

doi: 10.7690/bgzdh.2018.03.011

## 水下探测四旋翼平台

王梅娟<sup>1</sup>, 刘叶东<sup>2</sup>, 符晓岚<sup>3</sup>

(1. 陆军工程大学指挥控制工程学院, 南京 210001; 2. 国防科技大学信息通信学院, 武汉 430010;  
3. 南京审计大学软件工程系, 南京 211815)

**摘要:** 以无人机原理为基础, 开发一套功能高度集成的水下四旋翼平台, 在保证探测能力的前提下尽量简化结构, 实现对水下四旋翼姿态的自动控制, 加载图形影像实时传输以辅助操作者对水下设备进行指令传输。实验结果表明: 该平台能长时间工作于水下, 减少人员执行相应操作的危险性, 在水下侦查、未知水域探测等领域具有一定的实践和创新意义。

**关键词:** 水下四旋翼; 探测; 水下平衡算法

**中图分类号:** TJ01 **文献标志码:** A

## Platforms of Underwater Quadrotor for Detecting

Wang Meijuan<sup>1</sup>, Liu Yedong<sup>2</sup>, Fu Xiaolan<sup>3</sup>

(1. College of Command Control Engineering, The Army Engineering University of PLA, Nanjing 210001, China;  
2. College of Information & Communication, National University of Defense Technology, Wuhan 430010, China;  
3. Department of Software Engineering, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China)

**Abstract:** Based on the principle of UAV, this paper design and realize underwater quadrotor with high function, which equipped with electronic gyroscope. Based on ensuring the detection accuracy, simplify structure and realize the automatic control of underwater quadrotor gesture, use image video real-time transmission to help operation carry out command transmission on underwater equipment. The test results show that the platform can be used in underwater work condition for a longtime and reduce danger for operator operations. It has some practical and innovative significance in underwater investigation and unknown waters detection.

**Keywords:** underwater quadrotor; detection; underwater balance algorithm

### 0 引言

全球水下资源丰富, 是各国发展的重要目标。各类水下机器人在技术发达国家不断涌现: 在探寻马航客机残骸中, 澳大利亚“蓝鳍-21”与美国“金枪鱼”发挥了重要作用; 2016年12月我国捕获的美国无人潜航器(UUV)等。无人设备越来越多地应用在未知环境的各种应用领域中。

目前市面上已有不少款型的水下机器人及探测器<sup>[1]</sup>, 机械及控制结构比较固定, 但价格昂贵、运载能力不足, 并且无法实现更多的功能扩展, 难以按照实际需要进行灵活改造。考虑到水下机器人近年来虽然发展迅速, 但相比无人机的发展水平及市场还落后许多, 笔者对基于四旋翼原理的水下探测机器人进行设计, 可长时间工作于水下, 用于水路事故中的水下侦查, 或进行未知水域探测, 以减少人员执行相应操作的危险性, 保障人员安全<sup>[2]</sup>。

### 1 水下探测四旋翼平台总体介绍

除了保持四旋翼的基本结构和工作原理外, 水

下四旋翼平台还应实现行进、沉浮和通信等基本水中机器人功能<sup>[3]</sup>。总体结构分为动力、供电、控制和通信4个系统模块, 如图1所示。

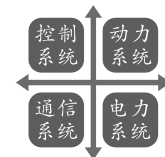


图1 水下四旋翼系统基本功能模块

- 1) 动力系统<sup>[4]</sup>在单片机的控制下, 实现水下四旋翼的前进、后退、转弯和沉浮等行动功能。
- 2) 供电系统提供水下四旋翼动力能源, 兼顾容量、体积和质量等多方面因素。
- 3) 控制系统由2部分组成: ① 通过接收机完成对水下四旋翼推进器的控制; ② 对电子陀螺仪(JY901)的数据进行处理, 稳定水下机器人的姿态, 保证机器人的姿态稳定。
- 4) 通信系统也由2部分组成: 信息采集和指令传递。摄像头获得的视频信息与单片机处理后的姿态信息交付控制系统处理; 同时, 地面控制端的显

