

“挑战杯” 全国大学生课外学术科技作品竞赛

作品名称：两栖蛙板机器人

作品类别：机械与控制

摘要

目前的机器人运动形式多种多样，包括轮式、履带式、步行式、蠕动式等。水陆两栖机器人是机器人研究领域的一个重要内容，但是目前的两栖机器人往往需要通过更换执行机构，或者改变运动形式才能实现水陆环境的切换。本文提出的新型两栖蛙板机器人，基于双摆臂机构，配合反偏向轮、柔性尾鳍、舵轮、胸鳍等，实现了机器人水陆两栖运动形式的统一，行为表现力突出。

本文首先介绍了两栖蛙板机器人所具有的各个功能，其最主要的功能是通过两个腿臂的开合实现机器人的两栖运动，除了两栖的运动能力之外，该机器人还有遥控、上位机监控等功能。机械结构是整个机器人设计的基础工作，在本文中详细介绍的机器人内部骨架结构和外部防水外壳的设计。在机械结构的基础上，介绍了控制机械结构的硬件电路的设计及相关器件的选型。在此之后详细阐述了整个机器人中软件设计，以实现蛙板机器人的良好控制。最后测试了机器人的相关性能，验证了整个机器人的科学性和可行性。

两栖蛙板机器人的主要创新点有：

- 1、基于双摆臂驱动结构，实现了机器人水陆两栖运动方式的统一；
- 2、机器人能够根据空间的大小控制腿臂摆动幅度，机器人宽度可调，适合于复杂环境运行；
- 3、机器人通过控制腿臂、舵轮、胸鳍、尾鳍等执行机构，实现其水中三维空间游动和陆地行驶运动。

由于蛙板机器人所具有的运动特性与优点，本成果可代替潜水员完成船厂水下环境监测，作为“蛙人”部队的智能助手完成军事任务，以及作为教学实验平台供高校教学科研使用，具有重要的研究意义与广阔的应用前景。

关键词：两栖；机器人；反偏向轮；仿生

Abstract

Nowadays, amphibious and bionic robots take an important role in robot's research. There are a lot kinds of amphibious and bionic robots in the world, such as wheeled, legged, wheel-leg robot. Different robots are applied to different situations. This paper researches on frog robot based on a new form of movement, which uses a kind of wheel to make this form of movement amphibious. This robot can move in the water and on the ground with the same form of movement.

This paper introduces the function of frog robot, the most important of which is that this robot can move not only on the ground but also in the water by the swing of its legs. We can use a controller to control the movement of the frog robot and monitor the robot via a host computer. The design of mechanical structure is the basis of this robot. This paper introduces the design of framework and shell to make the robot work well and watertight. On the basis of mechanical structure design, this paper discusses the circuit and code of the robot. First, the circuit includes drive circuit, energy circuit, detecting circuit, control circuit and so on. Then, the drive code, detecting of controller signal, robot's posture detecting, control rules and host computer software make up the software of this robot. Finally, this paper presents the result of tests for the robot.

There are some new points about this robot .

1.This robot uses a new form of movement to come to a unified amphibious movement pattern.

2.This form of movement pattern is adapted to complex environment, by adjusting the amplitude of the swing of legs.

3.This frog robot can change its implementing agencies to achieve its three-dimensional movement in water.

These characteristics makes the robot can be used for underwater environmental monitoring at shipyard, used as intelligent assistant to "Frogmen" complete military tasks and as a teaching experiment platform for university teaching and research use.

Key word: amphibious, robot, the wheel of anti-bias, bionic

目录

第一章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 设计来源	2
1.3 本文的安排	3
第二章 两栖蛙板机器人系统设计方案	4
2.1 两栖蛙板机器人整体框图	4
2.2 两栖蛙板机器人系统功能	5
2.2.1 陆地游龙板运动形式	5
2.2.2 水中蛙式游动	5
2.2.3 陆地方向控制功能	6
2.2.4 水中姿态控制功能	6
2.2.5 实时图像传输功能	6
2.2.6 上位机监控功能	7
第三章 两栖蛙板机器人机械结构设计方案	8
3.1 两栖蛙板机器人在陆地上的驱动方式	8
3.1.1 机器人模型陆上运动驱动问题	8
3.1.2 机器人模型陆上的方向控制问题	10
3.1.3 机器人模型陆上的平衡问题	10
3.1.4 机器人驱动原理力学分析	11
3.2 两栖蛙板机器人在水中的驱动方式	14
3.2.1 机器人模型水中运动驱动问题	14
3.2.2 机器人模型水中的方向控制问题	15
3.2.3 机器人模型水中的平衡问题	17
3.2.4 舵与鳍的面积计算	18
3.3 两栖蛙板机器人的模具设计	21
3.3.1 头部设计	21
3.3.2 腿部设计	23

3.3.3 密封设计	23
第四章 两栖蛙板机器人硬件电路设计方案	25
4.1 硬件电路整体设计	25
4.2 运动驱动模块设计	26
4.2.1 执行机构选型	26
4.2.2 驱动电路设计	29
4.3 平台检测及控制模块设计	30
4.3.1 控制器选型	30
4.3.2 光电编码器选型	31
4.3.3 陀螺仪选型	32
4.4 电源模块设计	33
4.4.1 电压转换模块	34
4.4.2 稳压模块	35
4.5 无线通信模块设计	35
4.5.1 图像传输设备选型	35
4.5.2 遥控器及信号接收机选型	36
4.5.3 无线数据传输模块选型	37
4.6 PCB 电路制作	38
第五章 两栖蛙板机器人软件设计方案	40
5.1 遥控器信号处理程序	40
5.2 机器人姿态检测	42
5.2.1 陀螺加速度计数据读取	42
5.2.2 陀螺加速度数据融合	42
5.3 执行机构接口程序设计	43
5.3.1 舵机控制	43
5.3.2 电机控制	45
5.4 控制系统设计	46
5.4.1 陆上运动控制	46
5.4.2 水中运动控制原理	48

5.5 主程序流程图	49
5.6 上位机模块设计	49
5.6.1 实时图像传输	51
5.6.2 下位机姿态 3D 显示	51
5.6.3 下位机参数显示	52
第六章 仿真与测试	54
6.1 陆地运动实验	54
6.1.1 舵机控制实验	54
6.1.2 电机控制实验	55
6.1.3 整体运动实验	55
6.2 水下仿真实验	56
6.2.1 水下浮力仿真	56
6.2.2 水下阻力仿真	57
6.3 水下运动实验	58
6.4 主要技术指标	58
第七章 总结和展望	60
7.1 创新点	60
7.2 技术要点	60
7.3 作品的科学性及先进性	61
7.4 推广前景	61
参考文献	64
附件清单	65

第一章 引言

本章主要介绍了两栖蛙板机器人的研究背景、设计来源和整篇文章的安排。先介绍了 RHex 这种两栖机器人以及对两栖蛙板机器人的设计很有借鉴意义的机器鱼；之后介绍了机器人的灵感来源——游龙板的运动形式；最后对文章的安排做出了详细的介绍。

1.1 研究背景

机器人是集控制理论、机械电子、计算机、材料仿生学等诸多学科于一体的产物，是反应当今世界科技水平的一种科学成果，机器人在生活、工业、农业以及军事中都有着重要的作用。目前世界上对各种机器人的研究也十分普遍，其中两栖仿生机器人的研究也是机器人研究中的一个重要内容。

RHex 是由多所大学共同研制的六足机器人，它水下的版本叫做 AQUA。该机器人可以在多种环境下作业，对多种地形有着很强的适应能力，可以根据地形的不同自动转换行走步态，在陆地上水下都可以实现良好的工作，同时该机器人拥有非常强的机器视觉，具有极强的两栖生存和运动能力。



图 1.1 RHex 六足机器人

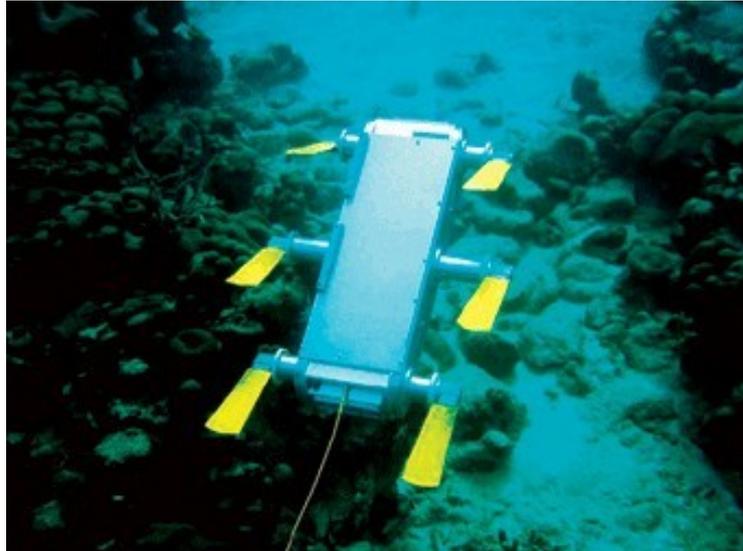


图 1.2 RHex 的水下版本 AQUA

除了两栖机器人，水下机器人的研究也是机器人的重点，各国的实验室都十分关注机器鱼的研究。研究的内容主要包括机器鱼的结构设计、建模、以及控制方法。



图 1.3 机器鱼

1.2 设计来源

本文所介绍的蛙板机器人是一种具有新型运动形式的两栖机器人。其采用的运动形式敏捷灵活，在水中、陆地均有驱动能力，同时可以在水下控制其本身的姿态，具有非常重要的研究意义和很高的实用价值。

本机器人模型设计的灵感来自于游龙板，也称活力三轮车，该运动是一项新

兴的体育运动，它巧妙利用了力学原理，运动者站立于三轮车上，通过两腿的开合运动，使三轮车的两腿臂作横向摆动，进而产生前进的推动力，如图 1-4 所示。这是两栖蛙板机器人的雏形来源。



图 1.4 游龙板运动形式示意图

1.3 本文的安排

本文第一章介绍机器人设计的背景和灵感来源。

第二章介绍机器人的整体系统设计方案，包括整体系统的组成，并对各个系统功能有详细的描述，如陆地上和水中的运动形式、机器人的控制功能以及上位机等功能。

第三章介绍机器人的机械结构设计，分别从水陆的角度阐述了机器人的驱动方式，解释了各个细节的具体机械设计；之后又对机器人的模具及密封的进行了介绍。

第四章介绍了机器人功能实现中硬件电路的设计。包括硬件电路的整体设计、执行结构的选择、驱动电路的搭建、电源以及无线传输模块的设计等方面。

第五章介绍了机器人系统的软件设计，在硬件电路的基础上，介绍了整体的软件流程图以及基本的子模块的流程。

第六章对文章进行了总结，对整个项目进行了展望。阐述了两栖蛙板机器人的创新点和技术要点，对它的科学性和先进性进行了论证。

第二章 两栖蛙板机器人系统设计方案

本章总体介绍了两栖蛙板机器人的系统设计方案。首先从模块出发，介绍了两栖机器人的各个组成部分，整个系统是基于这些模块制作出来的。之后便对系统所具有的各个功能做出了详尽的阐述，介绍了机器人的两栖运动能力，以及上位机通信等功能。

2.1 两栖蛙板机器人整体框图

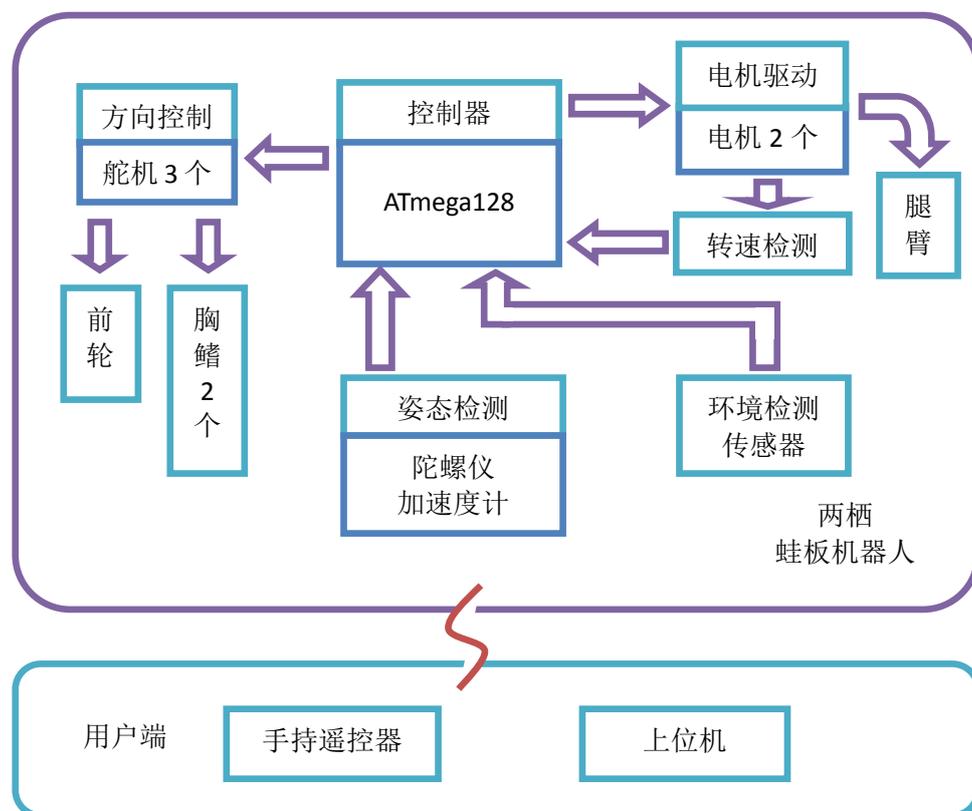


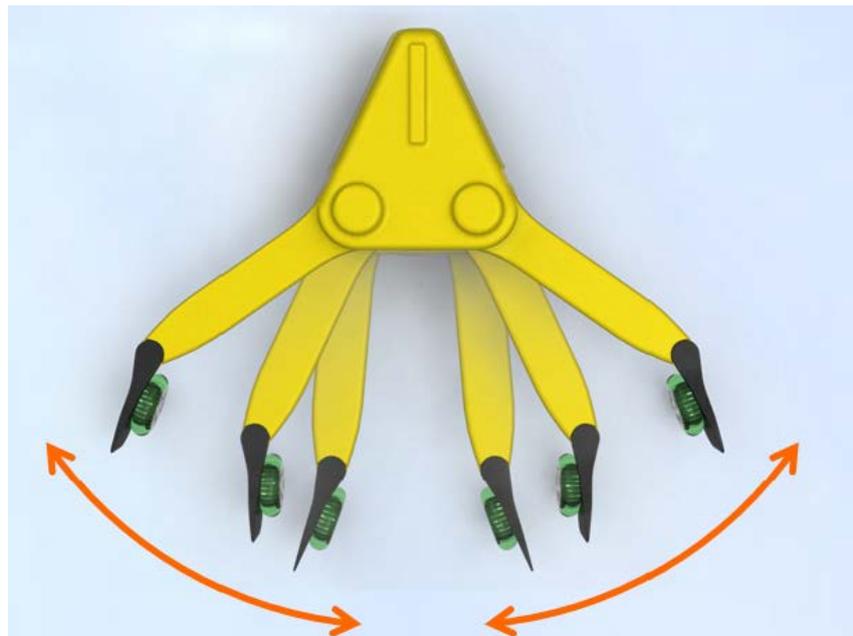
图2.1 两栖蛙板机器人系统设计框图

系统模块如图 2.1 所示，在机器人上搭载有控制器、电机驱动、方向控制、转速检测、姿态检测等基本模块，这些模块相互通信，实现机器人整体的自我控制。在用户端设有手持遥控器和上位机模块，手持遥控器可以对机器人进行控制，上位机则可以对机器人的状态进行实时监控。这些模块的具体设计将在下文具体介绍。

2.2 两栖蛙板机器人系统功能

2.2.1 陆地游龙板运动形式

该两栖蛙板机器人的陆上运动是利用两个电机分别驱动一条腿臂，腿臂摆动进而带动末端反偏向轮运动。通过反偏向轮的设计实现陆地上游龙板的运动。图 2.2（a）为两栖机器人陆地行走时腿臂伸缩过程中处于不同位置的摆动示意图，图 2.2（b）是两栖机器人陆地上的行走路径。



（a）陆地运动形式



（b）蛙板机器人运动路径

图2.2 两栖蛙板机器人陆地运动示意图

2.2.2 水中蛙式游动

该两栖蛙板机器人腿部的末端安装有尾鳍，尾鳍利用柔性材料制成，当蛙板机器人的腿部进行往复摆动时，尾鳍就会随之产生形变，好像鱼的尾鳍或是潜水

运动员的脚蹼，产生向前的推进力，推动机器人在水中前进。这种腿部摆动的运动方式和陆地上的运动方式相同，因此这种运动实现了水上、陆上两种运动形式的统一。

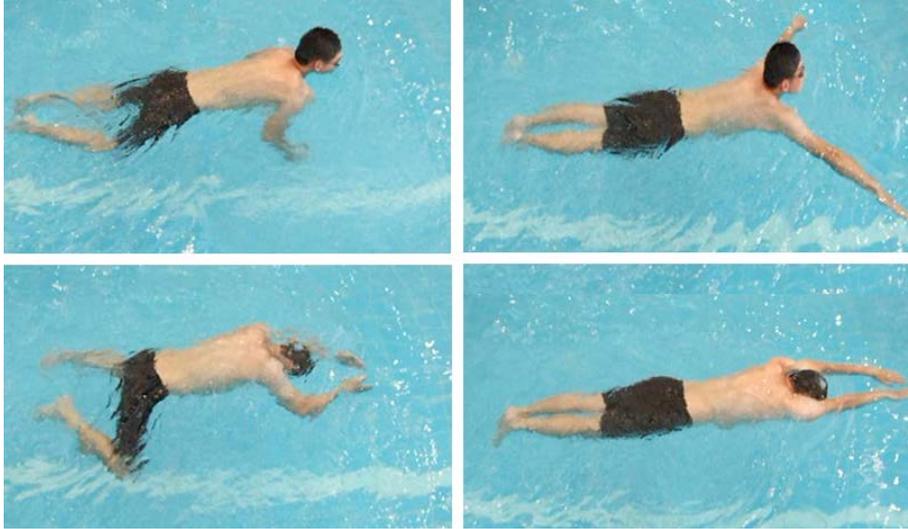


图 2.3 人体水中蛙式游泳动作全过程

2.2.3 陆地方向控制功能

在陆地上运动时，蛙板机器人需要控制其前进的方向，此时机器人可以看作是在一个二维平面内进行运动。机器人的前轮与一个舵机相连，可以通过舵机进行方向的控制。从而控制机器人在陆地上的方向。

2.2.4 水中姿态控制功能

在水中运动时，蛙板机器人是在一个三维平面内进行运动，此时不仅需要控制机器人的偏航运动，还要控制机器人的俯仰及滚转运动。在机器人上设计有前舵、胸鳍来完成以上的水中姿态控制功能，具体的设计将在后文描述。

2.2.5 实时图像传输功能

蛙板机器人在运动过程中，为了可以方便用户更好地查看实时的环境信息，蛙板机器人上装有微小摄像头，可以传输实时的环境信息。

无线摄像头的发射端安装在机器人内部，无线摄像头接收端与 PC 机相连，采用 C# 编程后解析出视频信息，集成于上位机软件界面。发射端放置于蛙板机器人的头部，实时将水下环境的信息传输至上位机进行观察。

