留孔采用同样方法密封。预留孔采用密封圈方式封合，完成密封。预留孔里边封装电源充电线和下载器线，便于操作。实物如图 5 所示。

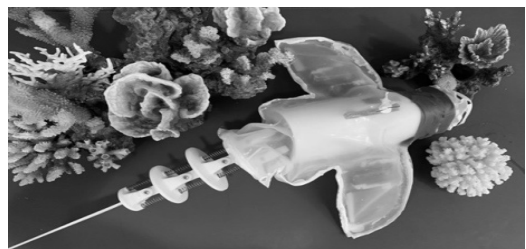


图 5 实物完成

2 CPG 运动算法设计

机器鱼的中枢模式发生器 (central pattern generator, CPG) 单元包括尾鳍、第一自由度 (胸鳍拍动, 拓扑中分别为左 1、左 2) 以及第二自由度 (胸鳍摆动, 拓扑中右 1、右 2)。根据最近神经元耦合模型, CPG 单元间的拓扑结构如图 6 所示。

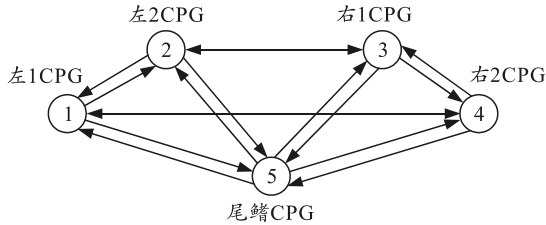


图 6 CPG 单元间的拓扑结构

笔者采用文献[6]给出的公式:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_i &= \omega_i(x_i - y_i) - \mu_i x_i(x_i^2 + y_i^2) + \sum_{j=i-1, i+1} a_{ij} x_j \\ \dot{y}_i &= \omega_i(x_i + y_i) - \mu_i y_i(x_i^2 + y_i^2) \end{aligned} \right\} (1)$$

由上式可知, 胸鳍 CPG 单元间产生相互影响。通过对单个 CPG 单元进行力学分析, 设计了机器鱼在不同运动形态下的控制方法。

2.1 CPG 单元受力分析

对于由舵机控制的 CPG 单元, 符合振荡器模型。图 7 为单个振荡器在水中的情况 (假设以一端为中心转动, 环境为静水)。

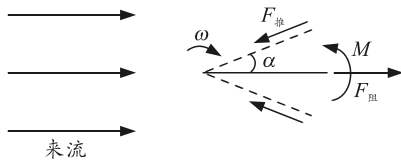


图 7 振荡器受力

运动形式为

$$\theta = \mu \cos(\omega t + \varphi) (2)$$

其中: φ 为初相位; $\alpha = \omega t + \varphi$ 为相对来流方向的转角。

在单向转动过程中, 水对振荡器产生 2 个力: 与转动方向相反的转动力矩和转动中心方向的推力。这 2 个力的大小与振荡器的面积、频率和振幅呈正相关。如果环境为非静水, 例如振荡器在前进的情况下, 还会受到一个向后的阻力, 阻力大小与面积和水与振荡器的相对速度成正相关。

在来流方向上有

$$\left. \begin{aligned} F &= (k_1 \omega \cos \alpha - k_2 \rho U^2 |\sin \alpha|) S_i + k_1 \omega S \sin \alpha j \\ M &= k_3 S \omega \end{aligned} \right\} (3)$$

其中: k_1 为推力系数, 与鱼体在尾部产生的涡有关, $k_1 = k_1(\alpha_{\max}, \omega)$, k_2 为阻力系数, k_3 为力矩系数;

$\omega = \pm \omega k$ 。

在以来流方向为中心的一个周期内, 对力和力矩进行积分, 得到

$$\left. \begin{aligned} \int_0^T F dt &= 4 \int_0^{\alpha_{\max}} \frac{F d\alpha}{\omega} = 4 \left(\frac{\sin \alpha_{\max} k_1 - (1 - \cos \alpha_{\max}) k_2 \rho U^2 / \omega}{\omega} \right) S_i \\ \int_0^T M dt &= 0 \end{aligned} \right\} (4)$$

由此可知: 在双向转动即一个周期内力矩相互抵消, 只有推力和水的阻力。当推力和阻力相等时, 振荡器的速度收敛。

$$U = \sqrt{k_1 \omega \sin \alpha_{\max} / (k_2 \rho (1 - \cos \alpha_{\max}))} (5)$$

