

仿生机器人机构设计与运动控制

报 告 人：谭 民

牵头单位：中国科学院自动化研究所

合作单位：中国科学院沈阳自动化研究所

西北工业大学

哈尔滨工业大学

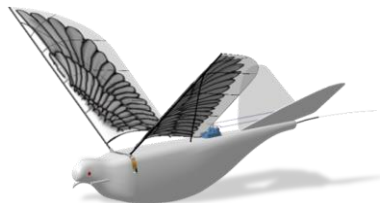
北京科技大学

北京航天自动控制研究所

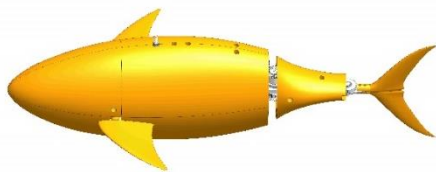
项目总目标

针对生物优异的飞行、游动、跳跃能力，从材料、结构、驱动、传感、建模和控制等方面深入开展研究：

- ◆ 揭示生物高效机动**运动-感知-控制-驱动的耦合作用机理**
- ◆ 构建**软体、大变形体、刚柔耦合**等新型机器人仿生驱动机构设计优化、建模和控制的理论与方法
- ◆ 研制**仿鸟飞行、仿鱼游动、仿蛙跳跃** 3 类仿生机器人实验样机，取得**原创性成果 3 项**，成果可用于其他新型仿生机器人



仿鸟飞行机器人



仿鱼游动机器人



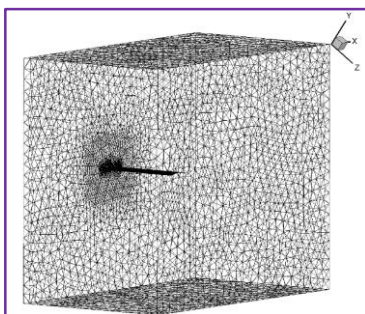
仿蛙跳跃机器人

主要研究进展

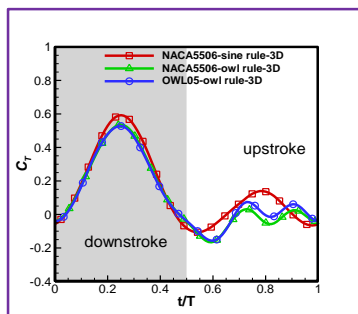
- 仿鸟柔性扑翼飞行机器人关键技术研究
- 仿鱼高速高机动游动机器人关键技术研究
- 仿蛙软体跳跃机器人关键技术研究

仿生飞行机理研究

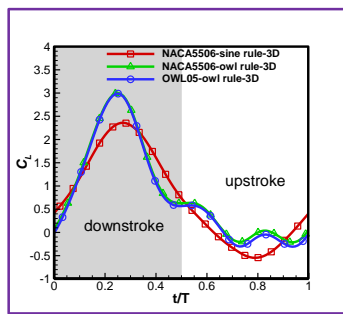
研究了鸟类飞行运动规律对气动特性的影响机理，设计并联双曲柄仿生驱动机构，利用人工肌肉模拟鸟类扑翼肌肉，实现仿鸟飞行



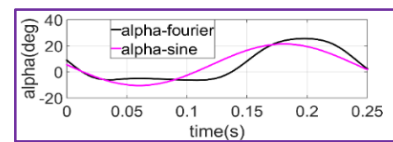
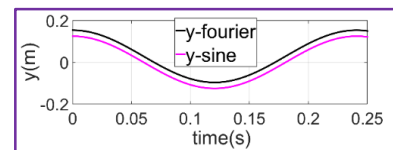
CFD仿真



阻力系数



升力系数



仿鸟飞行规律



仿鸟飞行运动



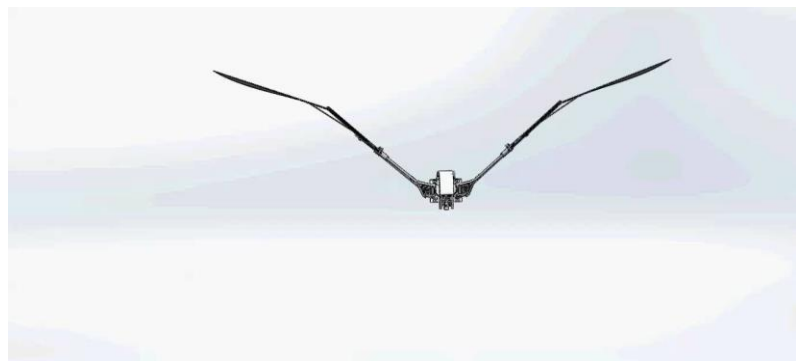
仿鸟飞行测试

高效仿生扑动机构设计

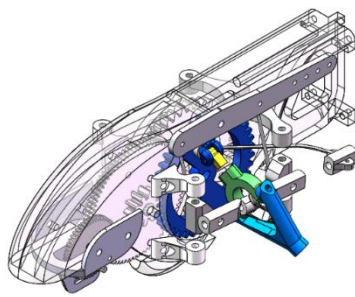
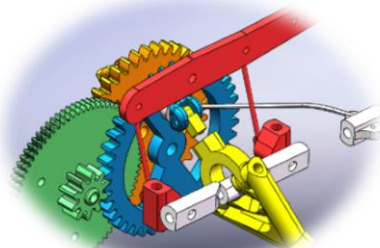
运用曲柄连杆、多连杆和齿轮传动等多种机构组合，设计并研制了运动自由度相位差可控的变幅扑动仿生驱动装置