2.2.6 上位机监控功能

上位机采用 WPF 进行开发，让用户可以从图像和数据两个方面了解机器人实时的运动状态，通过采集蛙板机器人上各传感器的数据，实现对蛙板机器人三维姿态的监控。

上位机主要通过分析接收到的“航向角”、“翻滚角”与“俯仰角”三组数据，不断更新下位机的信息，进而驱动“3D 显示区”蛙板机器人三维姿态的实时显示。

第三章 两栖蛙板机器人机械结构设计方案

本章首先介绍模型设计的灵感来源和反偏向轮的驱动原理，这是机器人在陆地上的动力来源，也是其运动形式的主要特点。在水中的运动则是在地面运动功能的基础上进行改进和扩展而得以实现。本文将从力学角度进行理论推导，并结合实际运行时的图片详尽细致地分析这种运动的主要特点，探讨这种运动形式的发展潜力。

3.1 两栖蛙板机器人在陆地上的驱动方式

本文首先对所研究的蛙板机器人模型的机械结构设计进行说明。在设计过程中，以能实现陆地运动为先导，首先定出机械结构初稿，而后再结合水中运动方式对结构的需求进行改进。但是无论在陆地上还是在水中运动，都需要考虑3个问题：①机器人模型运动驱动问题；②机器人模型方向控制问题；③机器人模型平衡问题。

3.1.1 机器人模型陆上运动驱动问题

根据游龙板原理可知，机器人的运动驱动问题主要研究怎样通过电机驱动实现机器人腿臂开合动作，进而驱动机器人前进。对此，文本选择齿轮传动方案。电机带动齿轮，通过齿轮间的啮合传动，实现腿臂开合运动。用齿轮传动有两种布置方案，一是用圆柱齿轮，方案诸如图3.1所示；二是用圆锥齿轮，方案如图3.2所示。而后，经过建模发现，用圆柱齿轮传动时要让电机直立在机器人底板后端，使得后部高度远远高于前端，不利于制造模具。因此选择用锥齿轮传动，轴线垂直布置，将电机与底板平行放置，充分利用底层空间。因此最终选定方案图3.2。这里值得注意的是，腿臂的开合必须是对称动作，因此两组啮合齿轮的旋转方向总是相反的。

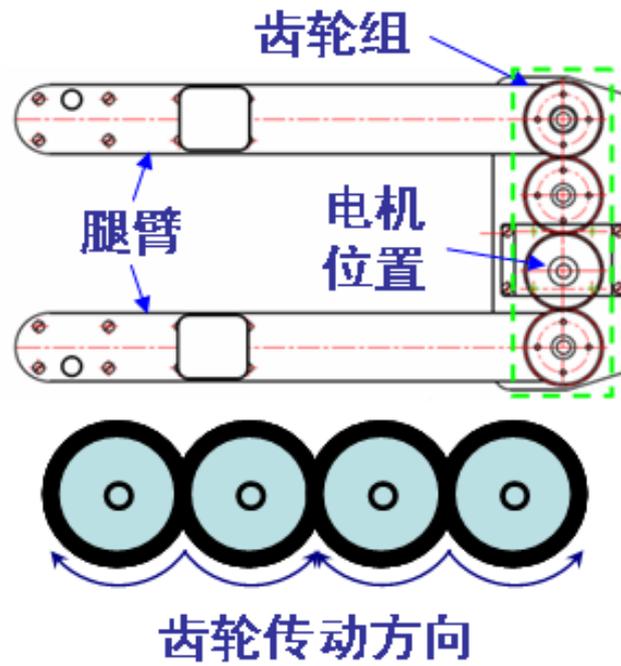


图3.1 圆柱齿轮传动方案

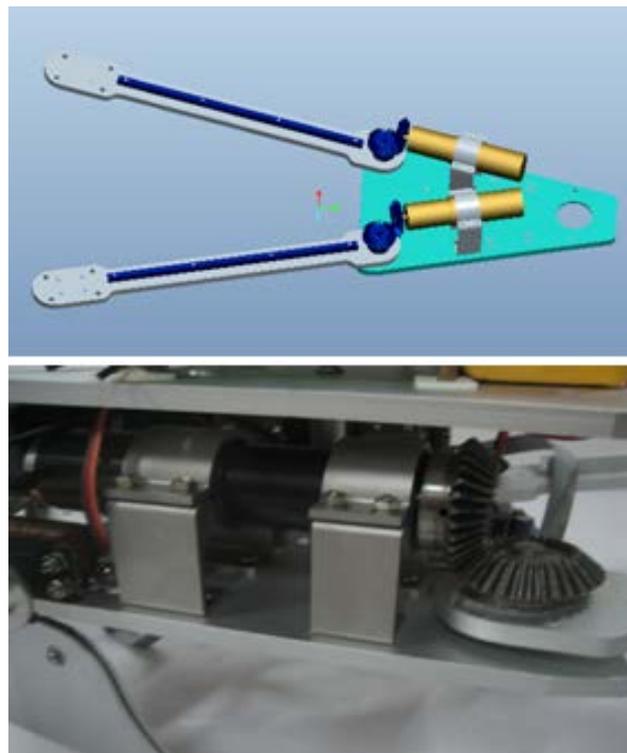


图3.2 圆锥齿轮传动方案

此外，要解决蛙板机器人模型驱动问题的关键在于设计轮子，因为它才是蛙板在陆地上运动的动力源泉。本文利用反偏向轮作为腿臂的驱动轮（如图3.3所示）。反偏向轮包括轮架、轮子、倾斜转轴；其轮架能够绕倾斜转轴自由转动；

之所以称作反偏向轮，是因为倾斜转轴对轮子与腿臂之间出现的方向夹角有抑制作用，即会阻碍方向夹角的产生。

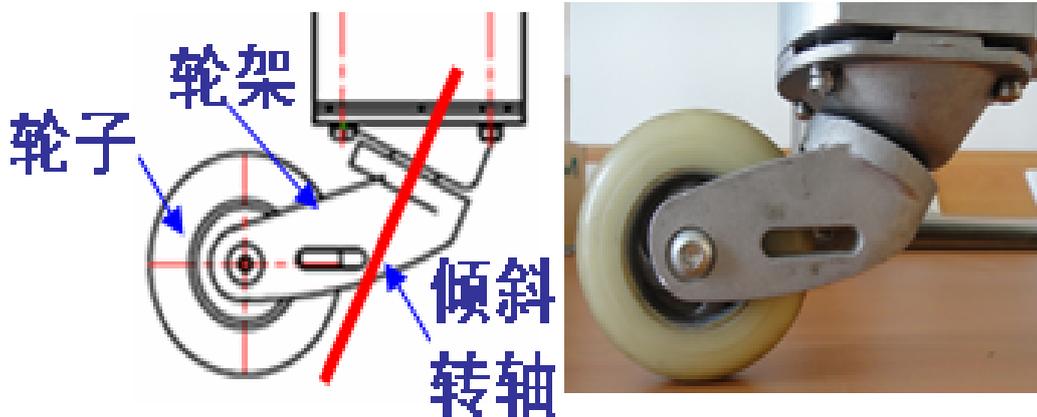


图3.3 机器人反偏向轮

3.1.2 机器人模型陆上的方向控制问题

本文通过设计的方向舵轮实现机器人模型的转向运动。方向舵轮安装于机器人前端，由电机经齿轮传动进而带动方向轮转动，如图3.4所示。

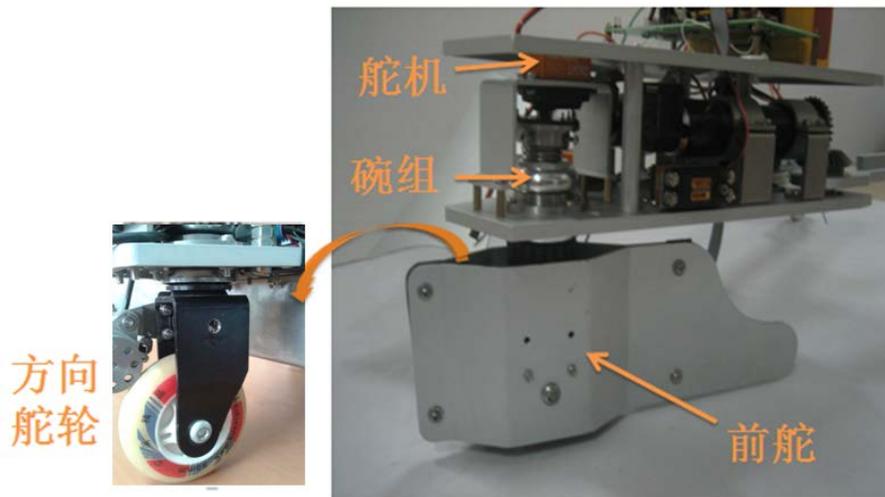


图3.4 机器人方向舵轮设计

3.1.3 机器人模型陆上的平衡问题

由几何学可知，3个不共线的点能够确定一个平面，而本文研究的蛙板机器人模型就是由三个轮子组成，所以，3个不共线的点的基本条件具备了；但要想使机器人保持平衡稳定，光有一个面还不够，还要保证机器人重心的地面投影能够落在由这3个点构成的三角形内。容易看出，重心越靠近三角形中心点机器人

的运动越稳定，越不易倾覆。由于本结构设计完全对称，所以重心落在中垂面上，肯定满足要求。同时，对两腿臂开合角度也要有约束， $0^\circ < \theta < 70^\circ$ 。

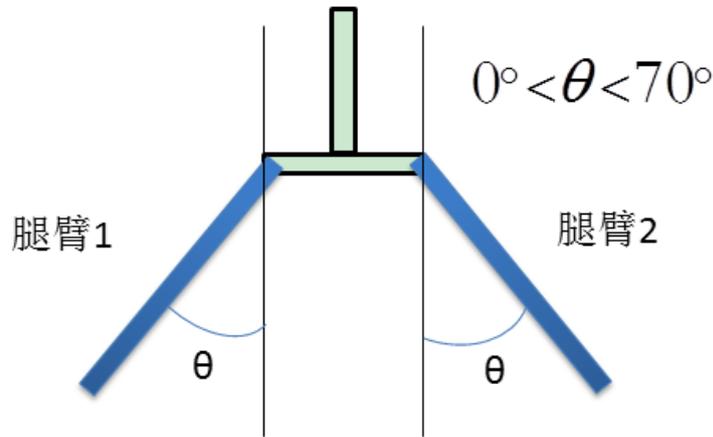


图3.5 机器人腿臂开合角度范围

通过对以上3个问题的研究，本文所设计的两栖蛙板机器人实现陆地运动的整体结构如图3.6所示。

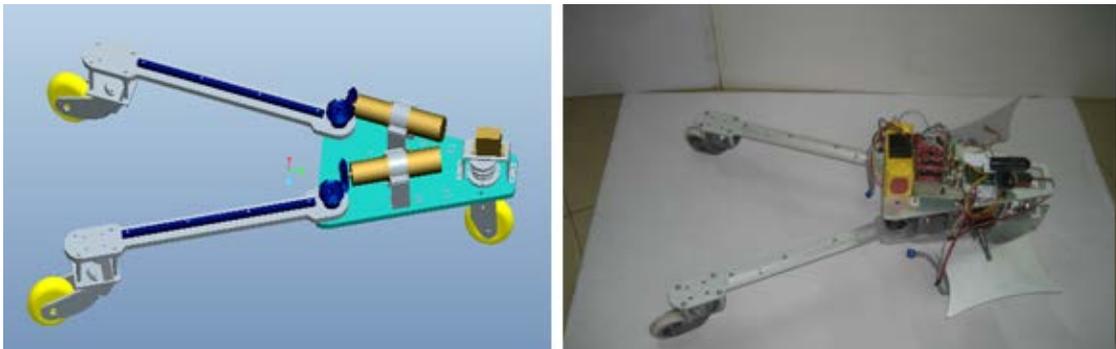


图3.6 蛙板机器人整体结构设计

3.1.4 机器人驱动原理力学分析

通过上一节的介绍可以知道，蛙板机器人模型运动由腿臂的摆动引起，但普通结构的轮子装在腿臂上是不能引起蛙板的运动的，而必须是本文所设计的反偏向轮才可以做到。本文将从反偏向轮的独特力学结构详细阐述其产生前进动力的原理。

由图3.7可知，反偏向轮在机器人腿臂摆动的过程中会产生侧偏，而这一侧偏正是反偏向轮为机器人提供动力的原因。

从图3.8可以进行详细的分析，将轮子形态结构与普通轮子进行对比并结合真实游龙板的轮子结构可以看出，轮子的特殊结构体现在：

第一、转轴AB是倾斜的；

第二、AB与地面的交点和D点（轮子和地面的交点）是不重合的，而是落在了D点的前面（机器人头部方向）。

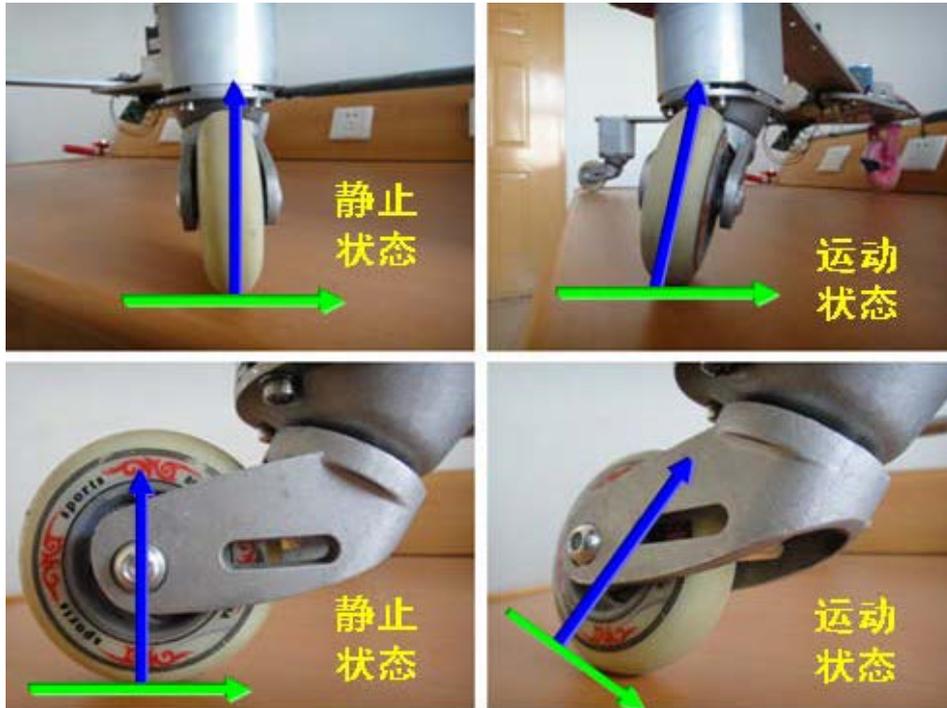


图3.7 反偏向轮静止与运动时的不同姿态（纵向箭头表示受力方向）

如图3.8所示，根据文献[5]和[6]的方法，当车架的重量压在轮上时，地面对反偏向轮D点的支持力设为 N 。当两腿臂随着电机的转动而向两侧来回摆动时，轮子和轮架就会绕倾斜转轴AB摆动。CD平行于AB，DH平行于BE，BE为腿臂方向，AS垂直于地面， $\angle BAS$ 为 β 。只要轮子绕转轴转过一个角度 α ，车轮和地面之间就会产生静摩擦力 F 。 N' 为支持力 N 在CDN平面内垂直于CD的分力； F' 为静摩擦力 F 在CDF平面内垂直于CD的分力；通过求 N' 与 F' 对倾斜转轴AB的力矩，并使力矩相等，就可得出反偏向轮的静摩擦力 F 。

$$F = \frac{N \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sqrt{\frac{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}{1 + \cos^2 \alpha \tan^2 \beta}}} \quad (3-1)$$

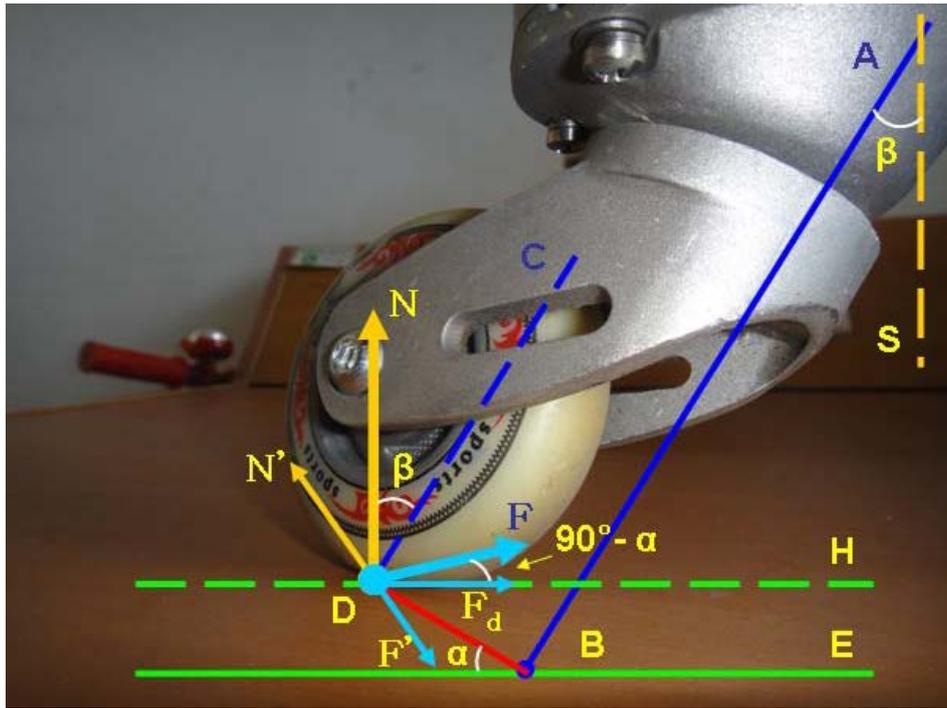


图3.8 反偏向轮受力分析

进而，通过力学分析得到 F 在水平方向沿腿臂的分力为：

$$F_d = F \cdot \sin \alpha = \frac{N \cdot \sin^2 \alpha \cdot \sin \beta}{\sqrt{\frac{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}{1 + \cos^2 \alpha \tan^2 \beta}}} \quad (3-2)$$

综上所述，使蛙板机器人模型前进的推动力来源于轮子与地面间的静摩擦力 F 。在机器人运动时，电机对腿臂施力，使腿臂摆动，其目的就是为了保持 α 一直存在，说明 α 必须依靠外力才能保持，因此，机器人运动的持续需要电机不断地做功才能保持前进的动力。

对于本机器人系统，由于与地面有三个支点、两个腿臂，所以在静止的时候不存在平衡问题，运动过程中也具有较好的稳定性。通过以上的分析，机器人通过腿臂的获得推力，示意图如图3.9所示。

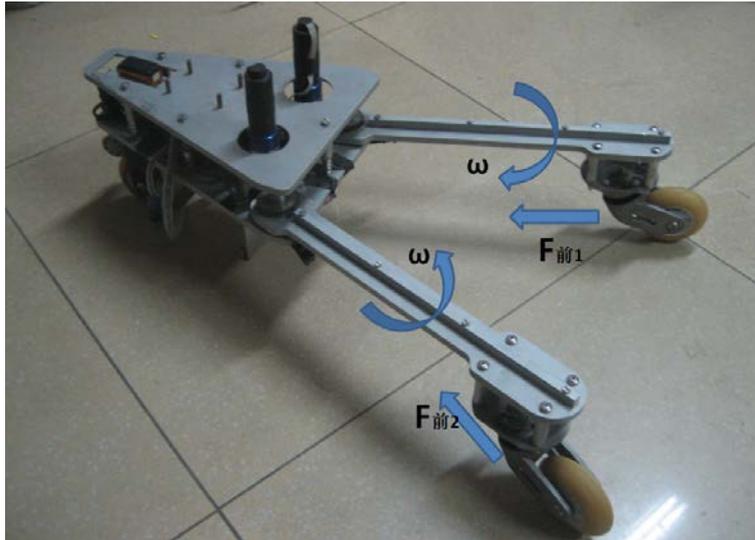


图3.9 机器人陆上受力情况示意图

3.2 两栖蛙板机器人在水中的驱动方式

在前述已确定机械结构的基础上，通过增加某些功能构件，来实现机器人在水中的运动。

3.2.1 机器人模型水中运动驱动问题

在水中驱动时，仍考虑用两腿的结构来做前进动力之源。因此在后轮上方增加两片尾鳍。为简化说明，先假设尾鳍为刚性，如图3.10所示，当两腿合拢时，尾鳍受到水流的阻力 F_z 垂直于尾鳍表面，经过正交分解后得到 F_x 和 F_y 两个分力，分别平行和垂直于底板中垂线。由于结构对称，所以两侧受到的力 F_x 方向相同，进行叠加，力 F_y 方向相反，相互抵消。因此， $2 * F_x$ 提供向前的动力。当尾鳍为柔性时，受力肯定也大致满足这个关系。