在多个振荡器耦合情况下, 即在多个 CPG 单元组成的系统中, 相同方向 CPG 单元的耦合会出现一个最终收敛速度。

对于以尾鳍为核心的机器鱼 CPG 系统, 直行收敛速度可表示为

$$U = \sum a_i \sqrt{k_i \omega_i \sin \alpha_{\max i} / (k_{2i} \rho (1 - \cos \alpha_{\max i}))} (6)$$

其中 CPG 单元间的收敛速度影响系数, 与有效面积有关。 $a_5 \approx 1$ 。其他情况的收敛速度与之类似, 只是自由度增加。

综上所述, 收敛速度与角速度和最大转角有关。根据舵机运转实际情况, 角速度受舵机转速的限制, 最大转角受机械结构的限制。在一定范围内, 速度随角速度和最大转角增大而增加。选择恰当的角速度可以得到最大直行速度。

2.2 运动姿态控制方案设计

双自由度胸鳍机器鱼的随体 3 维坐标系如图 8。

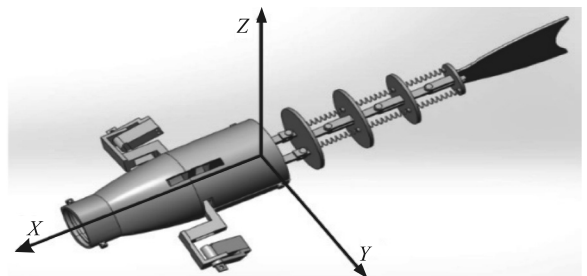


图 8 随体 3 维坐标系

根据上面的振荡器力学模型和 CPG 耦合关系, 应用于双自由度胸鳍机器鱼, 给出直行、后退、转弯、上升、下潜运动实现的方案。

1) 直行: 尾鳍以鱼体轴线为中心左右周期性摆动, 频率振幅恒定。

尾鳍提供了向前的主要推力。胸鳍提供推力的方案有以下几种:

① 胸鳍上下对称周期性摆动 (第二自由度),

此时环境为动水，根据收敛速度公式，当摆动频率足够大时，胸鳍产生的向前的阻力大于推力，相对于只有尾鳍、鱼的速度提升。

② 胸鳍上下对称周期性拍动(第一自由度)，向下拍动时，第二自由度摆动到俯仰角向下，此时来流方向为拍动线速度与鱼体前进速度的和速度反方向。如图所示，为使水对胸鳍的分力向前，要保证俯仰角小于和速度方向或让摆动线速度足够大，基于此，此种运动方式应让胸鳍外宽内窄。

另外，在拍动情况下，在尾部添加柔性薄膜以提供向前的推力方案。最终实施的是最能够体现多自由度联动的方案 2。

直行过程中的运动方程可以表示为

$$F_{\text{合}} = \left(\sum_{i=1}^5 F_i - F_{\text{阻}} \right) i = m\ddot{x}i \quad (7)$$

其中： $F_{\text{阻}} = C\dot{x}^2$ ； C 为阻力系数，与来流面积等有关； $F_i = k_i \omega_i \cos \alpha S_i$ 。

在直行情况下，胸鳍和尾鳍 CPG 单元的耦合系数应足够大，否则无法起到有效作用。

2) 后退：尾鳍不动，胸鳍反装，使原本向前的推力向后使鱼体后退。

3) 转弯：尾鳍以偏离鱼体的中心摆动，将所有的摆动放置在鱼体左右一侧。该振荡器提供一个斜向的推力，从而使鱼体向对应方向转弯。胸鳍停止转弯方向一侧的运动，另一边胸鳍做上述直行的胸鳍的运动，胸鳍的摆动能够提供前进的推力，胸鳍的拍动能够提供左右方向的力。进而提供鱼体在水平面内转弯的力矩。

以右转为例，进行运动分析。

$$F_{\text{合}} = (F_{\text{尾}} \cos \alpha_0 + F_{\text{左}})i + (F_{\text{尾}} \sin \alpha_0)j + F_{\text{阻}} = m(\ddot{x}i + \ddot{y}j),$$

$$M_{\text{合}} = (F_{\text{尾}} \sin \alpha_0 l_1 + F_{\text{左}} l_2)k + F_{\text{阻}} \times l_3 = m\ddot{\theta}k \quad (8)$$