三维任意组合复合扑动

- 上下扑动
- 前后扫掠扭转
- 变幅扑动/折叠



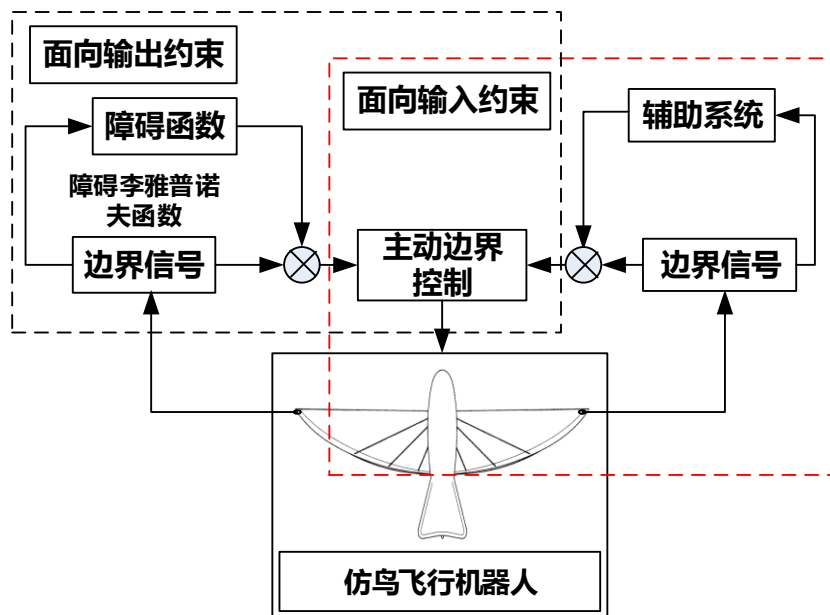
复合扑动



仿生驱动装置

仿鸟柔性扑翼系统控制设计

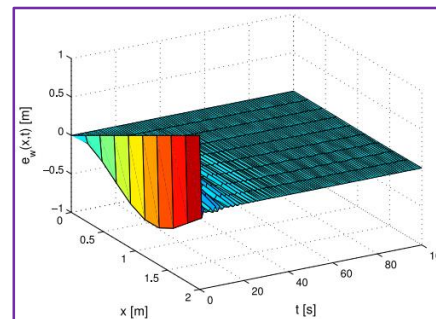
为了抑制柔性扑翼的不良振动，研制了柔性翼振动控制实验平台，高频摄像头采集柔性翼振动形变，设计了基于模型的边界控制器，削弱了柔性翼振荡



柔性翼振动控制设计



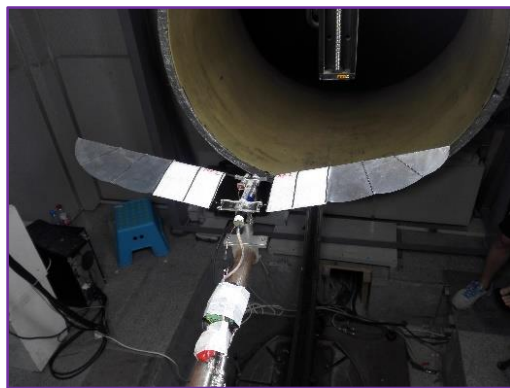
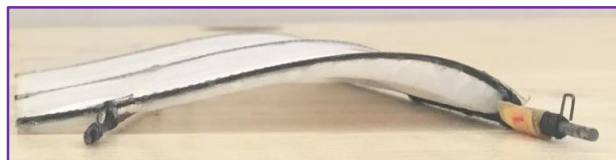
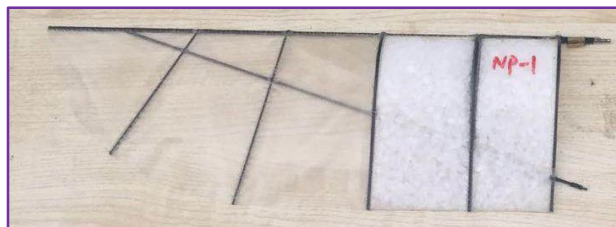
柔性翼振动控制实验平台