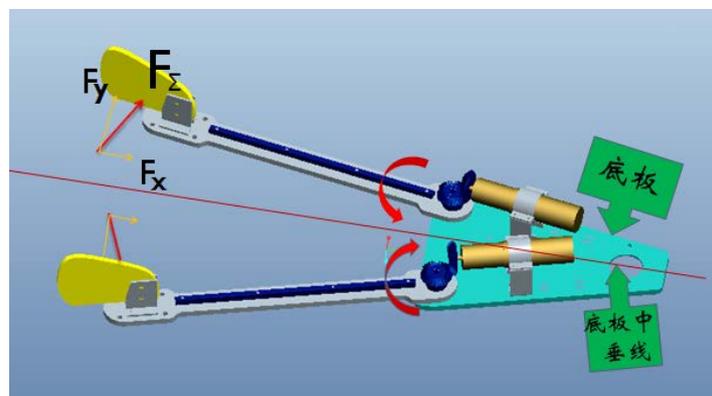


图3.10 机器人水中受力分析

当两腿分离时，即旋向与图3.10所示相反，如果按照刚性尾鳍来说明，是无法起到推进作用的。因此，此处取消“尾鳍为刚性”这个假设，而是结合柔性尾鳍来解释说明。

由文献[4]可知，鱼类的推进模式之一为“尾鳍摆动式”，而且，这种推进方式可以仅通过尾部（坚硬的月牙形尾鳍和尾柄）的运动就可以产生超过90%的推力。具体推进原理，此处不再赘述。

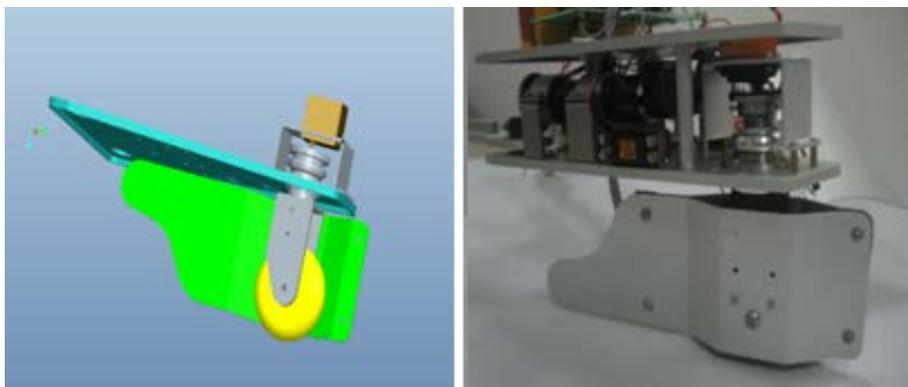
3.2.2 机器人模型水中的方向控制问题

方向控制问题又分为三部分：一是左右转向，二是上下俯仰，三是绕底板中心轴线旋转。

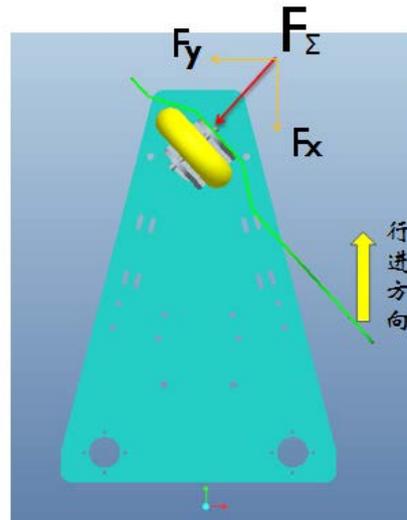


图3.11 明朝郑和下西洋时的战船

至于左右转向，模仿船上用来控制方向的舵来进行设计，如图3.11。结合现有结构，将舵前移，移至前轮部分，如图3.12（a）所示。



(a) 前舵安装示意图



(b) 前舵受力分析

图3.12 前舵示意图

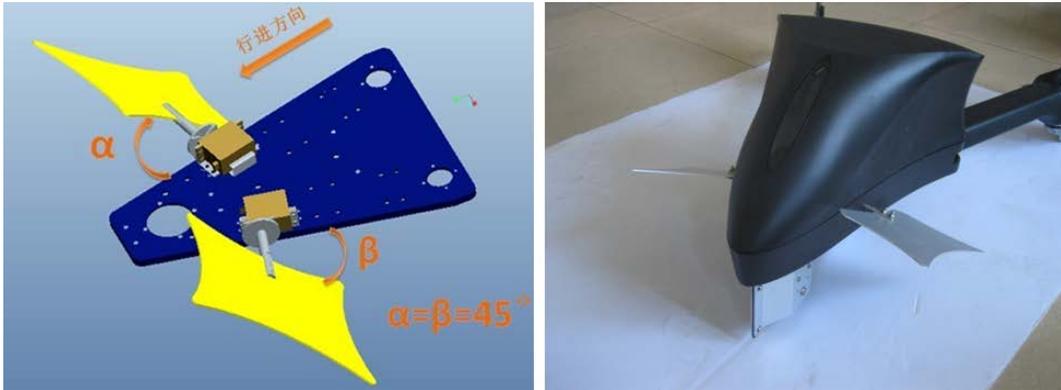
前轮上方电机能够带动前舵进行转向。机器人前移过程中，当前舵偏转一角度时，如图3.12 (b) 所示，受到的阻力 F_{Σ} 会分解成两个分力 F_x 和 F_y 。尽管 F_x 阻碍机器人前进，但是可由尾鳍产生的动力进行抵消。而 F_y 则为机器人提供了偏转力矩，实现转向。通过控制舵机偏转角度来改变偏转力矩的大小，进而调节转向幅度。在此说明一下，实际安装时是有两片前舵对称安装，在此为了表示清楚安装方式，只显示了一片舵。前舵最好是刚性的，因此选用金属材料，如铝。

关于上下俯仰和旋转运动的控制，原理仍旧类似于前舵，只不过是将舵水平对称放置于底板两侧，形成“胸鳍”，如图3.12。分别用舵机带动两侧的胸鳍。两胸鳍的倾斜角度分别设为 α 和 β 。以逆时针旋转为正方向：

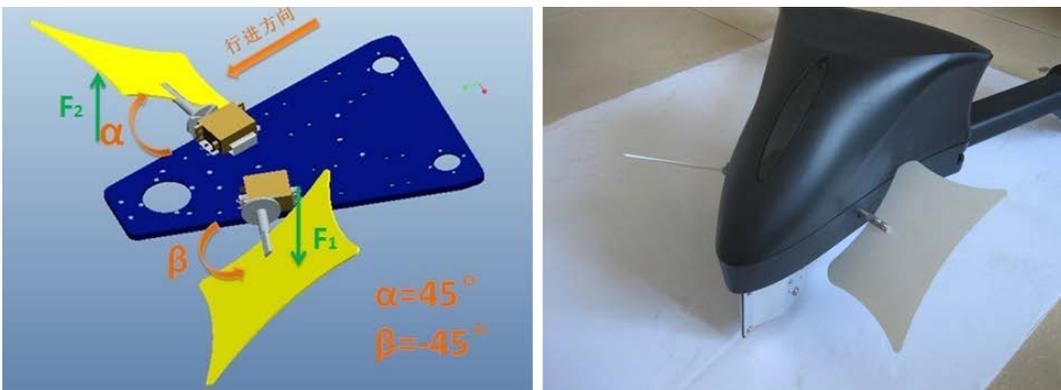
当 $\alpha = \beta > 0^\circ$ 时，如图3.13 (a) ,两胸鳍与底板夹角相同，受到的水流阻力均会产生向上的分力，使得机器人向上仰起。同理，若 $\alpha = \beta < 0^\circ$,两胸鳍受到的水流阻力均会有向下的分力，使得机器人向下运动。图中所示 $\alpha = \beta = 45^\circ$ ，是经过设计计算限定的胸鳍最大上摆角度，最大下摆角度也是 45° ，即图3.13 (b) 中的 $\alpha = -45^\circ$ 。

当 $\alpha < 0^\circ$, $\beta > 0^\circ$ 时，如图3.13 (b)，两鳍受到的阻力会有垂直于底板的分力 F_1 和 F_2 ，且方向相反，从底板前方看去，会产生绕底板中垂线的逆时针方向的

力矩，使得机器人绕底板中轴线逆时针旋转。同理，若 $\alpha > 0^\circ$, $\beta < 0^\circ$, 机器人会绕底板中轴线顺时针旋转。



(a) 上下俯仰运动示意



(b) 滚转运动示意图

图 3.13 胸鳍安装示意图

值得说明一下的是，图 3.13 中特别标示了前进方向，是因为一旦机器人停止运动，这种方向控制方式就会失效，无论舵机旋转角度如何，都无法起到转向的作用。

3.2.3 机器人模型水中的平衡问题

为了能在水中实现良好的密封，设计了外壳模具。模具分为两个部分——头部和腿部。头部的模具会产生较大的空腔，增大排水体积，增大机器人受到的浮力。腿部也会布置较为狭长的气囊嵌在腿部壳体模具中。经过建模分析，所设计机械结构体积约为 $V = 2.332 \times 10^6 \text{ mm}^3$, 密度约为 $\rho = 3600 \text{ Kg} / \text{ m}^3$, 得到总质量约为 $m = \rho \times V = 8.3952 \text{ Kg}$ 。根据这个数据来计算模具的空腔大小 V_a 。但是 V_a 要略大于计算得到的数值，以保留设计余量，并保证在机械结构组装完毕后，可以通

过增加配重来协调匹配机器人各部分密度大小，避免在水中出现“头重脚轻”或者“头轻脚重”的现象。设计计算在后面的模具设计说明中会具体介绍。

3.2.4 舵与鳍的面积计算

总体来说，胸鳍与前舵的面积计算大致相同，只是在结构上布置方式不同，下面就以前舵的面积计算为准进行分析。而尾鳍的计算单独说明。

(1) 胸鳍与前舵的面积计算

由于本舵是平衡舵（指的是舵轴的前后都有面积分布），故整体受力分析如下：

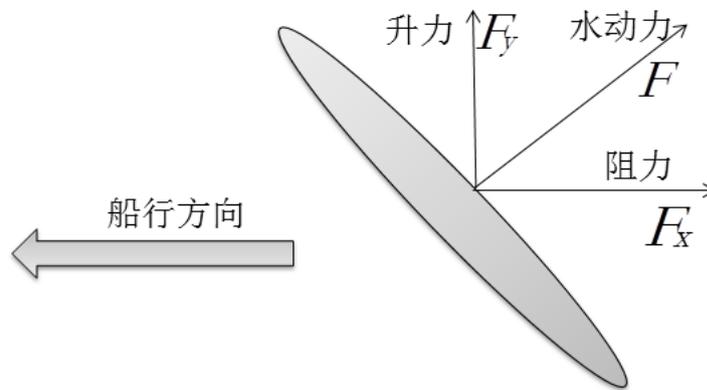


图 3.14 前舵受力分析

如上图所示，舵所受到的水动力可以分解成垂直于船身的升力 F_y 和沿船身方向的阻力 F_x 。力 F_y 对舵的转向起促进作用，阻力有碍于船的运动，但对转向影响不大。

① 本机器人舵的有关参数初步设计如下：

舵高 $h = 10\text{cm}$ ，舵宽 $b = 20\text{cm}$ ，即 $A = 200\text{cm}^2$ ；

展弦比 $l = h / b = 0.5$ ；

舵的平衡系数 $b = 1:5$ ；

船的行进速度取 $u = 0.5\text{m/s}$ ；

理论上，在以上情况下，在舵的转角 α 为 $0^\circ - 40^\circ$ 范围内升力系数 C_l 会随着转角 α 的增大而近似正比例增大，并在 40° 时达到最大值，估算为 1.2。继续增

大转角时 C_y 反而会减小。

故最大升力 $F_{y \max}$ 代入计算如下：

$$F_y = \frac{1}{2} C_y \rho A v^2 = \frac{1}{2} \times 1.2 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 200 \text{ cm}^2 \times 0.25 \text{ m}^2 / \text{s}^2 = 3 \text{ N} \quad (3-3)$$

同理阻力 F_x 也约为 3N。

② 力臂的大小：

由于平衡系数 b 为 1:5，故舵的力臂如图 3.14 所示：

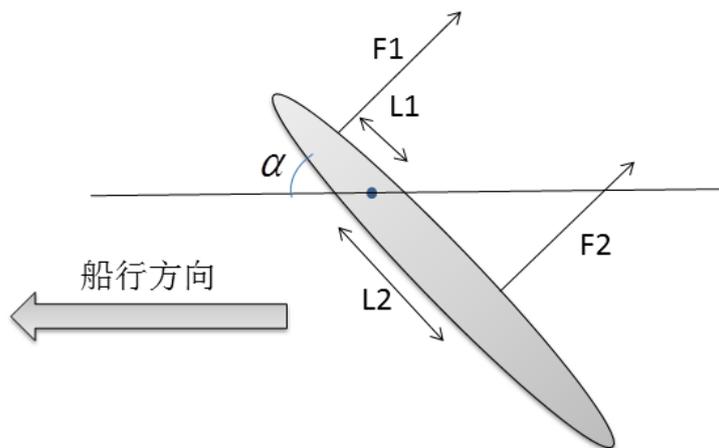


图 3.15 舵的力矩示意图

其中 $L_1 = 2 \text{ cm}$ ， $L_2 = 8 \text{ cm}$ 。

③ 舵静止时扭矩计算：

由于轴两边对称的部分可以互相抵消，故只需计算一边不对称部分即可（这时作用总长为 12cm，力矩为 10cm）。故当转角为 α 并且舵静止时，扭矩计算如下：

$$M_y = \frac{1}{2} C'_y \rho A_1 v^2 \cos \alpha L' = \frac{1}{2} C_y \rho A_1 v^2 \cos \alpha \frac{\alpha}{40^\circ} L' \quad (3-4)$$

由于 α 增长的速度比 $\cos \alpha$ 下降的速度更快，故当 $\alpha = 40^\circ$ ，扭矩最大。经计算此时 $M_y \approx 1.38 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ ，同理 $M_x \approx 1.38 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ ，故 $M_1 \approx 1.95 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 。

④ 舵旋转时扭矩计算：

$$d_F = \frac{1}{2} C'_y \rho v^2 h d_1 = \frac{1}{2} C'_y \rho (\omega l)^2 h d_1 \quad (3-5)$$

$$F'_{y1} = \int_0^{\frac{1}{5}l} \frac{1}{2} C'_y \rho (\omega l)^2 h dl = \frac{1}{750} C'_y \rho h \omega^2 l^3 \quad (3-6)$$

$$F'_{y2} = \int_0^{\frac{4}{5}l} \frac{1}{2} C'_y \rho (\omega l)^2 h dl = \frac{64}{750} C'_y \rho h \omega^2 l^3 \quad (3-7)$$

所以

$$M'_y = F'_{y1} \frac{l}{10} + F'_{y2} \frac{4l}{10} = \frac{1}{7500} C'_y \rho h \omega^2 l^4 + \frac{256}{7500} C'_y \rho h \omega^2 l^4 = \frac{257}{7500} C'_y \rho h \omega^2 l^4 \quad (3-8)$$

取 $C'_y = 1.2$ ，代入计算可得： $M'_y \approx 0.007 \omega^2 (kg \cdot m^2)$

由于舵机空载时的转速为 $0.08s/60^\circ$ (6.0V 时)，此时 $\omega = 13 rad/s$ ，设带负载时转速最大为 $\omega = 10 rad/s$ 代入可得

$$M'_y = 0.007 \omega^2 (kg \cdot m^2) = 7 kg \cdot cm \quad (3-9)$$

总转矩 $M = M_1 + M'_y = 8.95 kg \cdot cm$ ，由于舵机带动轮的旋转也需要一部分转矩，故为了保险起见舵机选用规格为 $20 kg \cdot cm$ 。

(2) 尾鳍的面积计算

至于尾鳍，预使用柔性材料，即使用柔性尾鳍，且只考虑摆尾式推进。根据文献[2]，为简化模型，首先作以下两个假设：

- ①以尾柄的横移运动为主，把前缘点看成是尾鳍摆动的转轴；
- ②运动中只考虑尾鳍沿弦向的变形，而不考虑沿展向的变形。

事先给定尾鳍的变形规律，使得各翼剖面中和线的变形规律符合二次抛物线 $y = ax^2$ ，前缘和后缘的振荡规律是

$$\begin{cases} y_0 = ay_0 C_0 \sin(2\pi ft) \\ y_1 = ay_1 C_0 \sin(2\pi ft - \psi) \end{cases} \quad (3-10)$$

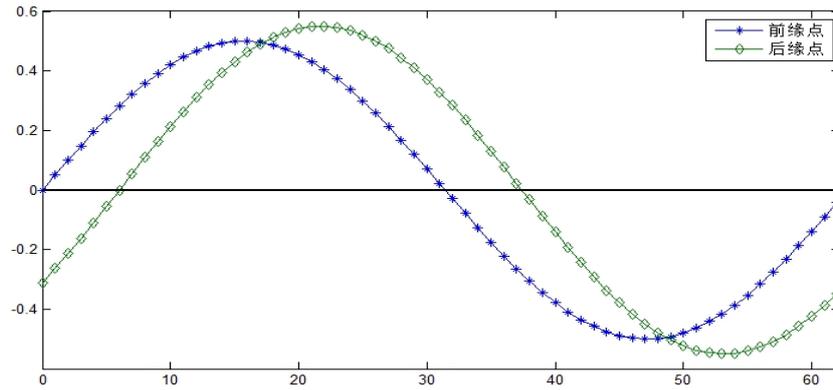


图 3.16 前缘点和后缘点的脉动

由于只考虑翼的弦向变形，所以确定翼剖面中弧线的位置，保持变形后翼的厚度和中弧线的长度不变，就可以确定翼的具体形状不变。

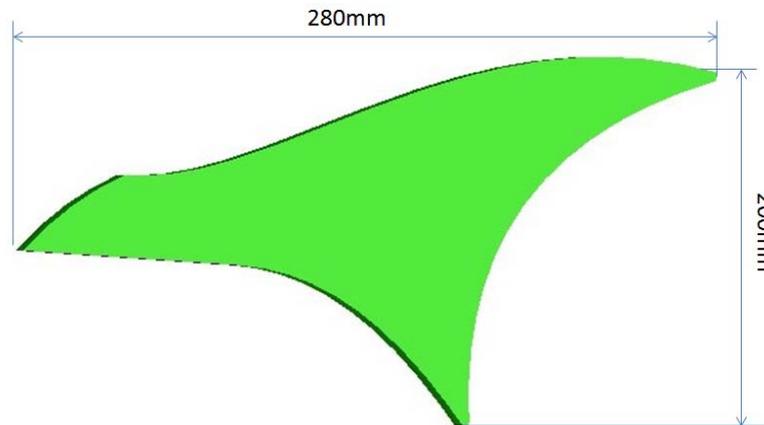


图 3.17 尾鳍形状

然而由于知识水平有限，对于尾翼，先用实物进行调试，直至达到理想的驱动效果。最初设定尺寸大约如图 3.17 所示，该尺寸留有较大余量。至此不再赘述。

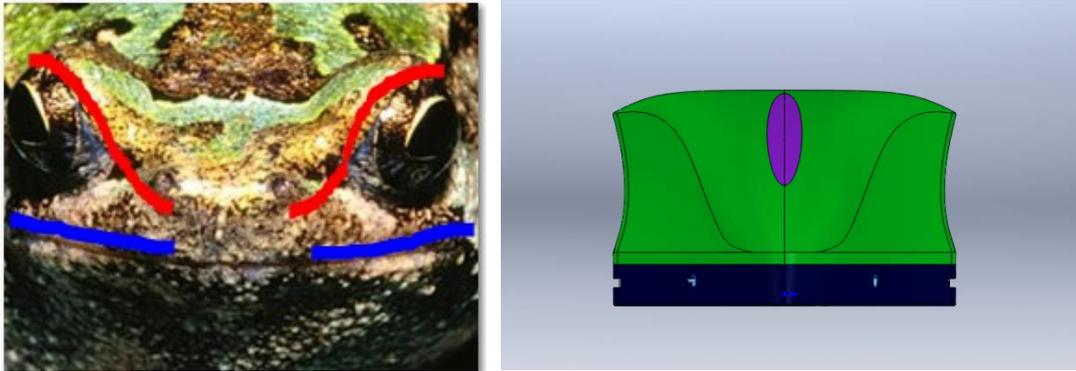
3.3 两栖蛙板机器人的模具设计

在机器人的外部设计有模具，该模具主要有三个方面的作用：美观、密封和平衡浮力与重力的关系。

3.3.1 头部设计

“蛙板机器人”的前脸造型以青蛙头部外凸的眼睛及头部的轮廓为造型元素，结合蛙板机器人头部传统的三角形结构进行设计。如图 3.17 (a) 中的红线

与蓝线示意。



(a) 青蛙头部造型图

(b) 模具头部主视图

图 3.18 模具头部主视图设计

从侧视图来看，轮廓线由前至后先扬后抑（向上扬起之后向下收回），形成一种向前冲击的感觉。并且头部后端汇集收拢向后方扬起，使头部造型更加生动，与腿部相互呼应，使整体性更强。