其中： l 为力臂； α_0 为偏离中心的角度。

由上可知，鱼体可以绕 z 轴转动，即转弯。

4) 上升：尾鳍采取直行运动方案，胸鳍运动方案如下：

① 停止拍动，左右胸鳍摆动到向上的俯仰角或者在下侧周期性摆动。此时，来流阻力或摆动推力在胸鳍上的分力向上。

② 胸鳍向下拍动时摆动到阻力面积最大，向上拍动摆动到阻力面积最小，阻力的合力向上。此时左右胸鳍受到向上的力和转动的力矩，左右力矩抵消。2 种方案都能够提供向上转动的力，进而实现上升。

以方案①为例进行运动分析，设俯仰角为 β ，作用在胸鳍上法向的力为 F_1 。

$$F_{\text{合}} = (F_{\text{尾}} - F_1 \sin \beta)i + (F_1 \cos \beta)k + F_{\text{阻}} = m(\ddot{x}i + \ddot{z}k),$$

$$M_{\text{合}} = (F_1 \cos \beta l_1 + F_1 \cos \beta l_2)j + F_{\text{阻}} \times l_3 = m\ddot{\beta}j \quad (9)$$

于是，鱼体可以沿着 z 轴方向运动，即上升。

5) 下潜：与上升情况基本类似，胸鳍运动相反。

3 仿真与实验

3.1 仿真

为确定上升或下潜时鱼体在流场中的受力情况，便于调整设计参数，使用 ANSYS 进行运动仿真。

首先，对机器鱼 3 维模型进行了简化，使用 curvature 的方法划分了网格，对鱼体和胸鳍连接的地方进行了网格加密，计算模型采用层流模型，边界条件为 0.1 m/s 的速度入口边界。如图 9，在 workbench 中进行流固耦合分析得到了整体的压力分布和应力分布。

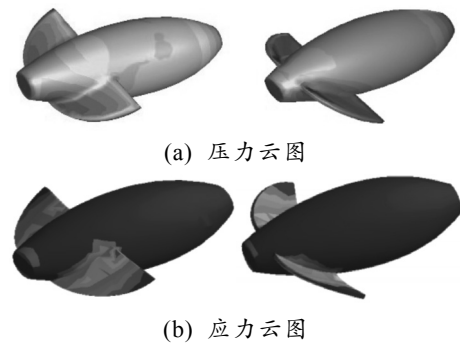


图 9 简化模型流固耦合分析结果

如图 9(a)所示，流场压力主要作用于胸鳍和身体前端，阻力和升力也作用于相应位置。升阻力大小与流场速度和胸鳍之间的角度相关。随着流场速度的增加，升力和阻力逐渐增大。随着胸鳍与水平面角度的增大，阻力逐渐增大，升力先增大后减小。在流速为 0.1 m/s 时，对于图 9(a)右图所示的游动姿态，总阻力约为 0.254 6 N，总升力约为 0.381 1 N。实际阻力应考虑表面不规则的影响，舵机提供的动力应大于实际阻力。通过机器鱼的实际质量计算得到初始上升加速度约为 0.06 m/s^2 。从图 9(b)可以看出：应力主要集中于胸鳍位置，胸鳍需要采用足够坚固的材料，胸鳍身体连接部分也容易出现应力集中，应做加固处理。

3.2 实验

双自由度胸鳍机器鱼样机体积约为 0.006 m^3 ，

配重后的机器鱼整体质量约为 6 kg。为了验证运动方案的可行性，在实验室水池和实地水域分别进行测试。如图 10 所示，采用高速摄影技术，实时捕捉了机器鱼不同游动姿态的图像 ($t=1\text{ s}$ 、 $t=2\text{ s}$ 、 $t=3\text{ s}$)。从图中可见，双自由度胸鳍机器鱼实现了直行、右转、左转与下潜的游动姿态。

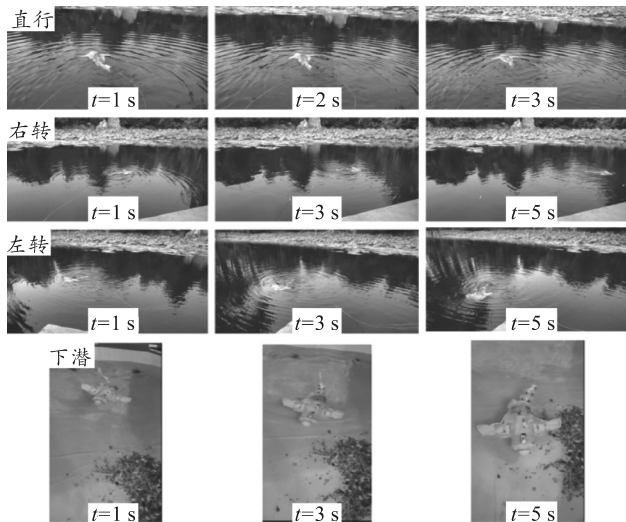


图 10 机器鱼不同游动姿态下的实验测试结果

机器鱼的运动控制算法可以实现游行速度与转弯角度的调节。通过定量分析测试结果发现：文中双自由度胸鳍机器鱼的直行速度随尾鳍舵机转速和胸鳍舵机转速的增加而提高，最大前进速度约为 0.2 m/s，最小转弯半径约为 0.5 m，最大下潜速度约为 0.02 m/s。