施加控制后的弯曲位移跟踪误差信号

风洞实验验证

开展了仿生扑动翼的风洞实验，在推力不降低的条件下，扑动翼平均升力提升了29.6%，升力功耗比提升22.6%

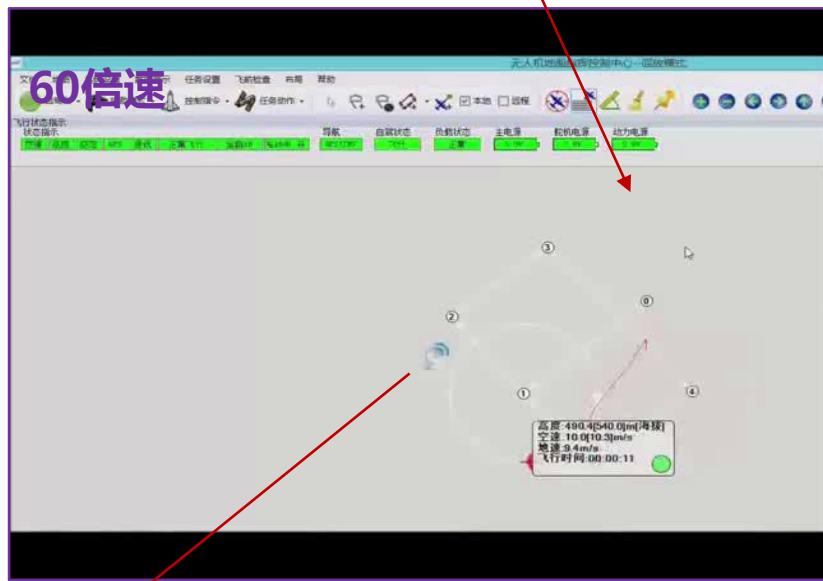


| 风洞实验结果 | 原扑动翼 | 加仿生翼型 | 增加比例 |
|-----------------|--------|--------|-------|
| 平均升力 (N) | 1.046 | 1.486 | 29.6% |
| 平均推力 (N) | 0.039 | 0.054 | 2.7% |
| 平均功耗 (W) | 13.911 | 15.342 | 9.3% |
| 平均升力/功耗 (N/W) | 0.075 | 0.097 | 22.6% |

仿鸟飞行机器人实验验证

仿鸟机器人样机达到中期考核指标。具体为：全机225g；最大飞行速度15.98m/s；续航时间26分钟；任务半径4.2Km

飞行时间：26分钟，飞行瞬时速度：6~15.98m/s



飞行轨迹

实际飞行轨迹



试飞验证

主要研究进展

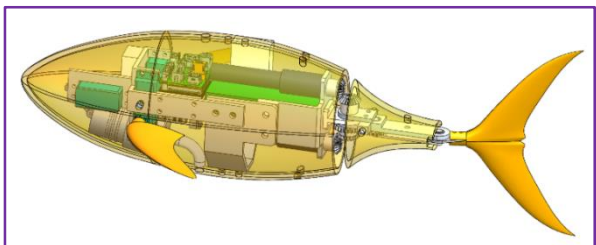
□ 仿鸟柔性扑翼飞行机器人关键技术研究

□ 仿鱼高速高机动游动机器人关键技术研究

□ 仿蛙软体跳跃机器人关键技术研究

仿生机器鱼机构设计

以游动速度和机动性能等为目标函数，优化大展弦新月尾鳍、细窄状尾柄、流线外形，设计并研制一种两关节仿生机器鱼样机

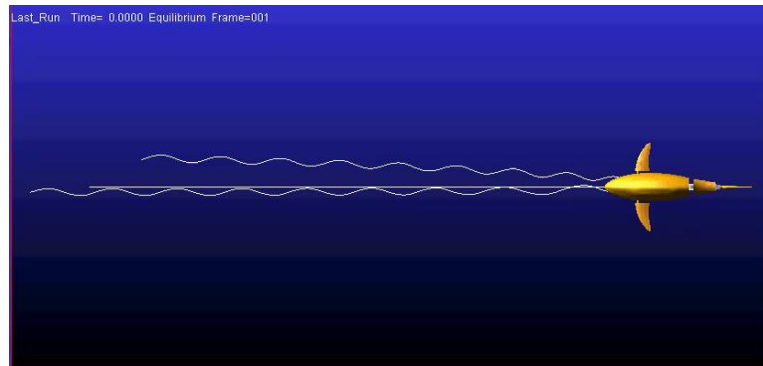
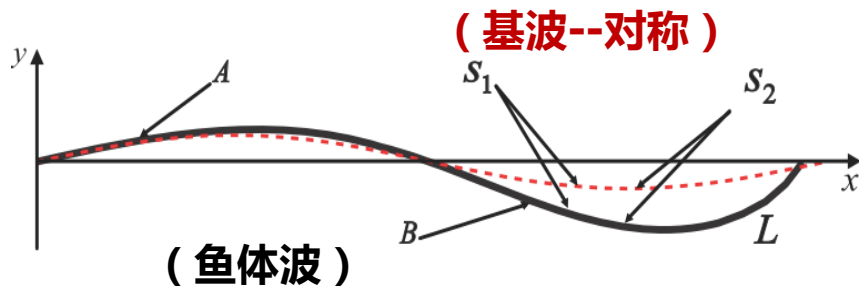