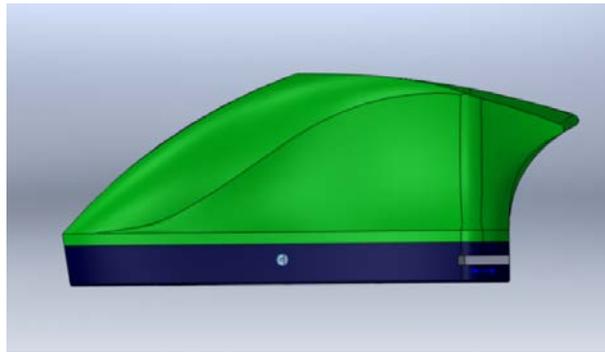


图 3.19 模具头部侧视图

对于俯视图来说，主要是考虑整体的流线型，头部尽可能地集中收拢以使其

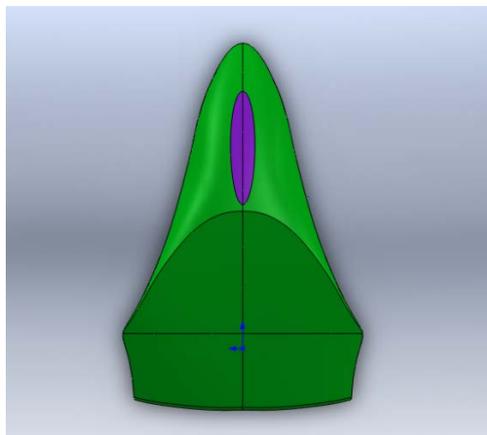


图 3.20 模具头部俯视图

在水中工作时阻力最小，能够高效工作。前脸处开椭圆透明玻璃窗，以使安装在头部的摄像头能够透过透明窗口正常工作。

在今后具体实践应用时可以根据功能要求的不同对头部的外壳设计进行微小改动，如透明玻璃窗部分可改为两个垂直于头部中垂面布置的玻璃窗，变为双目视觉，或者进行适当改动变成全景视觉等。

3.3.2 腿部设计

为减小机器人在水中工作时，腿部摆动过程中水流的阻力，腿部整体采用较为扁窄的造型，在腿部两侧具有由中间向两侧的流线型圆滑曲面。腿部从前端直至后轮的前方为密封腔体。从侧视图来看，腿部由头部的底端延伸出来，逐渐的向后轮收拢，在后轮处形成上扬的造型，与头部配合增强了整体性，并且使其看上去更加灵活轻快。在后轮的上方处为了减小水流的阻力在每支腿的两侧开有疏导水流的孔隙。如图所示：



图 3.21 模具腿部侧视图

3.3.3 密封设计

为了保证机器人在水下可以进行良好的运动，机器人整体的密封是必不可少的。蛙板机器人的外部制作了防水模具，以实现整体的防水，但是在模具与执行结构的连接处还需要进行进一步的防水。

密封设计如图 3.22 所示。对于 1 处（模具与前轮轴连接处）的密封与 2 处（模具与胸鳍轴连接处）的密封类似，因为这两处执行结构均做旋转运动，因此利用传统的 O 型圈配合聚四氟乙烯滑环的密封件密封方法，并在密封件周围涂

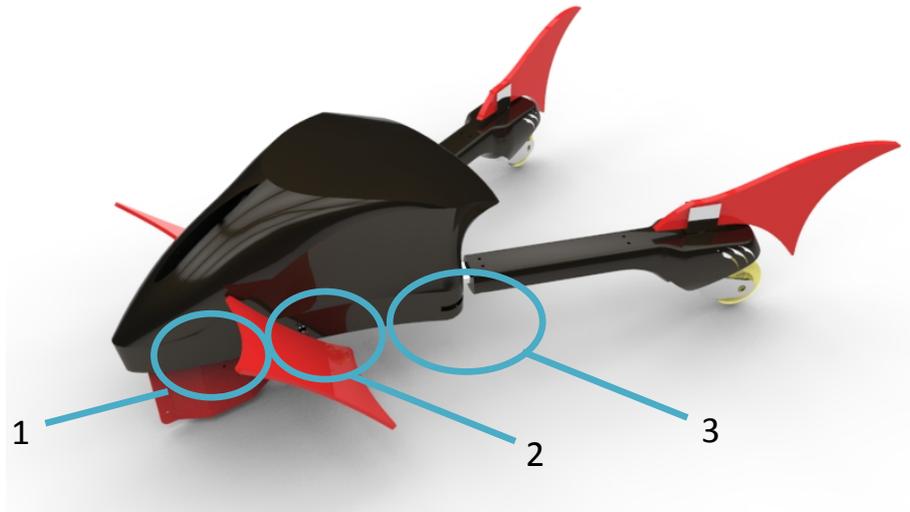


图 3.22 机器人整体密封设计

(1-模具与前轮轴连接处；2-模具与胸鳍轴连接处；3-头部模具与腿部连接处。)

抹防水硅脂，达到更好的密封防水效果。

对于 3 处（头部模具与腿部连接处），考虑到腿部的旋转轴是处于头部内部，在头部模具之外，腿部是实现小范围的摆动运动，因此不可使用旋转密封件进行密封。在 3 处，使用柔性的防水材料进行包裹式密封，如利用防水硅胶将该区域全部包裹起来以实现整体的密封。

总的来说，密封设计如表 3.1 所示：

表 3.1 密封方式综述

编号	部位	密封方式
1	模具与前轮轴连接处	O 型圈+聚四氟乙烯滑环+硅脂
2	模具与胸鳍轴连接处	O 型圈+聚四氟乙烯滑环+硅脂
3	头部模具与腿部模具连接处	防水材料包裹（如硅脂等）

经过测试，以上密封方式可以达到很高的防水能力，密封可靠。

第四章 两栖蛙板机器人硬件电路设计方案

本章主要介绍了为了完成各个执行机构的控制，并与机械结构配合而设计的硬件电路。整个机器人的硬件电路由控制器、运动驱动、平台检测、电源模块以及通讯模块等构成。本章对这些部分之间的关系进行简要介绍后，对它们的设计及元器件的选型进行了阐述。

4.1 硬件电路整体设计

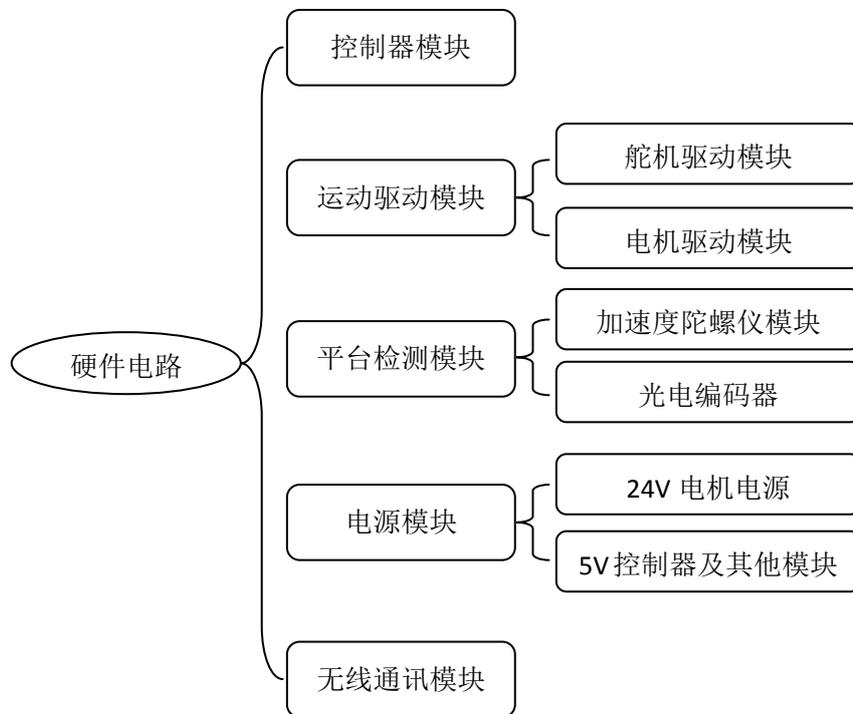


图 4.1 硬件电路整体设计图

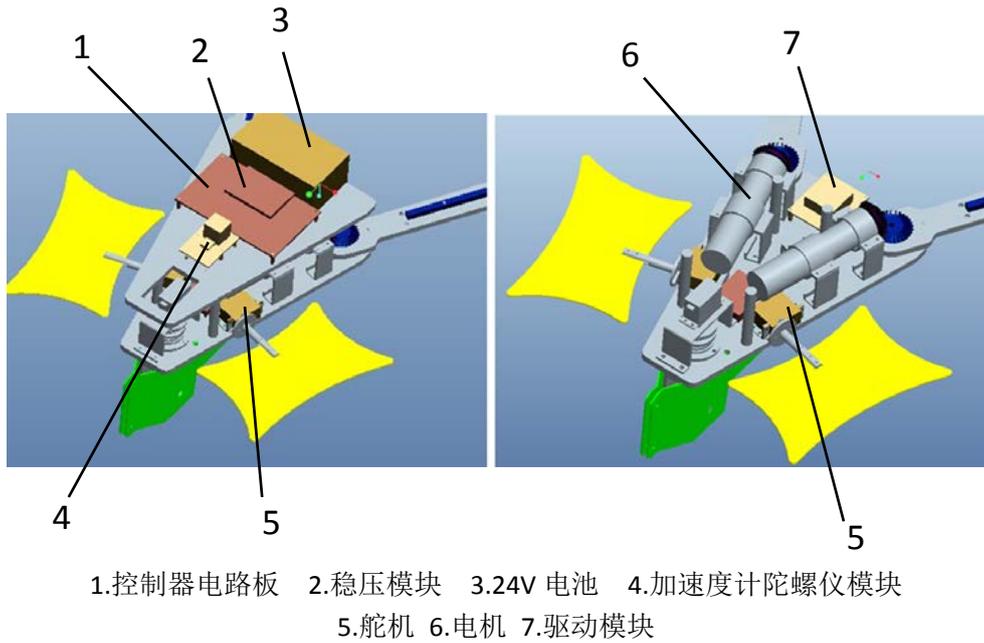


图 4.2 机器人机身硬件实物

硬件电路主要由电源模块，控制器模块，运动驱动模块，平台检测模块，无线通讯模块五部分组成，其中控制器模块是整个系统控制算法实现的核心，运动驱动模块包括电机驱动和舵机驱动，电机驱动负责驱动直流电机并控制转速，舵机驱动负责控制前端和胸鳍舵机的转向，平台检测模块包括光电编码器和加速度计陀螺仪传感器，光电编码器负责测量电机转速并反馈回控制器，加速度计和陀螺仪模块负责检测机器人水下姿态，电源模块将 24V 电源电压供给电机，并提供 5V 电压供给控制器和其他外围电路，无线模块负责与上位机的通讯。各模块在机身的分布及放置如图 4.2 所示。

4.2 运动驱动模块设计

4.2.1 执行机构选型

(1) 舵机选型

综合舵机的性能和该机器人结构功能上的要求，舵机主要应用在机器人的前舵（前轮）和胸鳍处，分别用于控制机器人水陆的换向和水中的俯仰。

该机器人对舵机的要求主要体现在以下几个方面：

1、大转矩。根据<3.2.4 舵与鳍的面积计算>可得，机器人对转矩的要求是

12kg·cm；

- 2、小体积。由于机器人结构的限制，故要求舵机小体积化；
- 3、小重量。考虑到机器人的载重和水中浮力的平衡问题，要求舵机小重量；
- 4、小功率。由于机器人机体的功耗模块较多，故需要小功率；
- 5、反应速度快，控制精准；
- 6、稳定性好，由于机器人在水下工作，为了保证密封不宜频繁更换舵机。
- 7、运行平稳，噪声小，震动小。

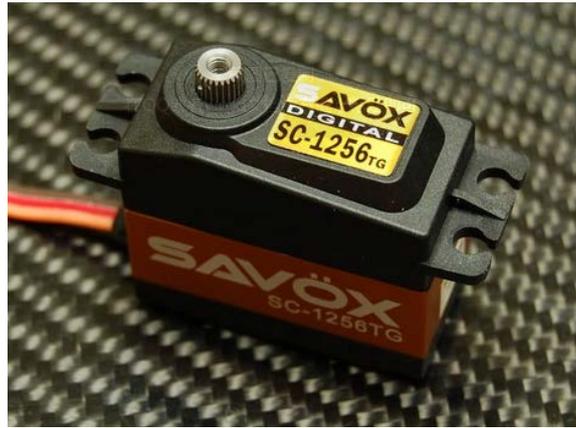


图 4.3 Savox SC-1256TG 舵机

综合以上考虑，舵机选型为 Savox SC-1256TG，该舵机可以满足以上要求。具体参数如表 4.1 所示。

表 4.1 SC-1256TG 舵机参数

型号	SC-1256TG
类型	数字舵机
额定电压	6V
尺寸	40.5*20.5*38mm
重量	53g
空载转速	0.15S/60 度
额定扭矩	20kgcm
齿轮材质	钛合金&铝合金

经过测试该型号舵机可以很好地满足两栖蛙板机器人的要求。

(2) 电机选型

本机器人采用腿部蛙式驱动方式来驱动机器人的水陆行走，动力来源于腿部的开合。因此电机成了必不可少的驱动。

该机器人对电机的要求主要体现在以下几个方面：

- 1、大转矩；
- 2、小体积：由于机器人结构的限制，故要求电机小体积化；
- 3、小重量：考虑到机器人的载重和水中浮力的平衡问题，要求电机小重量；
- 4、小功率：由于机器人机体的功耗模块较多，故需要小功率；
- 5、反应速度快，控制精准；
- 6、稳定性好，由于机器人在水下工作，如果电机稳定性不好则需要经常更换维修，不利于密封；
- 7、运行平稳，噪声小，震动小。

综合考虑以上要求，电机选型为 MAXON RE35，该电机能很好地满足以上要求。它是一款无刷空心杯转子直流电机。如图 4.4 所示。



图 4.4 MAXON RE35 电机

具体参数如表 4.2 所示。

表 4.2 RE35 电机参数

型号	RE35
额定电压	24V
空载转速	7670rpm
额定功率	90W
额定转速	6910rpm
额定转矩	93.3mNm
额定电流	3.36A
堵转转矩	1160mNm
堵转电流	39.7A
电机质量	340g

由于电机转速较快，故转矩输出需要对电机进行降速，以此来增大输出转矩，因此选用了电机配套的减速箱。

减速箱选型为 MAXON GP32HP，各主要参数如表 4.3 所示。

表 4.3 GP32HP 减速箱参数

型号	GP32HP
精确减速比	3588/35
最大连续输出转矩	8Nm
转动惯量	0.7gcm ²
质量	213g

经过测试该型号电机和减速箱可以很好地满足两栖蛙板机器人的要求。

4.2.2 驱动电路设计

电机驱动是电机控制必不可少的模块，为了简单起见并达到更有效的控制精度，购买了相应的电机驱动模块。

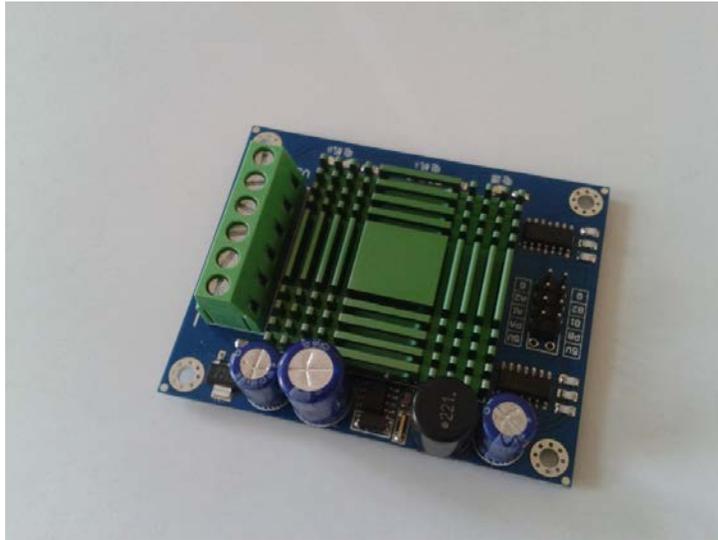


图 4.5 电机驱动模块

该电机驱动模块集成度高，体积小，板载两路大功率直流电机驱动。可有效散热，保持模块的良好稳定性能。驱动能力强，开关频率高，接口简单，可以满足机器人使用电机的驱动要求。具体参数如表 4.4 所示。

表 4.4 电机驱动模块参数

额定电流	60A
峰值电流	160A
开关频率	60kHz
尺寸	70mm*56mm
控制电压	3.3V/5V

经过测试该型号电机驱动可以很好地满足两栖蛙板机器人的要求。

4.3 平台检测及控制模块设计

4.3.1 控制器选型

该机器人需要实现 3 个舵机的控制，2 个电机的控制，2 路光电码盘的信号读取，4 路遥控器信号的读取以及一些控制端口的 I/O 操作。因此对控制的需要可以看作以下几点：

1. 多路高精度 AD；

2. 多路 PWM 用于直流电机和舵机驱动；
3. 足够的 GPIO 用于读取编码器、遥控器的信号输入；
4. 足够的串口用于与外界通讯。

考虑到整个机器人对控制的电机控制能力要求较高，因此选用了比较适合电机控制的 AVR，选用 ATmega128 可以满足系统的需求。



图 4.6 控制器 ATmega128 最小系统

其主要参数如表 4.5 所示。

表 4.5 ATmega128 控制器参数

型号	ATmega128
定时器数量	4 个
8 位 PWM	2 路
分辨率可编程 PWM	6 路
工作电压	4.5-5.5V
Flash 容量	128K
最高频率	16MHz