收稿日期: 2017-11-25; 修回日期: 2017-12-22

作者简介: 王梅娟(1984—), 女, 安徽人, 硕士, 讲师, 从事水下机器人、数据信息安全研究。

示屏将图传接到的视频信息与姿态信息<sup>[5]</sup>显示给操作者，操作者结合任务对机器人进行操作。

## 2 水下探测四旋翼平台设计

水下探测四旋翼框架的主体框架如图 2 所示。

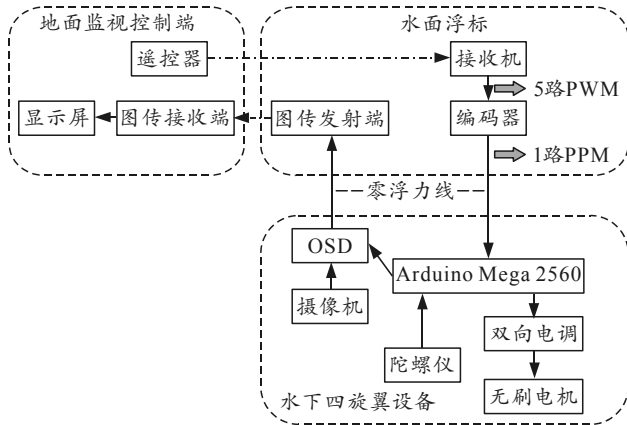


图 2 水下探测四旋翼框架设计

### 2.1 推进设计

推进器是水下机器人实现运转的重要组成部分，设计采用无刷电机搭配全浸浆在双向电调的控制下实现正反转，获得正反 2 个方向上的推力。采用无刷电机的优点是可以直接在水下工作，无需解决密封难题<sup>[6]</sup>。

每个推进器由单片机输出的每路 PWM 控制，4 个电调分别接收一路脉冲调制 (pulse width modulation, PWM) 波信号，驱动无刷电机，使 4 个推进器都可实现正反转，通过配合实现在 6 个方向上的自由运动。动力分布如图 3 所示。

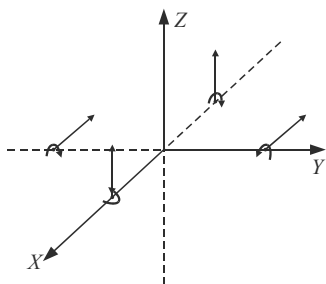


图 3 水下四旋翼推进器的动力分布

这样分布的 4 个推进器在结构上可直接实现机械上力矩的平衡。再进一步利用算法，进行差速平衡，实现水下四旋翼的平衡稳定。

### 2.2 线路设计

水下设备在运行中存在通信与防水 2 方面关键问题，线路设计也要考虑这 2 部分。

#### 1) 通信线路。

水下无线通信难度过高，而有线通信导致水下

探测器的活动空间受限。为平衡效益，笔者最终选定增设中转方案，增设水面浮标作为信号中继，即水上采用无线通信，水下采用有线传输。

#### 2) 电力线路。

水下设备、水面浮标和地面监视控制端分别采用独立的锂电池供电。

其中水下四旋翼设备制作简易线路板<sup>[7]</sup>集成推进器供电、控制板供电等。将整体线路安装于腹舱内，电子器件采用 AB 树脂胶进行灌封，在腹板上保留水下设备的调试接口、开关，以及充电接口，保证安全性以及可开发性。

### 2.3 程序设计

程序设计流程：串口 1 接收陀螺仪的信息，I/O 口接收脉位调制 (parts per million, PPM) 波，利用定时器解析 PPM 波，明确操作指令；在保证水下四旋翼姿态安全的前提下，生成 4 路 PWM 波，执行操作者的指令，控制推进器；姿态信息通过串口输送给视频字符叠加 (on-screen display, OSD)，将信息与视频信号叠加，通过图传送到地面监视器。程序在此不断循环，操作者根据监视器实现对水下四旋翼的实时控制，如图 4 所示。