实物样机

| 指标名称 | 参数 |
|------------|-------------------|
| 尺寸 (长×宽×高) | 344mm×100mm×130mm |
| 重量 | 1.75kg |
| 关节自由度 | 2个尾关节 |
| 驱动方式 | 直流电机 |
| 携带传感器 | IMU、深度传感器 |
| 工作时间 | 2小时 |
| 控制模式 | 无线控制或自主游动 |

样机参数

仿生机器鱼水下推进建模



- 鱼的重心保持在前进方向的轴线上
- 鱼的外形设计保证鱼整体上侧力的合力为零

} → 基波

基波方程

$$\begin{cases} \rho_0 = \sup_{s \in [0, L]} \rho(s) \\ r_{base} = \{x(s, t), y(s, t)\} \end{cases}$$

根据鱼的线密度
和形态设计出稳
定的鱼体波



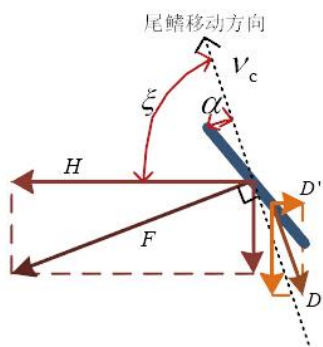
机器鱼的鱼体波方程

$$\begin{cases} r_{body} = \{X(s, t), Y(s, t)\} \\ Y(s, t) = \frac{\rho_0}{\rho(s)} y(s, t) \\ X(s, t) = \int_0^s \sqrt{1 - \left(\frac{\partial Y(u, t)}{\partial u}\right)^2} du \end{cases}$$

仿生机器鱼高速运动控制

攻角控制算法：将尾鳍攻角实时控制在最佳角度，最大化推进力，以实现高速游动。

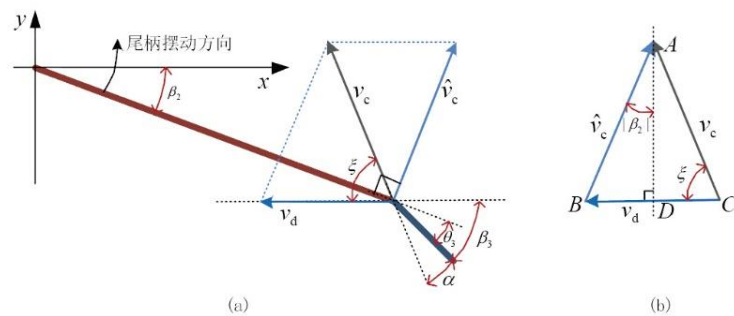
尾鳍攻角控制率



尾鳍受力示意图

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \text{if } \xi < \xi_1 \\ \frac{\alpha_{max}}{2} \{ \sin[\frac{\pi}{\xi_2 - \xi_1} (\xi - \xi_1) - \frac{\pi}{2}] + 1 \}, & \text{if } \xi_1 \leq \xi \leq \xi_2 \\ \alpha_{max}, & \text{if } \xi > \xi_2 \end{cases}$$

尾关节角控制率



尾柄攻角计算示意图

$$|CD| = v_d + \text{sign}(\dot{\beta}_2) \cdot |\hat{v}_c| \sin \beta_2,$$

$$\beta_3 = \text{sign}(\dot{\beta}_2) \cdot (\xi - \alpha),$$

$$\theta_3 = \beta_3 - \beta_2,$$

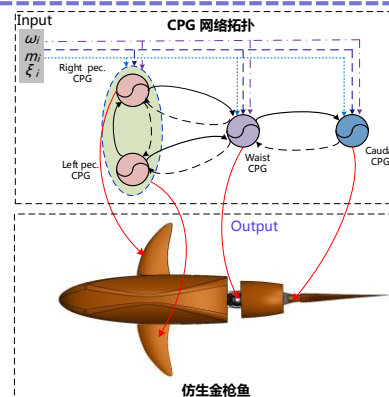
$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x > 0, \\ 0, & \text{if } x = 0, \\ -1, & \text{if } x < 0. \end{cases}$$

仿生机器鱼稳态转向控制

给出了一种基于Hopf振荡器的仿生CPG控制方法，实现了仿生机器鱼的稳态转向运动控制。

- **基于Hopf振荡器的CPG模型**

$$\begin{cases} \dot{x}_i = -w_i(y_i - b_i) + x_i(r_i^2 - x_i^2 - (y_i - b_i)^2) \\ \quad + h_1(x_{i-1} \cos \varphi_i + (y_{i-1} - b_{i-1}) \sin \varphi_i) \\ \dot{y}_i = w_i x_i + (y_i - b_i)(r_i^2 - x_i^2 - (y_i - b_i)^2) \\ \quad + h_2(x_{i+1} \sin \varphi_i + (y_{i+1} - b_{i+1}) \cos \varphi_i) \end{cases}$$