经过测试该控制器可以很好地满足两栖蛙板机器人的要求。

4.3.2 光电编码器选型

光电编码器，是一种通过光电转换将输出轴上的机械几何位移量转换成脉冲或数字量的传感器，常用于电机测速。

在该机器人上使用光电编码器，对机器人可实现实时闭环控制，提高机器人运行平稳性，提高精确度。

增量式光电编码器是直接利用光电转换原理输出三组方波脉冲 A、B 和 Z 相。A、B 两组脉冲相位差 90 度；作参考零位的 Z 相标志（指示）脉冲信号，码盘每旋转一周，只发出一个标志信号，用于基准点定位。它的优点是原理构造简单，机械平均寿命可在几万小时以上，抗干扰能力强，可靠性高，适合于长距离传输。其缺点是无法输出轴转动的绝对位置信息。

该机器人光电编码器选型为 MAXON HEDL 5540。

MAXON HEDL 5540，它是一款增量式光电编码器，3 通道可输出 3 组正反向信号，故共有 6 跟信号线。具体参数如表 4.6 所示。

表 4.6 HEDL 5540 编码器参数

型号	MAXON HEDL 5540
一周脉冲数	500
通道数	3
最高转速	12000rpm
电源	5V

经过测试该型号光电码盘可以很好地满足两栖蛙板机器人的要求。

4.3.3 陀螺仪选型

水下蛙板机器人由于需要在水下保持姿态平衡，因此需要对姿态做出精确可靠的判断，这就需要精度较高的 3 轴陀螺仪和 3 轴加速度计结合的惯性测量单元，由于需要对原始数据进行积分和推算来获取姿态信息，因此需要数据的精度较高，零点漂移小的陀螺仪和加速度计，并且安装在机器人上，机器人本身的机械震动对传感器测量也会有很大影响，而且由于机器人体积有限，并不能使用体积和功耗过大的大型器件，另外由于机器人需要在水下运动，因此需要温度适应范围较广，对环境敏感程度低，密封性能较好的传感器，综上所述，选择的姿态测量传感器应具有以下特点：

1. 精度高，零点漂移小；
2. 体积和功耗小；
3. 温度特性好；

4. 三轴陀螺仪和三轴加速度计。

因此高精度微机电传感器是较为合理的选择，最终选择 ADIS16365 这款高精度三轴惯性传感器。



图 4.7 ADIS16365 陀螺仪

ADIS16365 iSensor 是一款完整的三轴陀螺仪与三轴加速度计惯性检测系统。这款传感器结合了 ADI 公司的 iMEMS 和混合信号处理技术，提供校准的数字惯性检测，是高集成度的解决方案。SPI 接口和简易的输出寄存器结构实现方便的数据和配置控制。其主要参数如表 4.7 所示。

表 4.7 ADIS16365 陀螺仪参数

型号	ADIS16365
尺寸	23mm*23mm*23mm
3 轴陀螺仪精度	0.0125 度/s
加速度传感器精度	3.2mg
工作温度	-45 至 80 度

经过测试该型号陀螺仪可以很好地满足两栖蛙板机器人的要求。

4.4 电源模块设计

综合考虑电池的容量、体积和充放电能力，机器人选用锂电池作为电源，通

过相应的电压转换及稳压电路给工作电路供电。电池的安装要求容易拆卸和充电,由于机器人要进入到水下工作,因此对电池的一些密封保护措施也十分必要。

电源模块的作用是从 24V 的锂离子电池处分出 5v 的直流电压为 MCU 和各类传感器供电。在电压输出口使用 10uf 的电容稳压并辅以三端稳压器,稳定供给单片机和各传感器电压,电机的供电是由锂离子电池直接供给,由于锂离子电池的容量受机器人携带能力的限制,电压会随着使用有轻微降低,而电流输出能力也会受到一定的影响,因此不断及时的充电是必需的。

4.4.1 电压转换模块

电压转化模块的作用是将 24V 锂电池电压转化为 5V,由于输入输出压差较大,且功率高应采用开关电源模块。

电压转换模块采用 GTA2405S-25 宽电压输入,隔离稳压 DCDC 模块电源,它具有较好的高温特性和较高的开关频率。



图 4.8 GTA2405S-25 稳压模块

模块相关参数如表 4.8 所示。

表 4.8 GTA2405S-25 电压转换模块

型号	GTA2405S-25
转换效率	86%
输入电压范围	18-36V
输出电压	5V
额定电流	5000mA
开关频率	300kHz

经过测试该型号稳压模块可以很好地满足两栖蛙板机器人的要求。

4.4.2 稳压模块

稳压模块将电压转换模块输出的 5V 电压进行线性化以供给单片机和传感器，采用较常用的 LM2940 芯片，LM2940CT- 5.0 特性参数如表 4.9 所示。

表 4.9 LM2940 稳压模块参数

型号	LM2940
输出电压	5V
最小输入输出电压差	小于 0.8V
输出电流	1A
最大输出电压	26V

经过测试该型号稳压模块可以很好地满足两栖蛙板机器人的要求。

4.5 无线通信模块设计

4.5.1 图像传输设备选型

当蛙板机器人在水下运动时，可以通过无线图像传输来获知水下的环境信息，一方面对机器人的状态进行观察，另一方面扩展了蛙板机器人的功能。

经过多方比较，在机器人内部安装决定使用下列这款无线模块。



图 4.9 无线摄像头模块

这款无线图像传输模块，内置电源，体积小，图像清晰，可满足系统需求，主要参数如表 4.10 所示。

表 4.10 无线图像传输模块参数

尺寸	50mm*66mm
电池容量	500mA
连续工作时间	2-4 小时
传输距离	100-200 米
工作频率	2.4GHz

经过测试该型号摄像头可以很好地满足两栖蛙板机器人的要求。

4.5.2 遥控器及信号接收机选型

由物理常识可知，电磁波是无法在水下传播的，因此对于无线遥控器的选择就比较重要。经查阅相关资料，在水中，数字调制的无线信号以及低频信号可以传的更远，该蛙板机器人的遥控器发射机和接收机分别选择了 Futaba 6EXHP 和 146IP。遥控器如图 4.10 所示。



图 4.10 Futaba 遥控器

遥控器相关参数如表 4.11 所示。

表 4.11 遥控器相关参数

通道数	6
传输频率	72MHz
传输格式	PCM（数字调制）
传输距离	2000 米

该遥控器是 6 通道的 PCM（数字调制）的遥控器，6 个控制通道可以满足机器人的水下运动控制，选用 72MHz 的频率，这比当今较为流行的 2.4GHz 更适合水下控制。经过测试该型号遥控器可以很好地满足两栖蛙板机器人的要求。

4.5.3 无线数据传输模块选型

在调试的过程中，由于水下工作要考虑密闭性的问题，无法直接连出通讯接线来实现状态的实时监控，因此需要通过无线模块将这些数据传回上位机进行处理。一方面可以创造一个很好的调试环境，另一方面也能更好地实现机器人姿态的实时监控。

经过多方比较，决定使用 APC230-43 这款无线模块。



图 4.11 APC230-43 无线模块

表 4.12 APC230-43 无线模块参数

型号	APC230-43
尺寸	39.5mm*18.3mm
工作电压	3.4V-5.5V
传输距离	1800 米(9600bps)
工作频率	418-455MHz (1KHz 步进)

经过测试该型号无线模块可以很好地满足两栖蛙板机器人的要求。

4.6 PCB 电路制作

为了保证电路的整洁同时避免一些线路之间的干扰,进行了机器人控制电路 PCB 制作。利用 Altium Designer 进行电路原理图和 PCB 的绘制,软件设计图如图 4.12 所示。经过相应的优化、制板、焊接和调试最终完成了控制电路的制作,实物如图 4.13 所示。

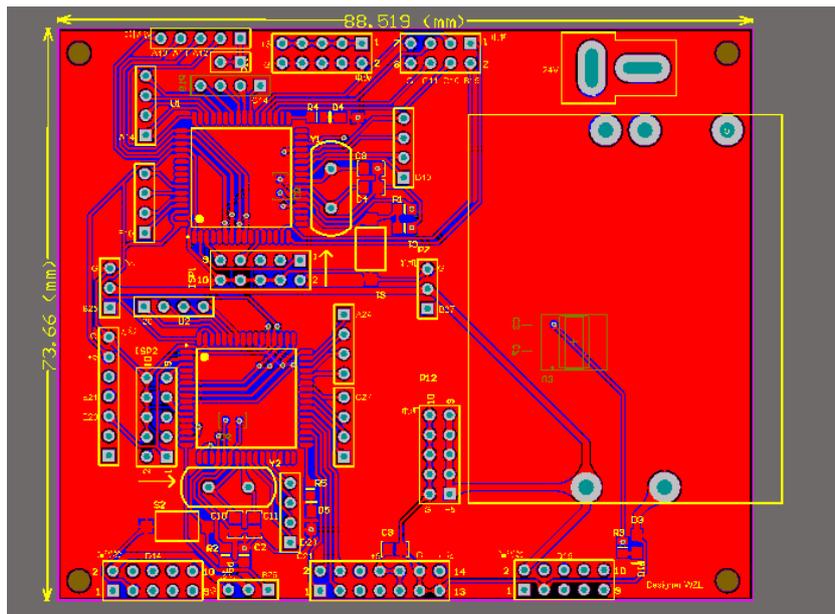


图 4.12 PCB 软件设计图

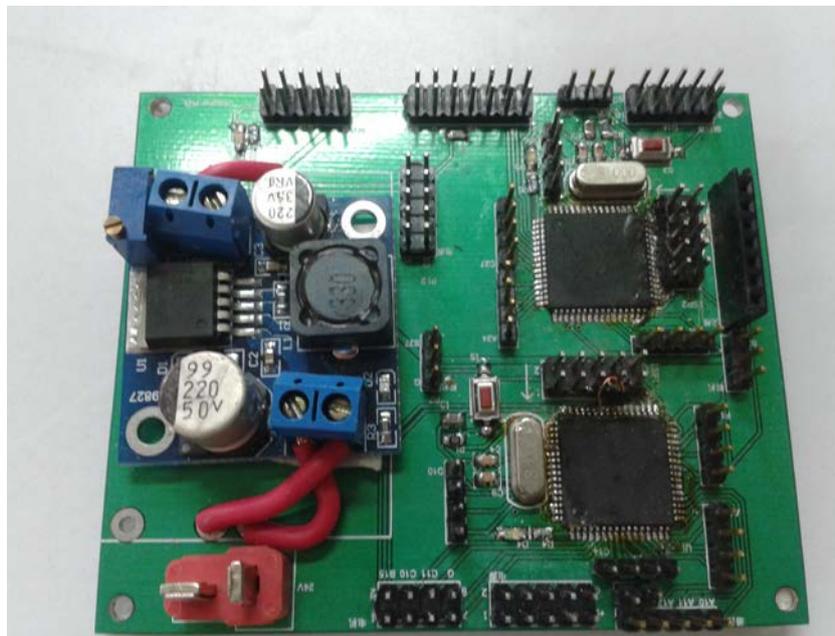


图 4.13 机器人 PCB 电路

经过测试 PCB 各项性能指标完好，系统能够完好工作。

硬件电路的合理设计保证了执行机构对指令能够做出迅速、正确的反应。控制器采用主从两块单片机组成，将整个电路板按功能划分为指令控制与数据检测处理两部分，大大提高了程序运行的效率，提高了反应速度。同时，元器件的放置与排布充分考虑了各类可能的干扰因素，使硬件电路能够长时间工作不发生故障，为整体功能的实现打下了坚实的基础。

第五章 两栖蛙板机器人软件设计方案

本章在第四章硬件设计的基础上，介绍了两栖蛙板机器人的软件设计。结合机器人的机械设计和硬件电路设计，给出了机器人执行结构的控制方法及控制原理框图。同时也给出了系统的重要流程图。最后介绍了通信部分的软件设计及上位机界面的设计。

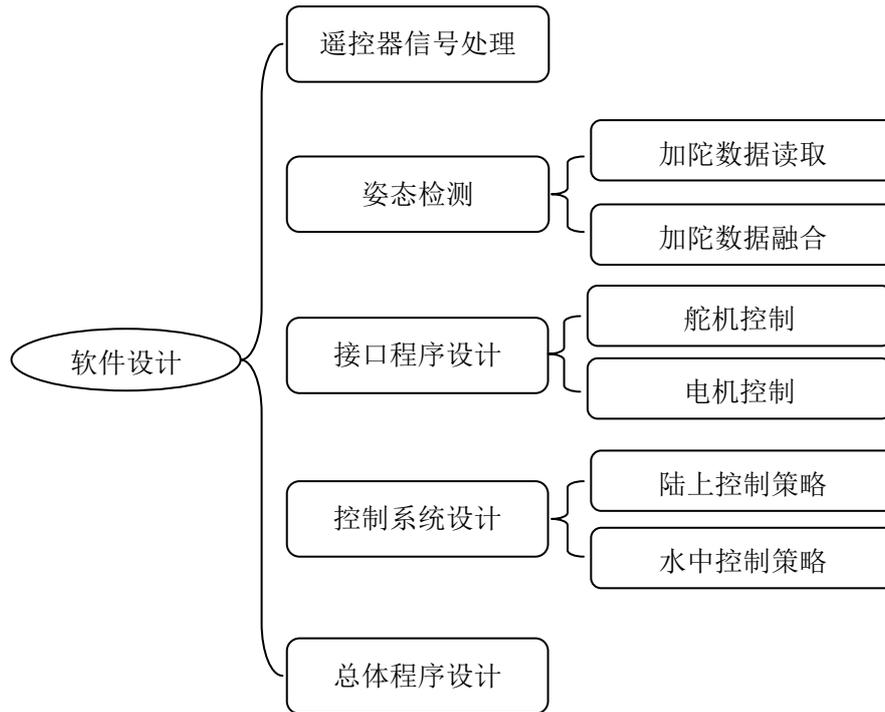


图 5.1 软件整体设计图

5.1 遥控器信号处理程序

在该机器人上利用了 4 个遥控器信号的通道，每个通道的遥控器信号是一路 PPM 波（Pulse Position Modulation），又称脉位调制。信号由周期性的高低电平组成，在一个周期内有一段时间为高电平，高电平的时间宽度即对应遥控器通道值的大小。根据实际测量，该机器人使用的 Futaba 6EX 遥控器的 PPM 波周期为 14.3ms，正脉宽在 1.2ms-2.0ms 之间。在机器人的控制中用到的 4 个遥控器通道信号，通道 1 控制机器人左右运动（偏航运动），通道 2 控制机器人水下的俯仰运动，通道 3 控制机器人的行驶速度，通道 4 控制机器人水下的滚转运动。当机器人在陆上运动时，靠通道 1 和通道 3 就可以完成控制。

要实现机器人的良好控制，信号的读取是第一步要做好的工作。该款遥控器

的正脉宽宽度的 1.2ms-2.0ms 对应了遥控器的 256 个档位，因此测量正脉宽的宽度就可以知道遥控器通道值大小。由图 5.1 可知，通道 1 和通道 2 的上升沿几乎同时出现，通道 3 和通道 4 的上升沿几乎同时出现，而通道 3 和通道 1 的相位则相差了 180 度左右。遥控器信号读取软件设计的基本思想是通过单片机的外部中断，当检测到上升沿时进入中断开始计时，再检测到下降沿时停止计时，时间即反应出了对应通道值的大小。为了避开同时出现上升沿的两个通道出现中断嵌套的情况，我们采用如图 5.3 所示的检测顺序。软件程序流程图如图 5.4 所示。

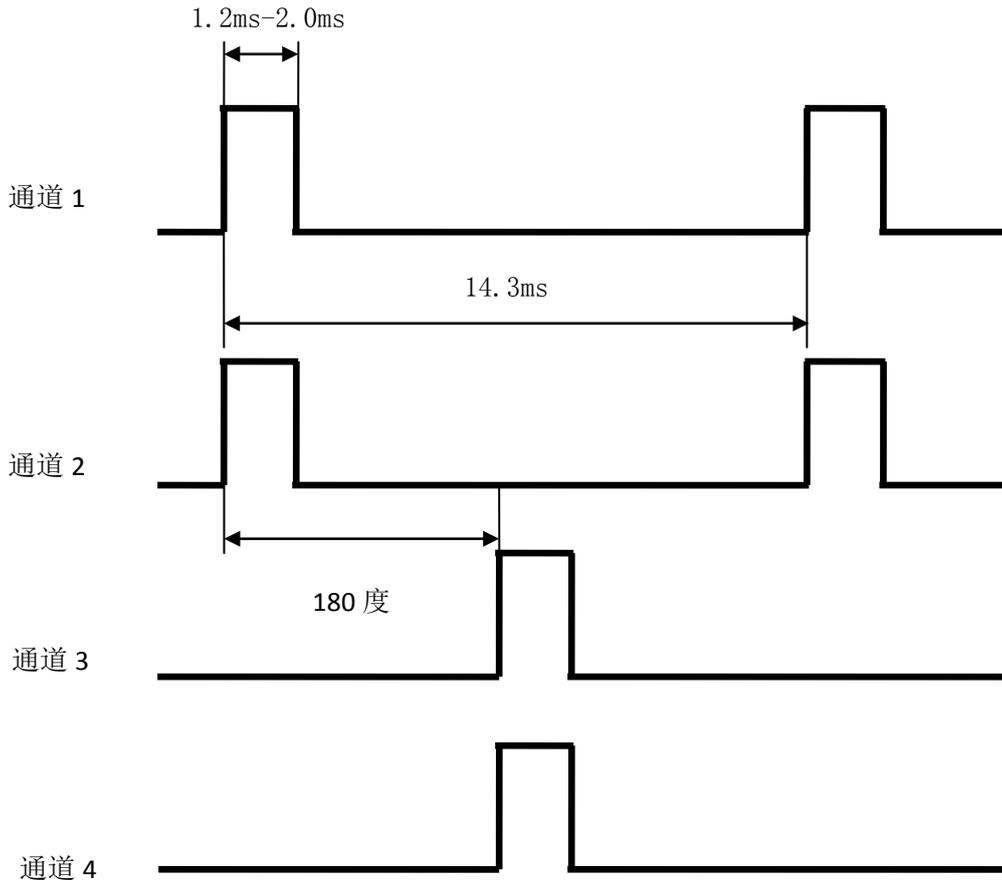


图 5.2 PPM 信号示意图

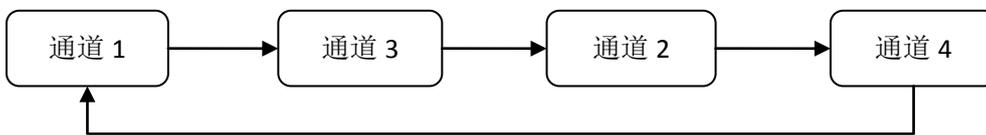


图 5.3 遥控器信号检测通道顺序示意图

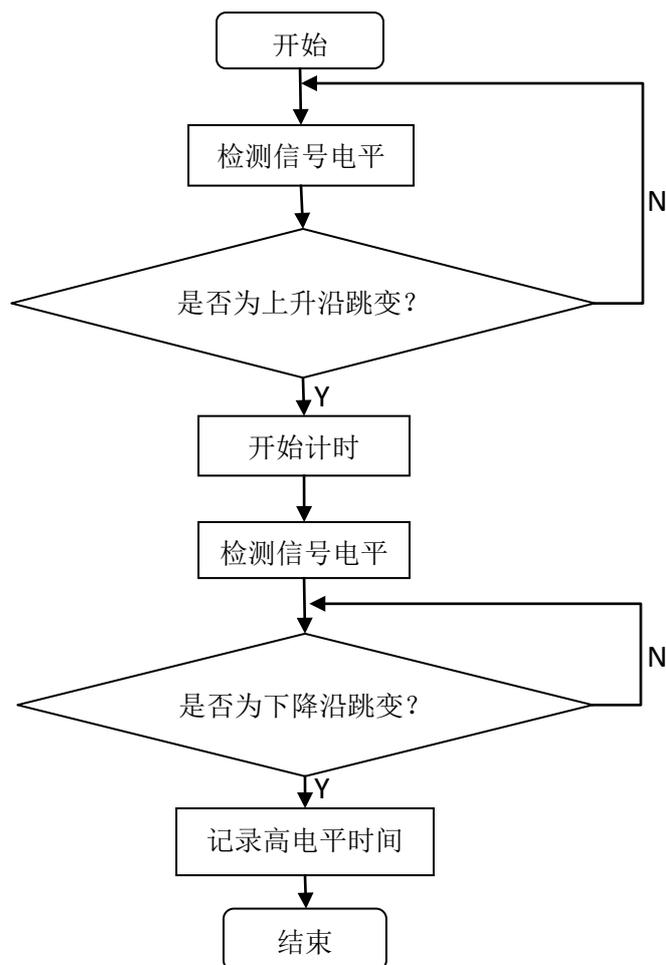


图 5.4 遥控器信号读取流程图

5.2 机器人姿态检测

5.2.1 陀螺加速度计数据读取

机器人使用的陀螺仪和加速度计是 ADI 公司的 ADIS16365，这款器件可以通过 SPI 的通信方式将数据读出。由于 SPI 是标准的通信接口，其具体的通信方式在此并不赘述，整个陀螺仪和加速度计的数据读取的大致原理是单片机利用 SPI 接口向器件发送一地址，就可以读出相应地址对应的那个传感器数值，这里需要 6 个数据，分别是陀螺的三轴数据和加速度计的三轴数据，读出完成之后就可在数据融合中使用。