4 结论

笔者设计了一种双自由度胸鳍的仿生机器鱼。通过双胸鳍的双自由度运动，实现机器鱼游行时双胸鳍在双自由度方向的相互配合运动，同时，通过多关节弹簧传动的鱼身与尾鳍一体化传动结构，实现了类似于真实鲹科鱼尾部的摆动和鱼体的波动，

可以更加逼真地模拟真实鱼类的运动，实现机器鱼的前进、转弯与下潜。相对于单自由度胸鳍机器鱼，双自由度胸鳍机器鱼的机动性得到较大提升。

参考文献：

[1] TRIANTAFYLLOU M S, TRIANTAFYLLOU G S. An efficient swimming machine[J]. Scientific American, 1995, 272(3): 64-70.

[2] 王田苗, 杨兴帮, 梁建宏. 中央鳍/对鳍推进模式的仿生自主水下机器人发展现状综述[J]. 机器人, 2013, 35(3): 352-362, 384.

[3] 王安忆, 刘贵杰, 王新宝, 等. 身体/尾鳍推进模式仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 137-146.

[4] 刘军考, 陈在礼, 陈维山, 等. 水下机器人新型仿鱼鳍推进器[J]. 机器人, 2000(5): 427-432.

[5] 汪明, 喻俊志, 谭民. 鳍推进型机器鱼的 CPG 控制及实现[J]. 机器人, 2010, 32(2): 248-255.

[6] 李宗刚, 毛著元, 高溥, 等. 一种 2 自由度胸鳍推进机构设计与动力学分析[J]. 机器人, 2016, 38(1): 82-90.

[7] 李宗刚, 马伟俊, 葛立明, 等. 一种 2 自由度胸鳍推进仿生箱鲹机器鱼转弯特性研究[J]. 机器人, 2016, 38(5): 593-602.

[8] 张志刚, 喻俊志, 王硕, 等. 多关节仿鱼运动推进机构的设计与实现[J]. 中国造船, 2005(1): 24-30.

[9] KATZSCHMANN R K, DELPRETO J, MACCUDY R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish[J]. Science Robotics, 2018, 3(16): 3449.

[10] 王彤, 高东奇, 张世武, 等. 多自由度仿生推进系统的 CPG 控制[J]. 实验力学, 2016, 31(4): 440-450.

[11] 刘安全, 李亮, 罗文广, 等. 一种面向机器鱼的高精度位姿控制算法设计与实现[J]. 机器人, 2016, 38(2): 241-247.

[12] 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.

(上接第 63 页)

参考文献：

[1] 胡昌华, 施权, 司小胜, 等. 数据驱动的使用寿命预测和健康管理技术研究进展[J]. 信息与控制, 2017(1): 72-82.

[2] 李震, 史宪铭, 朱敦祥, 等. 装备维修保障任务区分问题综述[J]. 兵工自动化, 2019, 38(7): 7-10.

[3] 王锡吉, 王蓬. 可靠性工作新理念[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2003(2): 1-7.

[4] 王锡吉, 王蓬. 兵器发展中的质量与可靠性[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2004(6): 1-7.

[5] 高宪军, 李德鑫, 李娜, 等. 基于 MFOP 的军机维护方案研究[J]. 航空计算技术, 2008, 38(4): 29-31.

[6] 吴海桥, 刘毅, 何钟武, 等. 航空维修的新概念: 无维修使用期[J]. 航空维修, 2004(1): 19-20.

[7] 杜晋军, 李长海, 刘红娅. 我军高技术装备无维修使用期研究[J]. 装备学院学报, 2012, 23(3): 107-110.

[8] 赵新超, 吕卫民, 杨立峰, 等. 基于故障机理与随机线性模型的电子产品寿命预测[J]. 兵工自动化, 2019, 38(7): 52-59.

[9] 司小胜, 胡昌华. 不确定退化测量数据下的剩余寿命估计[J]. 电子学报, 2015(1): 30-35.