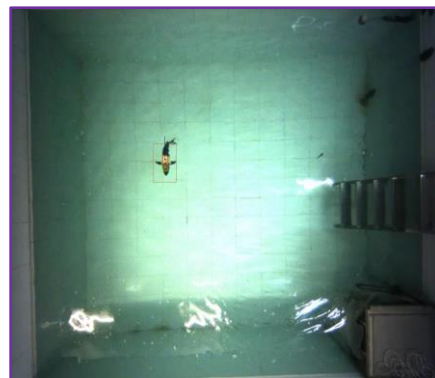


CPG
网络拓扑
结构图

两种
转向
方法



基于中心偏置变化的稳态转向

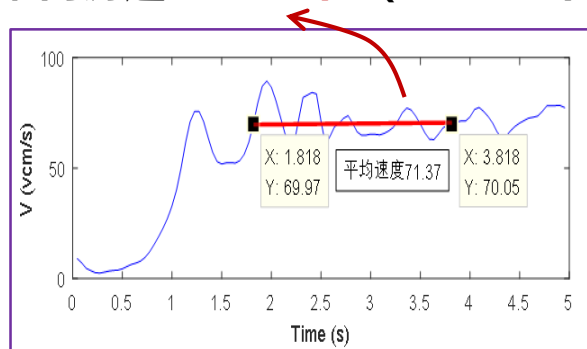


基于拍动频率变化的稳态转向

仿鱼游动机器人实验验证

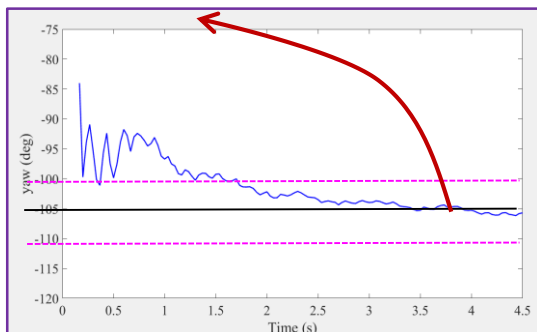
仿鱼游动机器人达到中期考核指标。具体为：长344mm，重量1.75kg；最高速度2.04倍体长/秒；最小转向半径0.596倍体长；续航能力2小时；航向精度 $\leq \pm 6^\circ$

最高游速2.04 BL/s (0.703m/s)



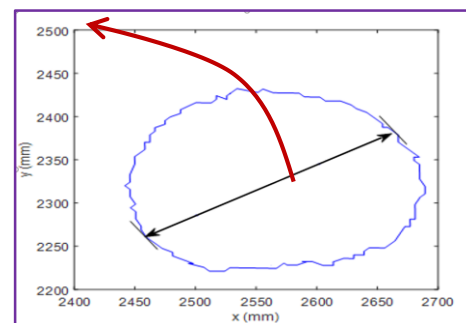
仿生机器鱼推进速度变化曲线

期望航向角105度

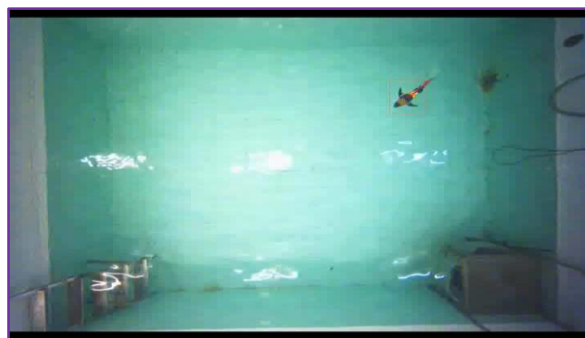


定向控制航向轨迹

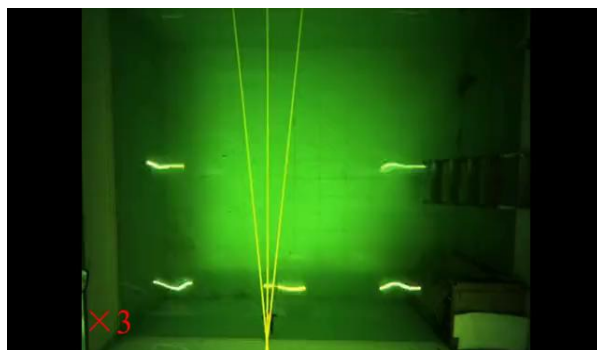
小于转弯半径0.596BL (205mm)