5.2.2 陀螺加速度数据融合

陀螺仪、加速度计测量物体姿态的传感器，然而陀螺仪会产生静态漂移误差以及积分后的积累误差；加速度计动态特性较差，不利于测量快速变化的角度，

且输出会受自身加速度影响，同时无法测量偏航方向的角度变化。因此，为了消除误差，获得准确的角度信息，使用加速度计与陀螺仪数据融合的方式。

为了利用陀螺仪和加速度计获得蛙板机器人的姿态信息，在实验中使用了飞思卡尔智能车上常用的数据融合方法。利用这种方法可以较为快速的获得机器人的俯仰角和偏航角，实现容易，其具体的原理如图 5.5 所示。

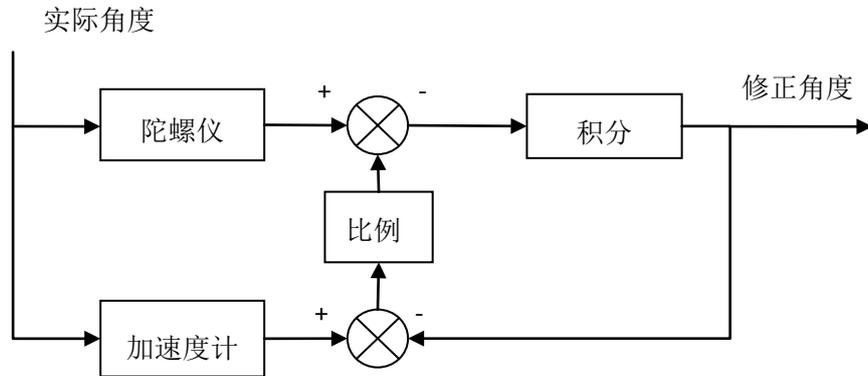


图 5.5 数据融合原理框图

用加速度计所获得的角度信息与陀螺仪角速度信号积分后的角度进行做差，将做差后的误差信号经过比例环节以后与陀螺仪角速度信号求和之后再积分。由于加速度计获得的角度信息不存在积累误差，所以经过比例积分环节之后产生的角度积累误差可被消除。

5.3 执行机构接口程序设计

该机器人上搭载的执行元件主要由舵机和直流电机组成，机器人的前舵和两个胸鳍分别由舵机控制，不断摆动的两个腿臂则是由直流电机控制。

5.3.1 舵机控制

(1) PWM 波生成

该机器人上使用的 3 个舵机均为数字舵机，可以利用 50Hz-300Hz 的控制信号进行控制，在这里使用传统的 50Hz 信号进行舵机控制，其控制原理如图 5.6 所示。为了得到较为精确的 PWM 波形，利用单片机的定时器的硬件 PWM 波功能产生 PWM 波。

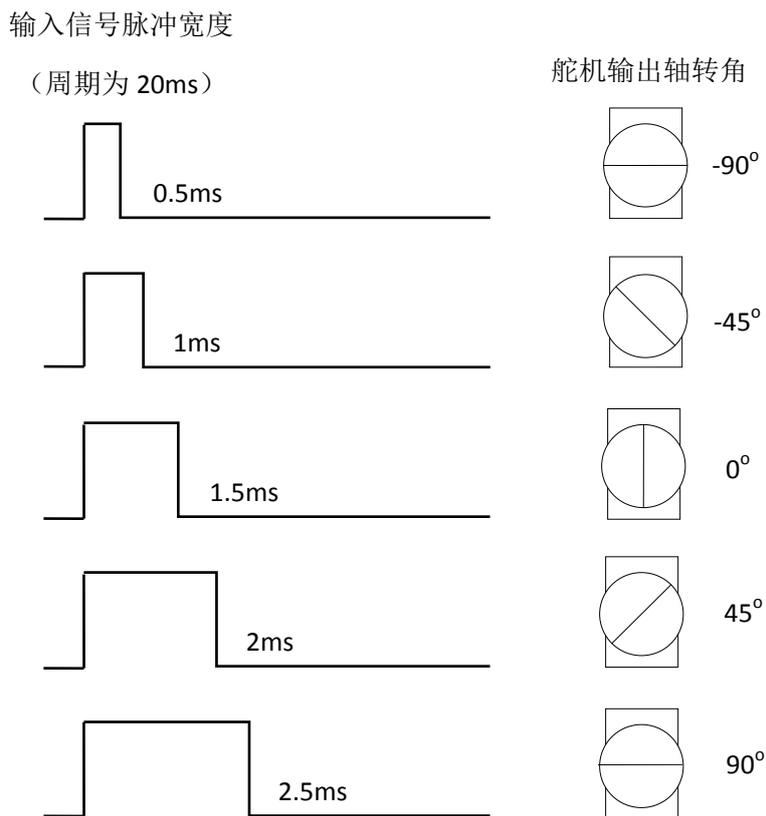


图 5.6 舵机控制波形原理图

(2) 数据滤波及合成

由前面分析可知，遥控器的通道 3 控制机器人前舵，即遥控器的通道 3 独立控制前舵对应的舵机；遥控器的通道 2 控制俯仰，通道 4 控制偏航，而这两个运动是由两个胸鳍共同决定的，因此遥控器的通道 2 或者通道 4 发生变化就会改变两个胸鳍控制舵机的状态。遥控器信号与舵机之间的对应关系如图 5.7。

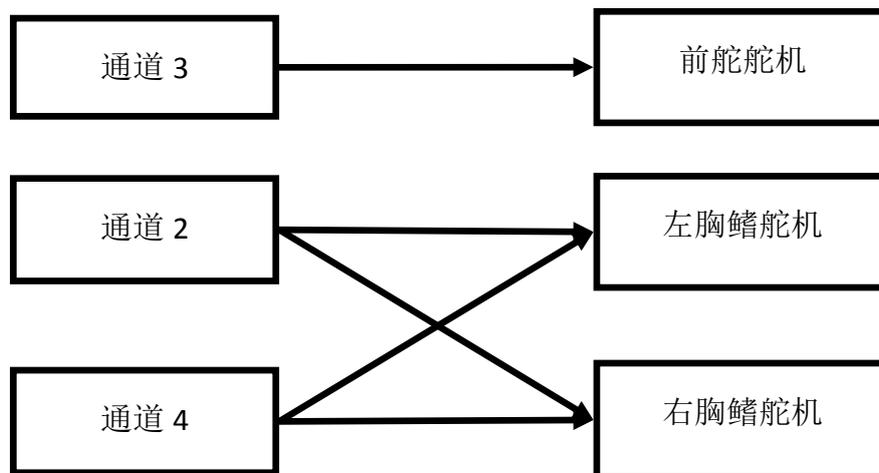


图 5.7 遥控器通道与执行机构对应图

因此将通道 2 和通道 4 的数值通过加减法叠加到左右胸鳍的控制量上，在控

制量更新的过程中，采用权值为 0.5 的一阶滤波，并用移位运算代替除法运算从而提高运算速度。重要代码如下：

```
ocr_data_filter[0]=(ocr_data_filter[0]>>1)+(ocr_data[0]>>1);  
ocr_data_filter[1]=375+(ocr_data_filter[1]>>1)-(ocr_data[3]>>2)+(ocr_data[1]>>2);  
ocr_data_filter[2]=750+(ocr_data_filter[2]>>1)-(ocr_data[3]>>2)-(ocr_data[1]>>2);
```

(3) 舵机控制流程图

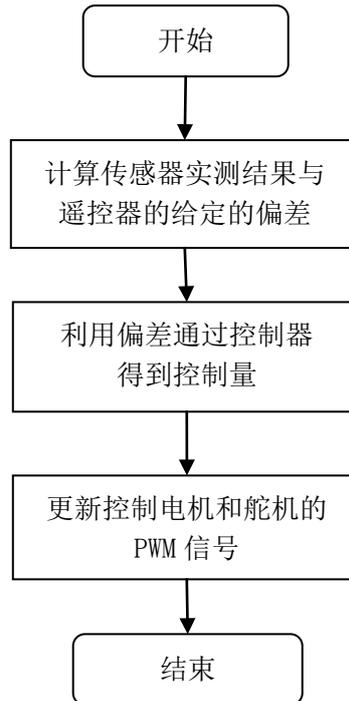


图 5.8 电机及舵机控制流程图

5.3.2 电机控制

(1) PWM 生成

直流电机的控制与舵机十分类似，都是利用 PWM 波进行控制。直流电机需要相应的驱动电路实现控制，软件方面的接口程序即使用 PWM 实现。在该机器人上，使用定时器产生两路 PWM 波对电机进行控制，这路 PWM 波的占空比与遥控器信号的通道 3 的信号宽度成正比。

与舵机控制不同的一点是，舵机 PWM 波的频率是 50Hz，而电机在 50Hz 控制信号下会产生较为剧烈的抖动，而且会发出较大的声音，为了解决这个问题，将电机的控制频率调整到 25kHz，这样人耳就听不到声音。

(2) 速度反馈

因为机器人的腿部需要进行周期性的摆动，所以速度测量和位置测量是必不可少的。利用光电码盘进行电机的测速和形成测量，其原理是测量脉冲数量，该机器人上采用的具体方法是扫描相应的 IO 口，检测电平的变化情况就可以得到电机的形成值和速度值。

5.4 控制系统设计

5.4.1 陆上运动控制

(1) 控制原理

在陆地上时，机器人在一个二维平面内进行运动，这时只要控制机器人的腿臂的摆动和前轮的转向即可。基本的控制原理是根据遥控器油门的值调整腿臂摆动的频率和幅度，根据遥控器转向通道的值调整前轮的转动角度。

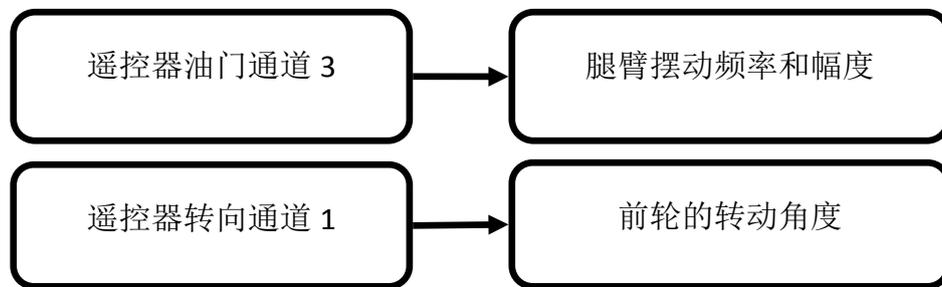


图 5.9 控制通道值与执行机构对应关系示意图

(2) 电机控制策略

根据机器人运动的特点，电机需要进行周期性的来回摆动，控制机器人腿臂摆动角度在 60 度之内。通过大量的实验，我发现机器人的腿臂向外侧运动时要快一些，向内运动要慢一些，这样会让机器人前进的速度更快。同时，为了保证机器人腿臂换向时更加柔和，避免冲击，需要进行边缘处理，在换向之前进行一定程度的减速。具体流程如图 5.10。

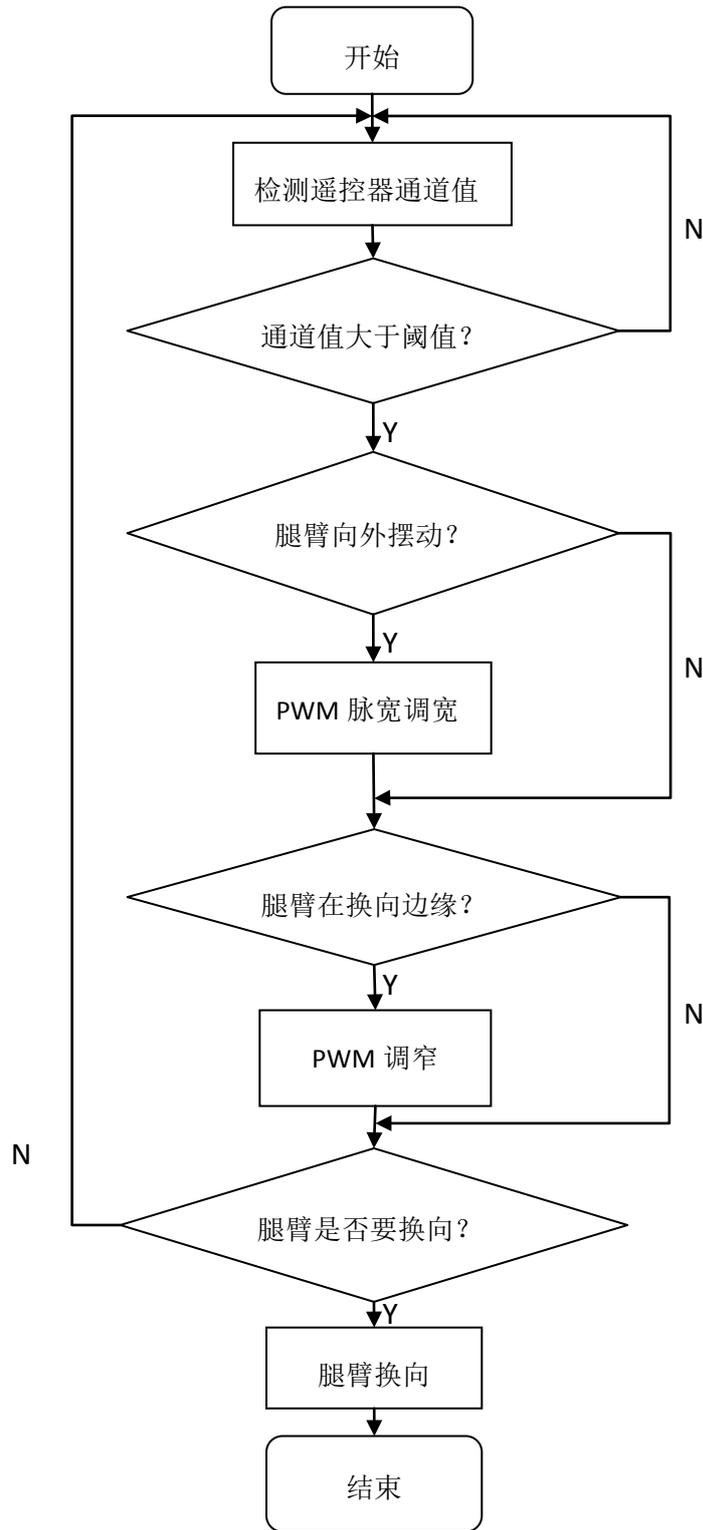


图 5.10 陆上控制流程图

5.4.2 水中运动控制原理

在水中运动时，不同于地面的二维运动，机器人可以看作是在一个三维平面内进行运动。

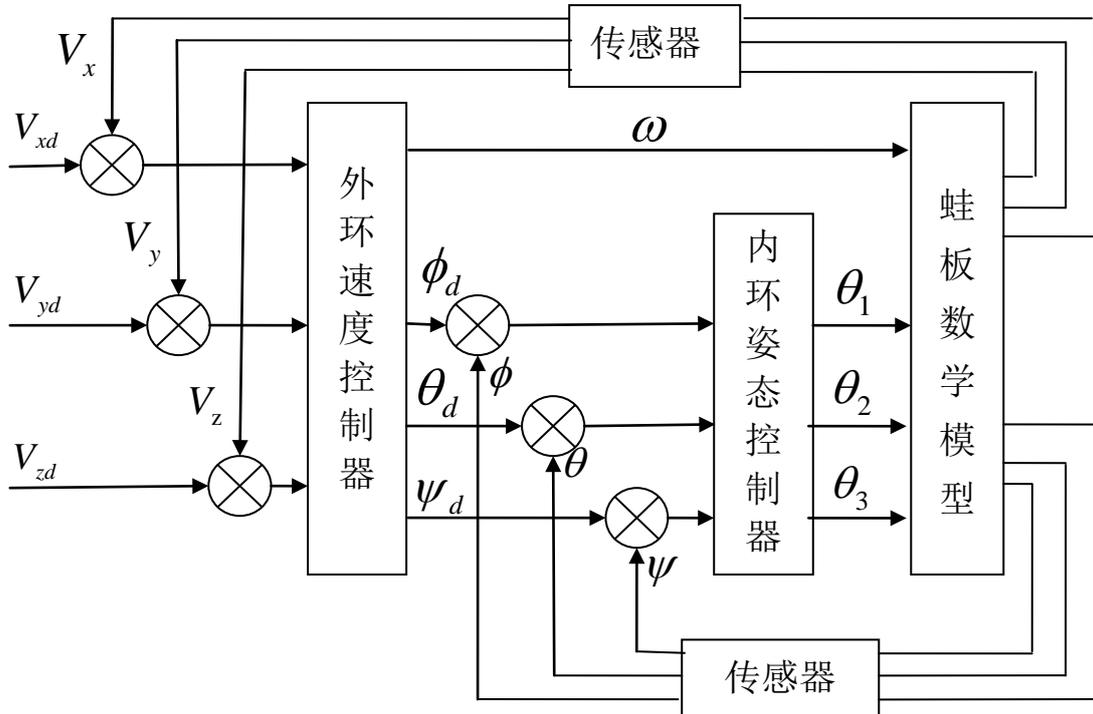


图 5.11 蛙板机器人水中运动控制整体框图

水下的机器人运动的控制框图如图所示。整体上是一个双闭环的结构，内环为机器人的水下姿态控制器，通过惯性器件检测机器人的姿态，并对实时的姿态进行控制，其中 ϕ 、 θ 、 ψ 分别为机器人在水中的俯仰角，滚转角和偏航角。 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别为机器人前舵和两个胸鳍的控制量。外环为机器人的速度控制器，其中三个速度由用户的遥控器直接给定， ω 为腿臂摆动的角速度。通过这样一个双闭环的运动控制原理实现机器人的水下运动控制。

对于机器人在水下的推进，还采用仿生的推进原理，机器人模仿青蛙游泳的方式，青蛙游泳时，收腿速度慢，可以减小受到的阻力；蹬腿速度快，获得最大的推力，以此来实现整体的运动。该机器人也采用这个原理，两腿向外摆动时速度较慢，以此减小受到的阻力，腿臂向内摆动时速度较快，获得最大的推力。通过这种方式实现整体的推进。