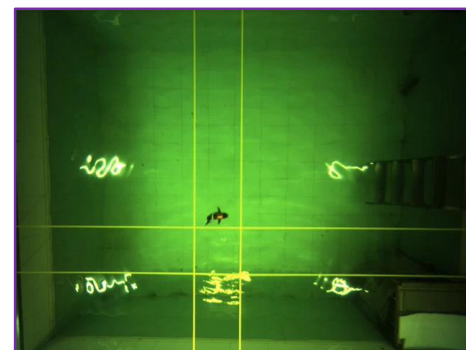
仿生机器鱼游动轨迹



直游测试



航行精度性能测试



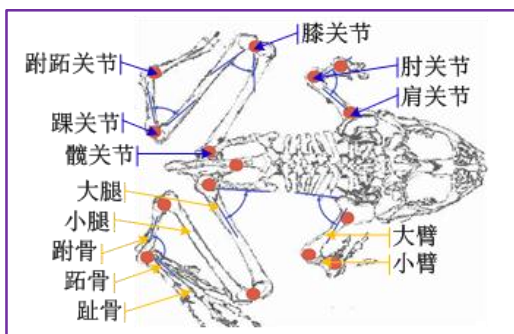
转弯性能测试

主要研究进展

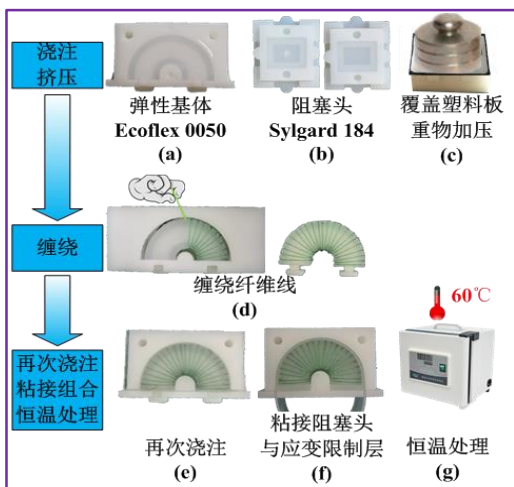
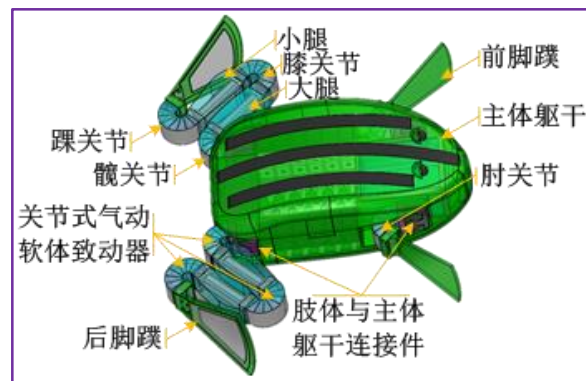
- 仿鸟柔性扑翼飞行机器人关键技术研究
- 仿鱼高速高机动游动机器人关键技术研究
- 仿蛙软体跳跃机器人关键技术研究

新型材料软体制动器

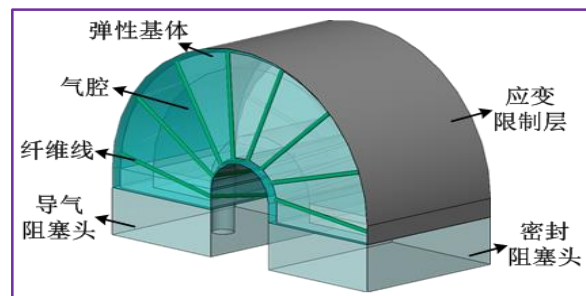
设计了关节式气动软体弯曲制动器，进行制动器的结构参数确定与实体的制备



生物体结构特性

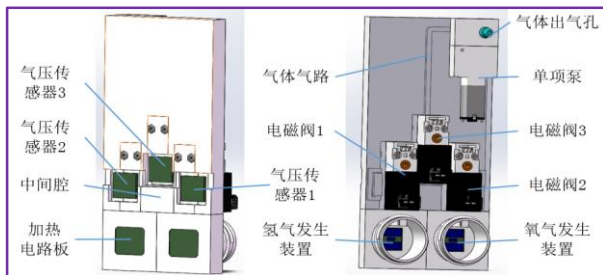


制备



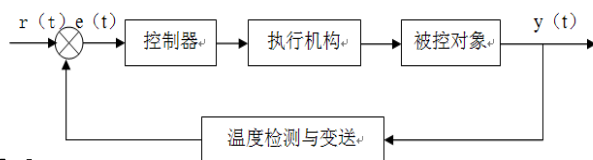
仿生跳跃机理

设计了高能量密度燃爆动力驱动系统，研制混合可燃气体发生装置，利用多路点火系统实现混合气体燃爆，开展了燃爆驱动仿生跳跃机理验证

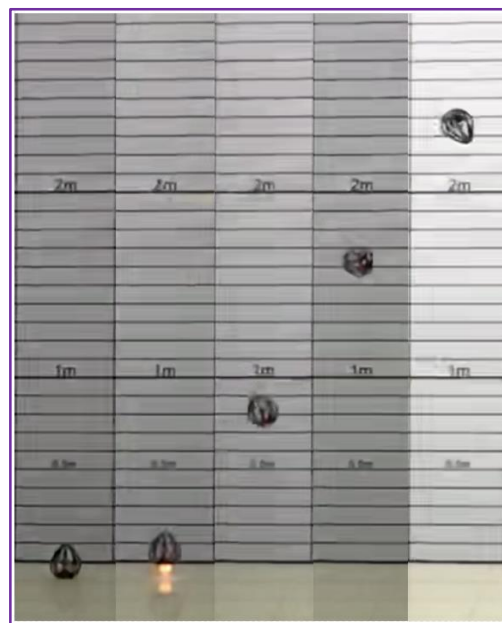
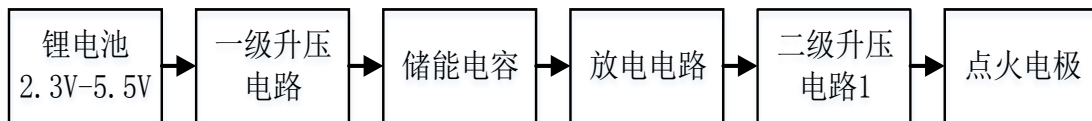


混合可燃气体发生装置

➤ 加热装置控制



➤ 多路点火系统控制

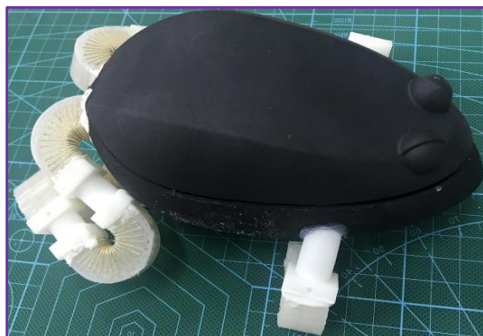


燃爆驱动仿生跳跃机理验证

仿蛙跳跃机器人机构设计

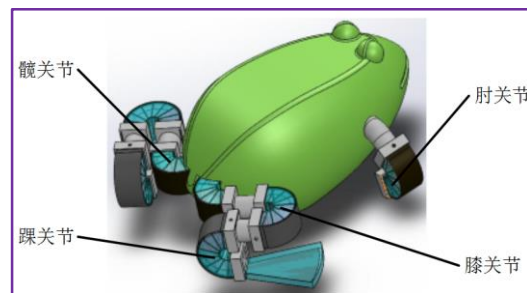
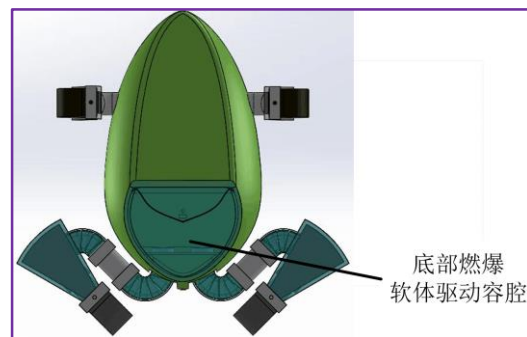
设计并研制仿蛙跳跃机器人样机，采用关节式气动软体弯曲制动器作为髌、膝、踝、肘关节，基于机载高能量密度燃爆动力驱动单元实现跳跃运动

在样机底部设计软体燃爆驱动容腔增加跳跃驱动力，后肢各关节与底部软体容腔形成气体通路实现可燃气体的导通，通过腔体燃爆实现肢体关节伸展。



实物样机

| | |
|---------|--------------|
| 样机主躯干尺寸 | 150*62*84mm |
| 总重量 | 416.7g |
| 肢体尺寸 | 54mm—60mm |
| 软体关节尺寸 | R15.5*10*8mm |



软体燃爆驱动仿蛙跳跃原理样机结构模型

仿蛙跳跃机器人系统模型

建立仿蛙机器人运动学与动力学模型，研究了青蛙跳跃运动过程中的力学规律，实现仿青蛙跳跃机器人跳跃控制。

动力学建模

后肢杆的动能势能：

$${}^t E_k(t) = \frac{1}{2} \int_0^{l_t} [\rho \dot{\omega}_t^2(x, t) + I_\rho \dot{\phi}_t^2(x, t)] dx + \frac{1}{2} m_h \dot{\omega}_t^2(l_t, t) + \frac{1}{2} J \dot{\phi}_t^2(l_t, t)$$

$${}^t E_p(t) = \frac{1}{2} \int_0^{l_t} K[\phi_t(x, t) - \omega_t'(x, t)]^2 + EI \phi_t''^2(x, t) dx$$