5.5 主程序流程图

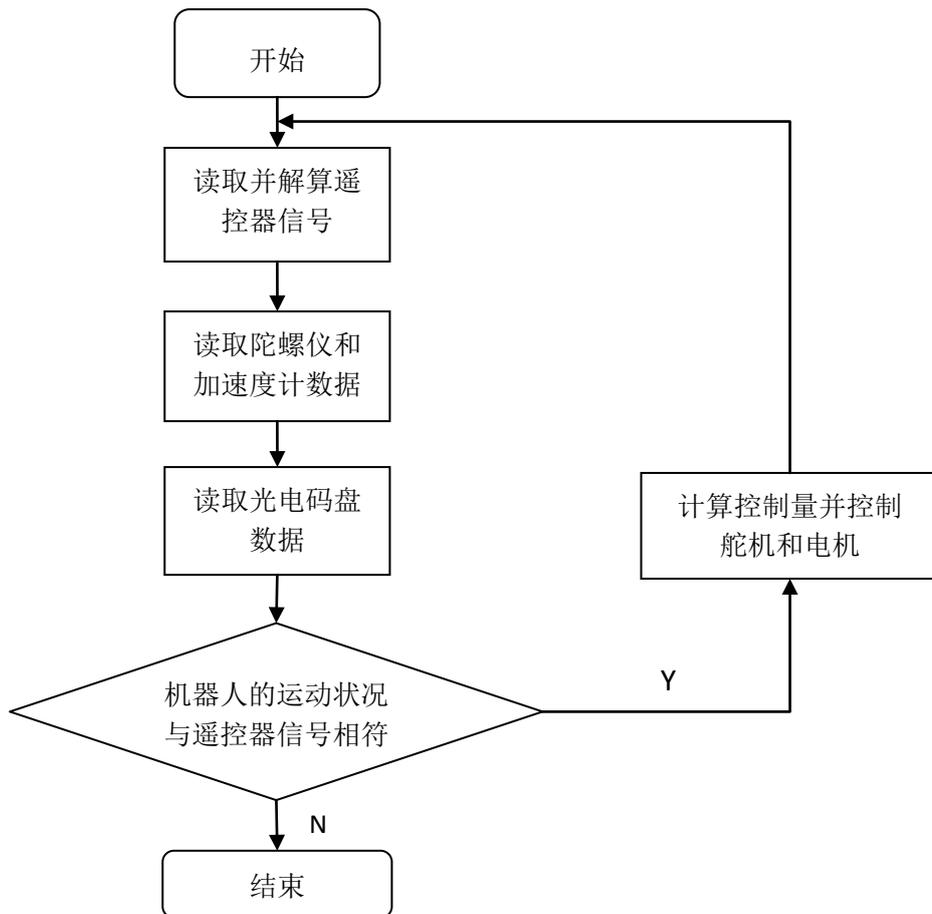


图 5.12 机器人控制主程序流程图

主程序流程图如图所示，控制器读取并解算遥控器信号、惯性单元信号以及光电码盘的数据，通过比较实际输出和给定之间的误差来进行控制，利用控制器控制电机和舵机，最后实现机器人整体的运动控制。

5.6 上位机模块设计

上位机主要分为三个模块：实时图像传输、下位机姿态的 3D 显示与下位机参数的显示。

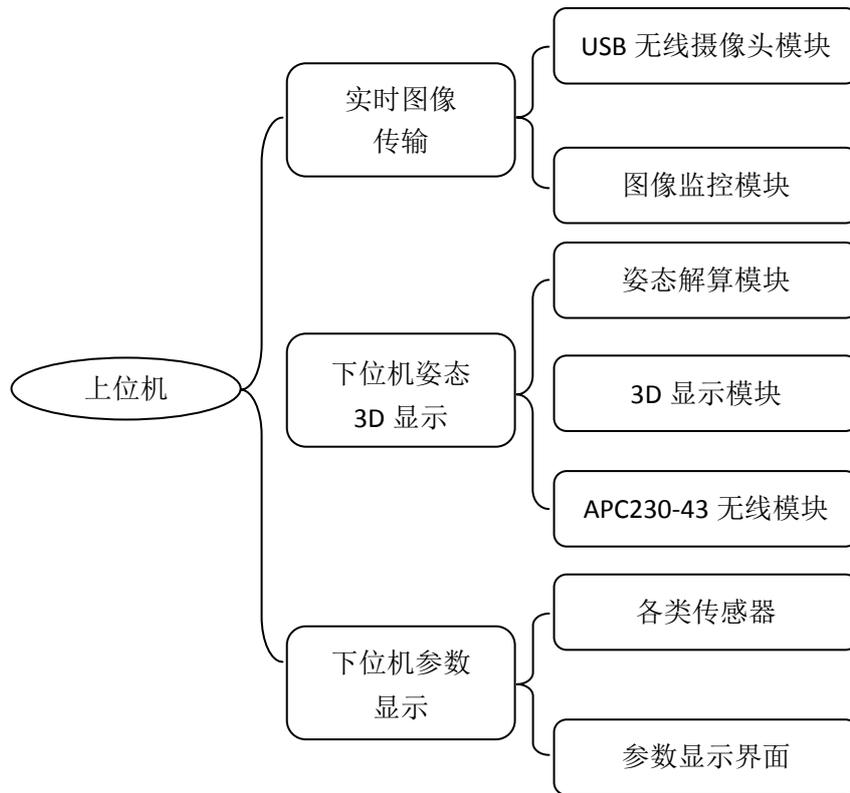


图 5.13 上位机模块设计框图

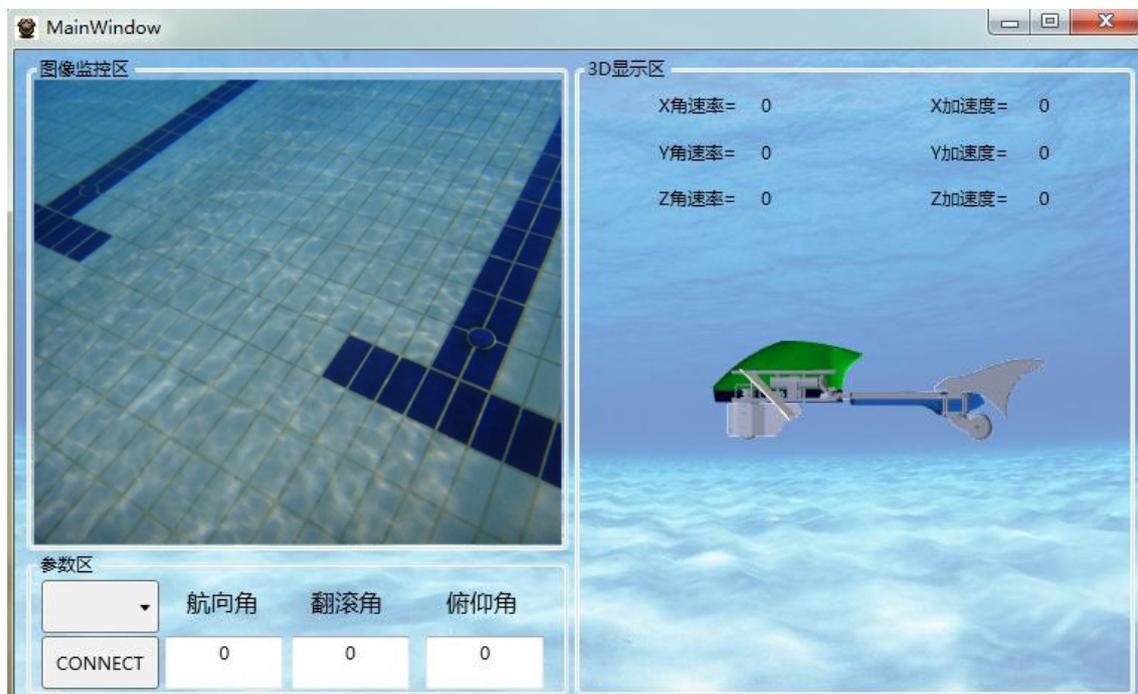


图 5.14 上位机软件界面

5.6.1 实时图像传输

实时图像传输由一个 USB 无线摄像头模块与上位机监控界面组成。

USB 无线摄像头内置可充电电源，将之固定于蛙板机器人前方，采用 2.4GHz 实时传输图像信息。上位机端通过一个 USB 接口的接收器接收传回的图像信息，通过上位机编程后在监控界面显示出来。由此可对蛙板机器人水下的工作环境进行实时观察。



图 5.15 图像监控区界面

5.6.2 下位机姿态 3D 显示

下位机姿态的 3D 显示由 APC230-43 无线模块、下位机姿态解算模块与 3D 显示界面组成。

姿态解算模块将下位机姿态解算出后，通过 APC230-43 将数据无线发送回上位机端，与上位机相连接的 APC230-43 模块接收端将数据进行校验接收，并转换为串口数据最终传送至上位机。上位机接收到姿态信息后再次进行解算，得到航向角、翻滚角与俯仰角的结果，以此驱动显示界面的 3D 模型进行三维空间上的观察。

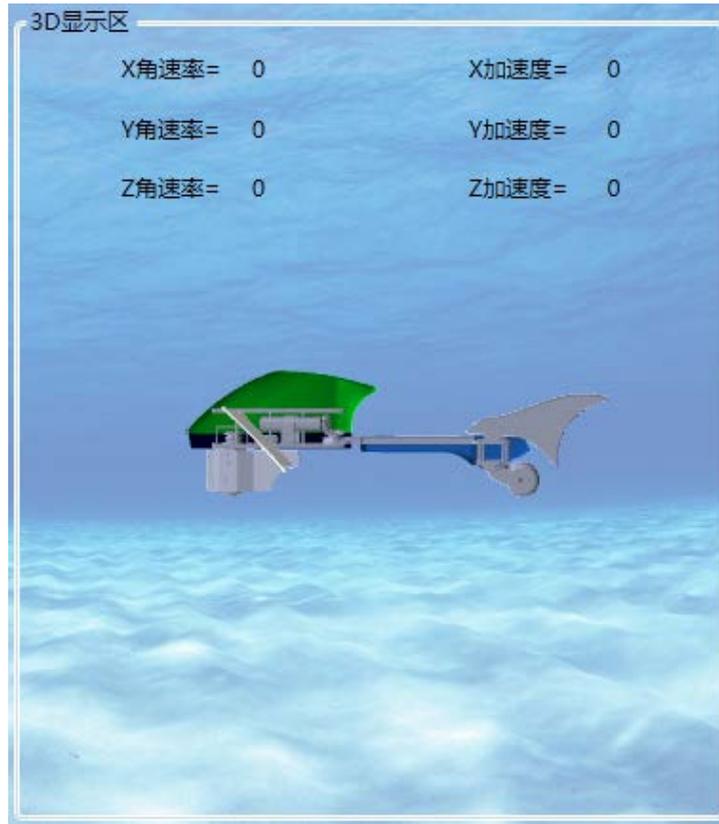


图 5.16 蛙板机器人三维姿态监控

5.6.3 下位机参数显示

下位机参数的显示由 APC230-43 无线模块与各类传感器模块组成，如图 5.17。

各传感器将所测得的数据统一传输至单片机，由单片机进行打包并经由 APC230-43 无线传输至上位机，上位机通过校验接收后将各个数值一部分在“参数显示区”，另一部分在“3D 显示区”显示，以便对蛙板机器人的状态进行监控。参数 2 主要包括下位机的“航向角”、“翻滚角”、“俯仰角”及三个轴向的加速度与角速率。

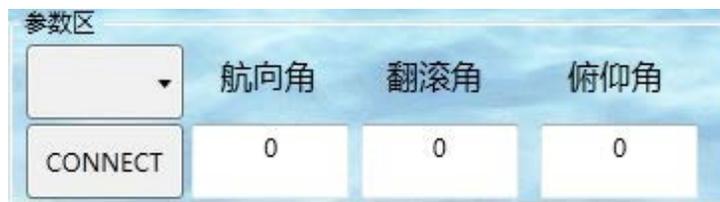


图 5.17 姿态数据显示



图 5.18 三个轴向的加速度与角速率显示

软件的设计主要为上位机与下位机两部分。下位机的程序编写主要包括遥控器信号的处理、舵机的控制、电机的控制与反馈、姿态信息的采集与处理，通过各部分的配合完成整体功能的基本实现。上位机通过与下位机的无线通信，保持对下位机状态的实时检测，一方面对蛙板机器人所处的环境进行监察；另一方面可配合下位机应对突发状况，保持整体的稳定。