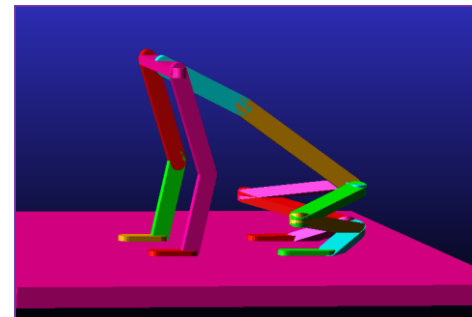
控制力和控制力矩的虚功：

$$\delta {}^t W_f(t) = u_h(t) \delta \omega_t(l_t, t) + \tau_h(t) \delta \phi_t(l_t, t)$$

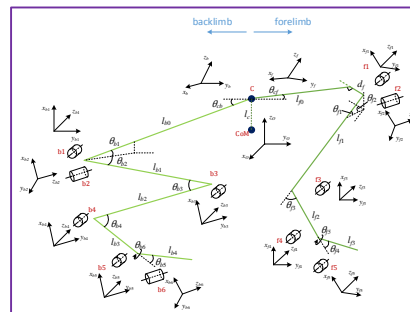
控制方程：

$$\rho \dot{\omega}_t(x, t) + K[\phi_t'(x, t) - \omega_t''(x, t)] = 0$$

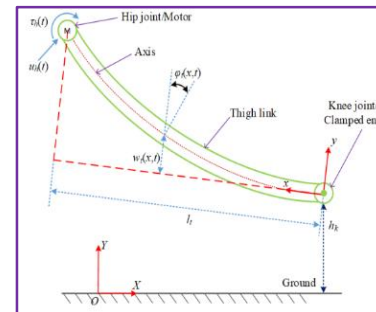
$$I_\rho \ddot{\phi}_t(x, t) - EI \phi_t''(x, t) + K[\phi_t(x, t) - \omega_t'(x, t)] = 0$$



ADAMS 仿真模型



单侧连杆示意图



后肢大腿弹性连杆

仿蛙跳跃机器人实验验证

仿蛙跳跃机器人样机达到中期考核指标。具体为：重量416.7g；单次跳跃高度0.4米；单次跳跃距离0.75米；连续跳跃次数不少于2次

样机重量：416.7g

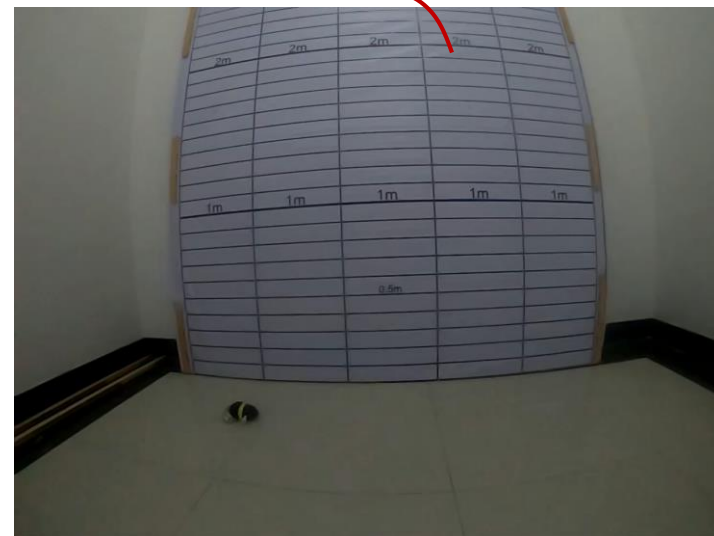


单次最大跳跃高度 ≥ 0.4 米
单次最大跳跃距离 ≥ 0.75 米



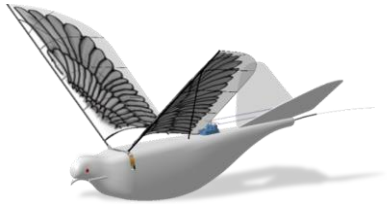
跳跃性能实验

连续跳跃两次，每次跳跃高度0.4m,跳跃距离0.75m

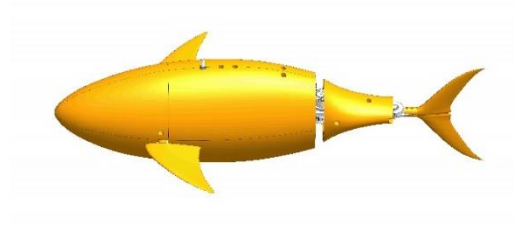


连续两次跳跃实验

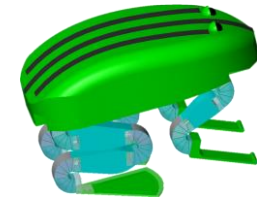
空中 - 水中 - 陆地



仿鸟飞行机器人



仿鱼游动机器人



仿蛙跳跃机器人

敬请批评指正！