第六章 仿真与测试

本章在介绍完系统的软硬件设计的基础上给出了机器人的仿真和实物实验的结果，验证了前文中论述的各部分设计的可行性和科学性，并分析了目前的缺陷和不足。

6.1 陆地运动实验

6.1.1 舵机控制实验

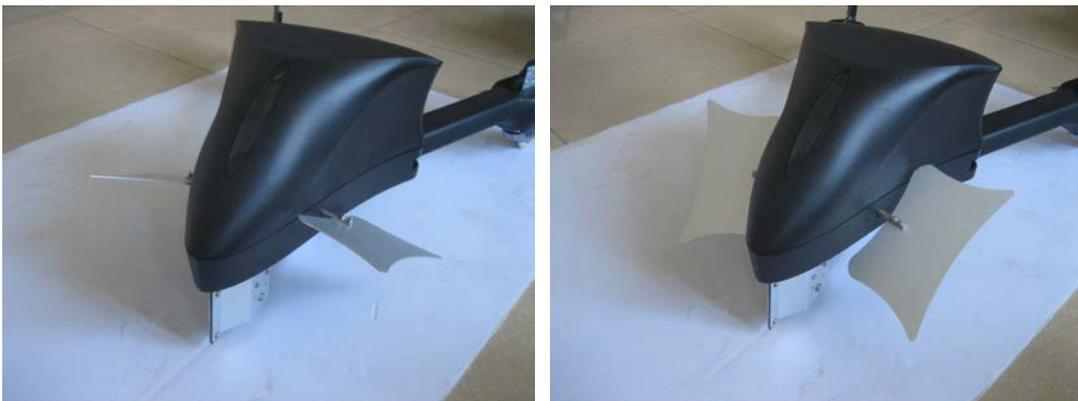


(a) 前舵左偏

(b) 前舵右偏

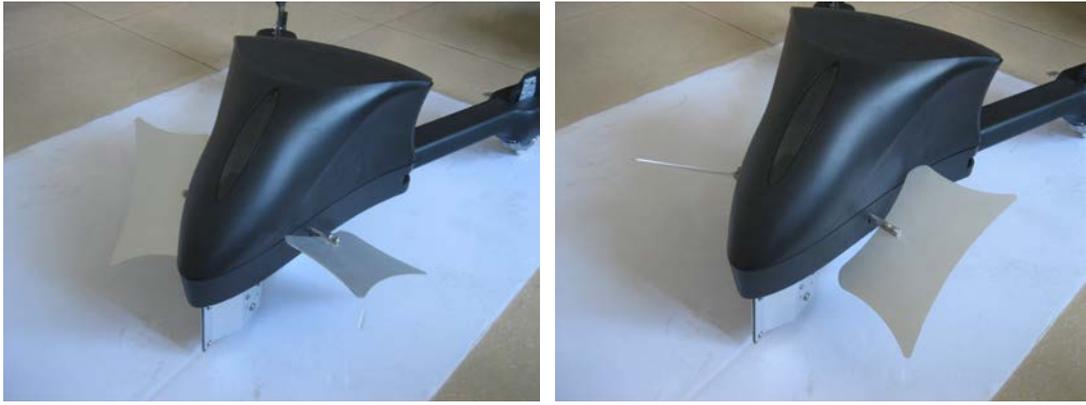
图 6.1 前舵控制实验图

前舵控制实验如图 6.1 所示。通过遥控器的通道 1 对其的转向进行控制，图中分别给出了左右转向的情况。



(a) 俯仰运动（仰）

(b) 俯仰运动（俯）



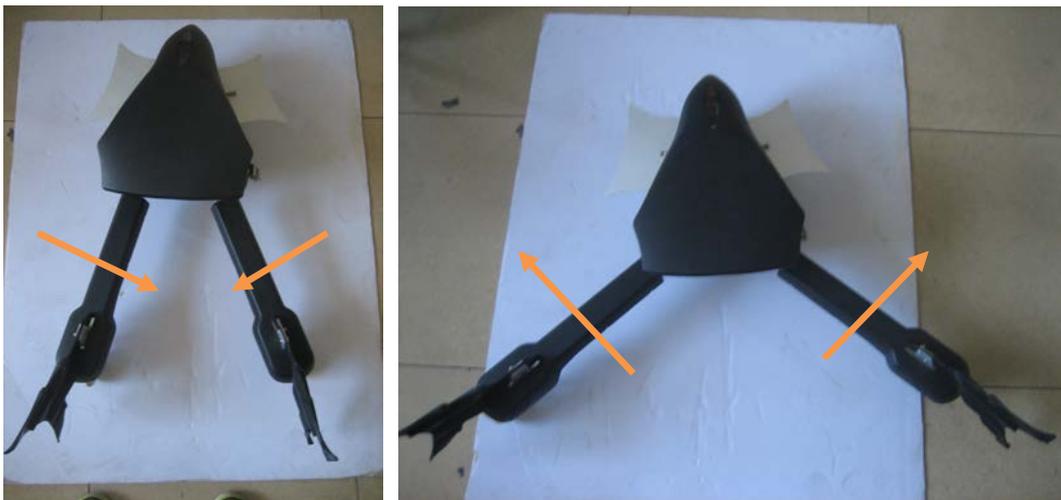
(c) 滚转运动（右滚转）

(d) 滚转运动（左滚转）

图 6.2 胸鳍控制实验图

胸鳍的控制主要用于机器人水下姿态的控制，机器人在水下的俯仰和滚转控制都是通过胸鳍来实现的。图中给出了胸鳍控制的四种情况。

6.1.2 电机控制实验



(a) 腿向内侧运动

(b) 腿向外侧运动

图 6.3 腿部控制实验图

机器人通过腿臂的摆动实现整体的推进，图 6.3 中给出了机器人腿臂摆动过程的实验，实验表明，这种方式可以实现机器人的推进。

6.1.3 整体运动实验

利用遥控器对机器人的运动状态进行实时的控制，图 6.4 中展示的是机器人向右转动的过程。实验表明，舵机和电机共同工作时，机器人也可以良好工作，

陆上功能实现。红色线条表示机器人形式的路径。

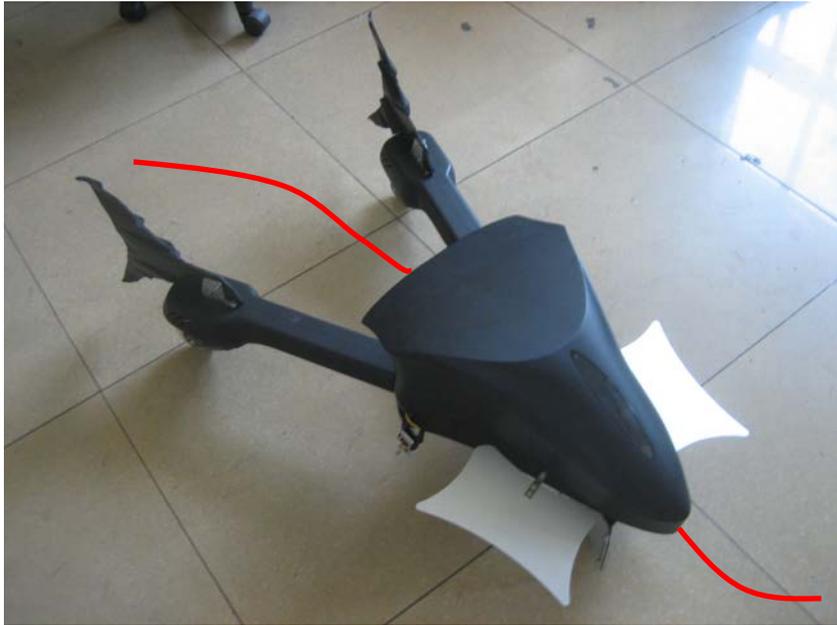


图 6.4 运动实验图

6.2 水下仿真实验

6.2.1 水下浮力仿真

仿真软件：Solidworks

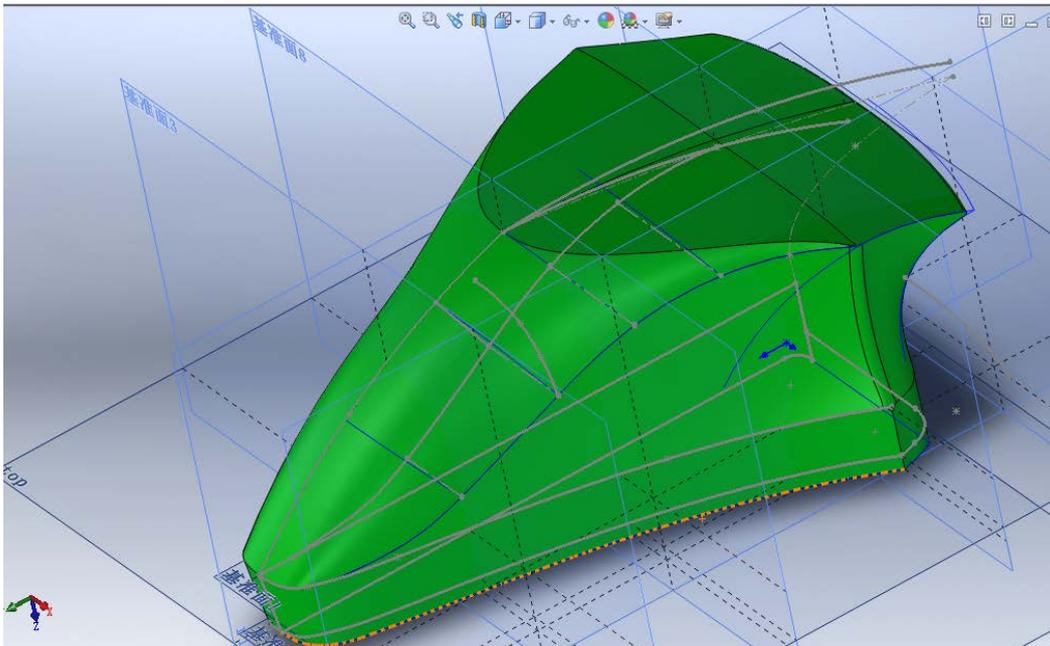


图 6.5 浮力仿真计算模型图

计算结果：机器人的外壳提供浮力为 12kg。实测机器人重量为 10kg，因此浮力满足整体设计需要。

6.2.2 水下阻力仿真

仿真软件：fluent

仿真条件：

流体速度 10m/s；

流体密度 1000kg/m³；

模型运动速度 1m/s。

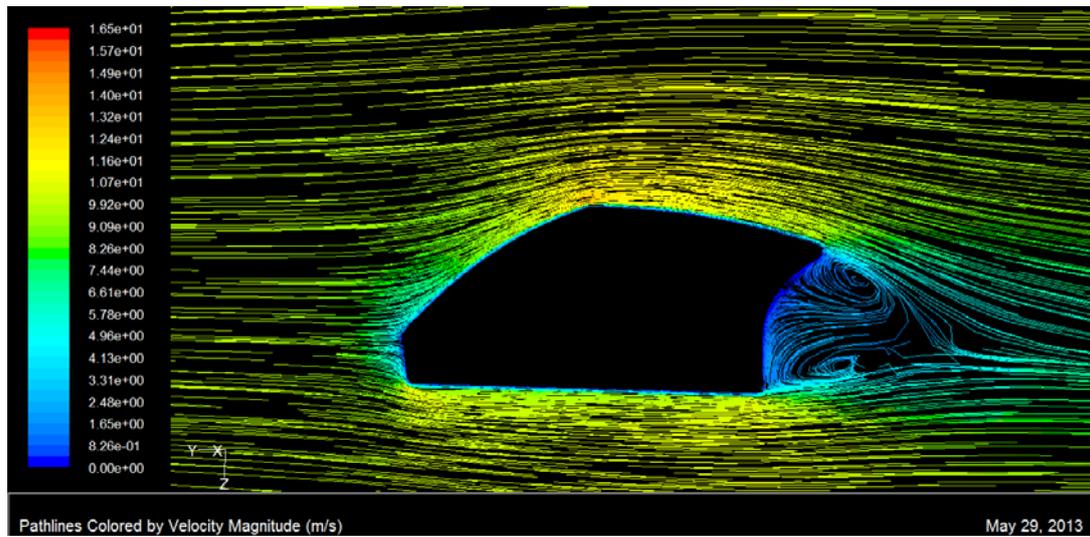


图 6.6 流体实验流线图

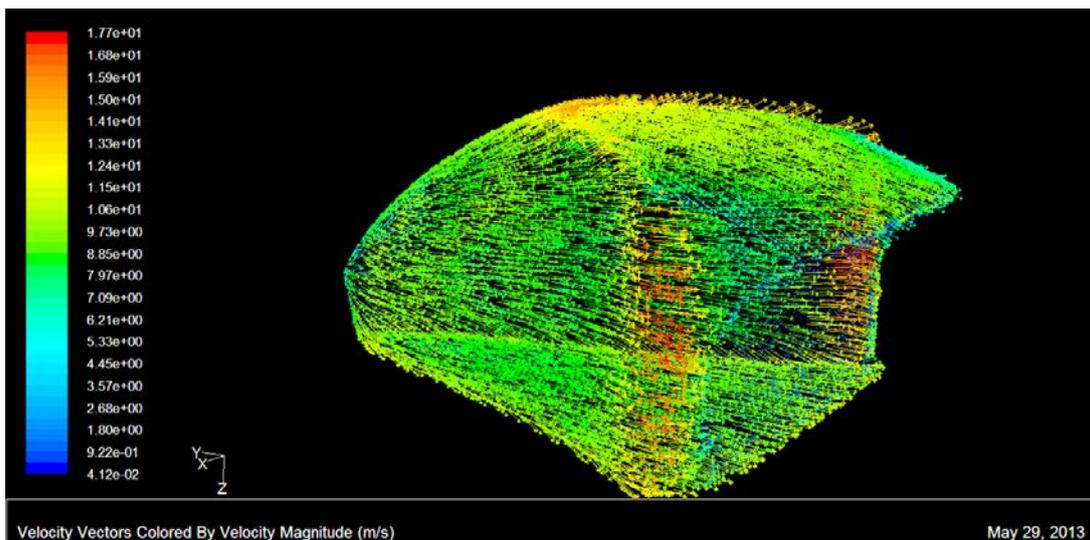


图 6.7 流体速度矢量图

仿真结果:

模型迎风面积 0.057133 平方米;

阻力系数: 0.54;

阻力: 15.4N。

由仿真过程和结果可以看出,利用该模型在水下运动比较适合低速运动,在 2m/s 以下速度运动时,可以实现良好的运动。但是在仿真中可以看出,机器人头部的末端存在涡流,这会给机器人的运动带来一定的阻力,这个地方是可以优化的。

6.3 水下运动实验

整个机器人使用了两层密封的方式,外层的密封由外壳完成,配合一些必要的密封件实现机器人整体的密封,为了保护机器人内部的电路,还在电路外壳包裹有防水层,作为第二层密封。密封工作完成后,进行了水下的实验,实验环境是 1*1.5m 和 5*10m 尺寸的两种水池。对密封性能、胸鳍、前舵、腿部及控制算法进行了测试,机器人在水中的游动效果较好,可以很好的完成它的水中运动。图 6.8 是机器人在 5*10m 的水池中实验。

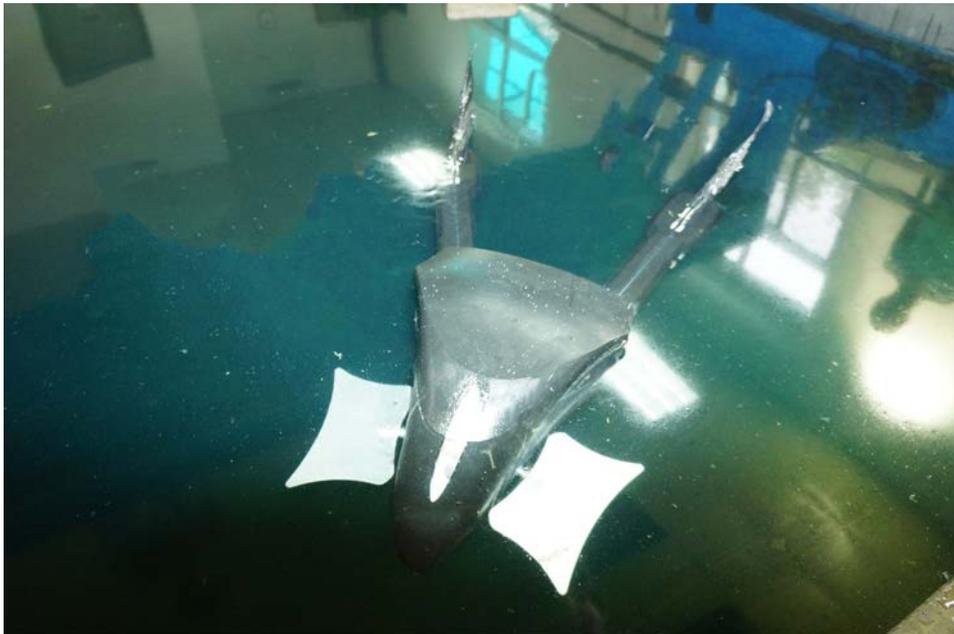


图 6.8 机器人水下实验

6.4 主要技术指标

在整个机器人的制作过程中,还进行了很多其他方面的计算、仿真和实验,在此并不赘述,给出实际的技术指标如下表所示。

表 6.1 主要技术指标

机器人长度	1.1m	
功耗	120W	
遥控距离	2km	
摄像头拍摄距离	100m	
摄像头视角	62 度	
转弯半径	陆上	1.5m
	水中	2m
最大行驶速度	3m/s	
游动速度	2m/s	
转弯速率	30 度/s	
下潜深度	10m	
续航能力	1h	
水下阻力	15.4N	

第七章 总结和展望

基于上文介绍的两栖蛙板机器人系统的功能和软硬件设计，本章对两栖蛙板机器人的应用前景进行了展望，对机器人的创新点和技术要点进行了总结。

7.1 创新点

该两栖蛙板机器人因其独特的原理设计，科学的软硬件设计，主要有以下几个创新点。

1、本文设计了一种具有新型运动形式的两栖蛙板机器人，该种运动形式利用双摆臂机构实现，在陆上配合反偏向轮实现推进，在水中结合尾鳍提供推力。机器人在水陆两栖都通过摆臂实现推进，实现水陆两栖运动形式统一，解决了目前两栖机器人需要更换执行机构才能进行水陆环境切换的现状；

2、该种运动形式可根据空间大小改变腿臂摆动的幅度，适合在复杂环境作业；

3、两栖蛙板机器人通过传感器检测机器人姿态，控制算法解算并控制相应的执行机构，实现机器人水中三维姿态的控制

7.2 技术要点

1、机器人机械结构的设计，主要包括机器人水陆驱动原理、水陆方向控制机构设计、水下姿态控制机构设计、执行机构的布局、软件建模仿真、软件制图、工厂加工调试，再配合上必要的密封设计，使得机器人可以做出良好的运动，并保证良好的整体密闭性；

2、机器人在陆地运动时，腿臂运动与前轮转向的协调，并通过摆动幅度和频率来调速，结合遥控器控制信号的解算，通过控制算法来控制陆上的运动，实现机器人柔和、可控的推进；

3、机器人在水中运动时，通过传感器检测机器人的姿态，并通过算法解算和控制，利用执行机构控制机器人在水下三维空间运动。

7.3 作品的科学性及其先进性

1、本作品的先进性体现在运动形式的创新性上，机器人可以通过双摆臂的运动形式实现水陆两栖统一的运动，且这种运动形式可以适应环境空间的变化，可在复杂的环境下工作，两个腿臂的驱动使得运动较为灵活。

2、本作品的科学性体现在机器人的整体设计、调试和实验的过程中。机器人机械结构紧凑，运动灵巧，电路工作稳定，控制鲁棒性强，具有较强的运动能力和环境适应能力。机器人通过大量的软件仿真，实体实验和多次改进形成了最后的软硬件，保证机器人良好的性能。

7.4 推广前景

1、可在造船厂的船台入水处检测水底环境，保证船只入水时尾跌安全；造船厂造好船只后将船体沿船台滑下，船台是一个倾角较小的斜面，可保证船体缓慢下滑。当船舶滑动到离开船台进入船台前的水域时，失去了船台斜坡平面承托的船舶在重力和加速度作用下，其最后入水部分会产生尾跌现象，如图 7.1 所示。

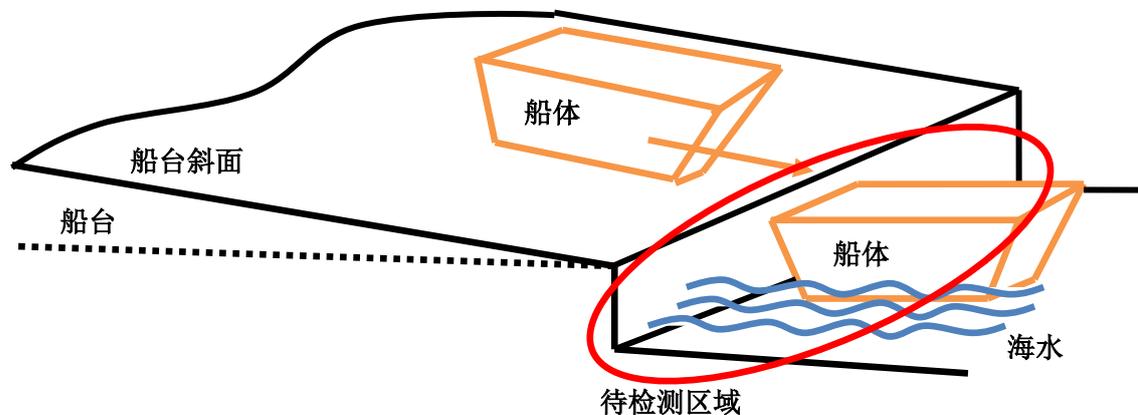


图 7.1 船舶入水示意图

图 7.1 中红色框里的地方是船体容易产生尾跌的地方，若这里存在坚硬杂物，会对船体产生较大损伤，每次船舶下水都要人工下水检测，如果利用蛙板机器人代替人的工作，可以节约人力，且更加高效。

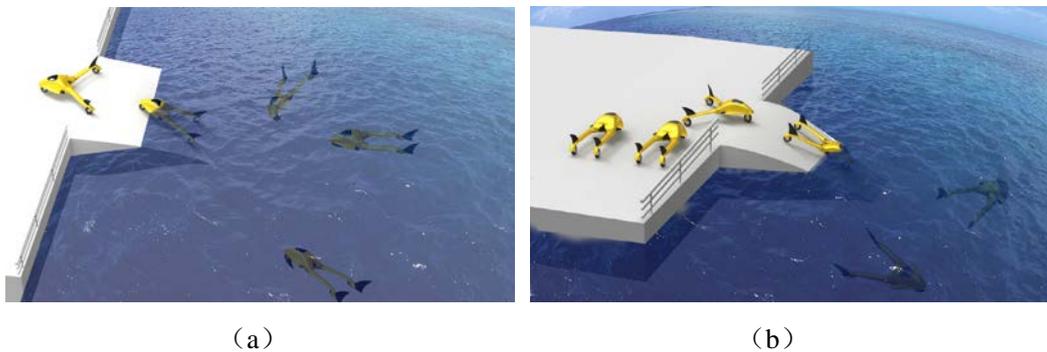
2、两栖蛙板机器具有两栖的运动能力，可以作为“蛙人”部队的智能助手，帮助“蛙人”在水下执行任务时完成人难以完成或者较危险的工作，共同完成相

应水下任务。



图 7.2 机器人辅助“蛙人”效果图

3、两栖蛙板机器人可以实现水陆两栖运动的统一，并可在一定范围内实现机器人的水陆自主运动。可在一些海岛上搭建一些登陆平台，便于机器人的入水和登陆，利用机器人对海岛进行监控，节省了人力。



(a) 登陆效果图 (b) 入水效果图

图 7.3 机器人海岛作业效果图

4、可作为高校使用的教学实验平台，可以为电子类、控制类及计算机类的专业做通识教育、力学分析、控制策略设计、软件设计方面的教学实验。

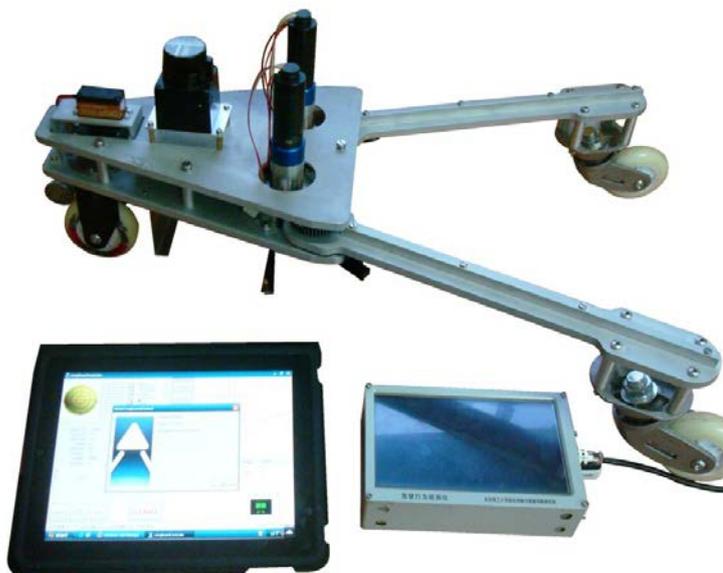


图 7.4 机器人教学实验平台实物图

综上所述，因为机器人运动的创新性，整体设计的科学性，机器人可在多个应用领域使用，拥有非常广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 杨青海,喻俊志,谭民,王硕.两栖仿生机器人研究综述[J].机器人,2007,29(5): 601-608.
- [2] 许宏岩,付宜利,王树国,刘建国.仿生机器人的研究[J].机器人,2004,26(3): 283-288.
- [3] Gregory Dudek, Philippe Giguere, Chris Prahacs and Saunderson."AQUA: An Amphibious Autonomous Robot". Computer. 2007,40(1):46-53.
- [4] 张德欣,安伟光,张永顺.微机器鱼尾鳍形状的结构优化[J].哈尔滨工程大学学,2008,29(9).
- [5] 刘延柱,苗英恺.活力板运动的动力学分析[D].上海: 上海交通大学,2008.
- [6] 苗英恺.游龙板运动的力学分析[D].濮阳: 濮阳职业技术学院实训中心, 2009.
- [7] 陈裴.三维柔性尾鳍/胸鳍的推进性能研究[D].镇江: 江苏科技大学, 2008.
- [8] 梁建宏,王田苗,魏洪兴.水下仿生机器鱼的研究进展II-鱼类推进机理[J].机器人,2002,24(3).
- [9] 谢俊超.襟翼舵设计计算及水动力性能仿真研究[D].武汉: 武汉理工大学,2011.
- [10] 董涛.潜器仿鱼尾推进系统的水动力分析[D].哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.
- [11] 李麓,李维嘉.潜艇水下六自由度运动仿真数学模型计算机仿真[J].计算机仿真,2001,18(5).
- [12] 陈维山,夏丹,刘军考,石胜君.尾鳍运动行为对仿鱼机器人稳态游动性能的影响[J].机械工程学报,2011,47(3).
- [13] 李磊,叶涛,谭民,陈细军.移动机器人技术研究现状与未来[J].机器人,2002, 24(5).

附件清单

附件 1 知识产权局专利检索结果截图

附件 2 专家推荐信 1

附件 3 专家推荐信 2

附件 4 科技查新报告

附件 5 广东海事重工股份有限公司应用证明

附件 6 中船重工集团昆明七〇五所科技发展总公司应用证明