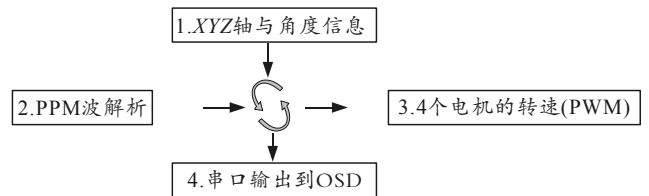


图 4 水下四旋翼程序控制设计

#### 1) 姿态平衡。

在单片机设置中断触发，检测单片机串口 1 接收的陀螺仪的  $\angle XOZ$ 、 $\angle YOZ$  2 个数据，当发现任一角度大于  $30^\circ$  时，执行中断服务函数：停止动力输出，利用自身平衡性恢复至姿态平稳。

#### 2) 解析接受机信号。

PWM 信号是数字的，电压或电流源是以一种通 (ON) 或断 (OFF) 的重复脉冲序列被加到模拟负载上去，通的时候即是直流供电被加到负载上的时候，断的时候即是供电被断开的时候。只要带宽足够，任何模拟值都可以使用 PWM 进行编码。

PPM 波由多路 PWM 波合成，PPM 波的第一道脉宽的上升沿为第一路 PWM 波的上升沿，PPM 波的第二道脉宽的上升沿为第一路 PWM 波的下降沿与第二路 PWM 波的上升沿，依次编码，原理如图 5 所示。

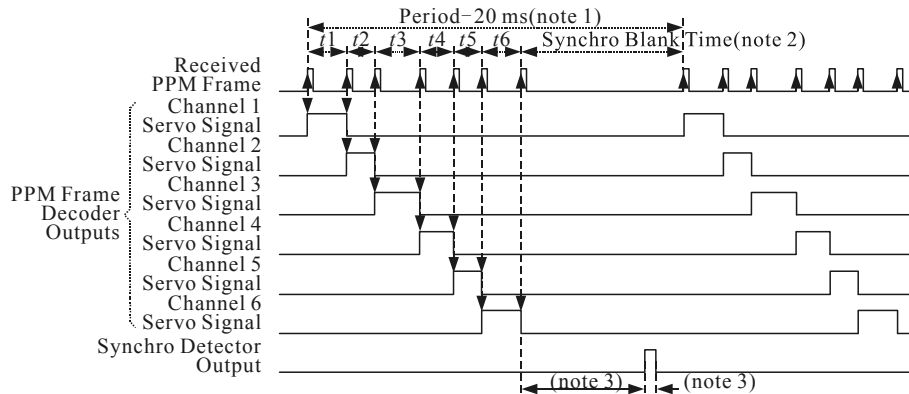


图 5 PPM 格式原理

将 PPM 信号接到数字 I/O 引脚，利用定时器，测量 2 个脉宽上升沿的时间差，单位为微秒，每 20 ms 为 1 个周期，结果会在 1 000~2 000 之间。这里只用到 4 路信号，分别控制上下、左右、前后，预留 1 路为可控制摄像头云台的方向。

3) 串口输出信息到 OSD。

在完成对姿态的解析后，将  $\angle XOZ$ 、 $\angle YOZ$  角度通过串口 2 发送到 OSD，与视频信息叠加，将叠加后的数据发射到地面控制端。

4) 动力信号输出。

PPM 波解析完成后，识别操作者动作指令，再输出 4 路相应的 PWM 波控制电机，驱动水下机器人执行动作，实现操作者意图。

### 3 水下探测四旋翼平台实现

#### 3.1 硬件组装实现

最终实现的水下探测四旋翼平台如图 6 所示。

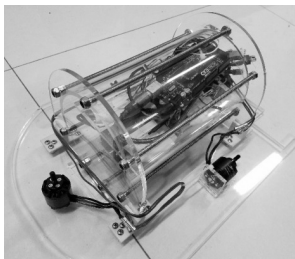


图 6 水下探测四旋翼实体

其中：

1) 机身采用亚克力材料制作，用 AutoCAD 及 SolidWorks 完成制图，并定制完成。机身的连接采用金刚胶粘连与螺杆固定，强度稳定，且结构简单，便于进行其他功能扩展。

2) 密封舱为 120 mm×190 mm×5 mm 的亚克力

管，采用 7 根螺杆环固，两端各有夹板，夹板与亚克力管间用胶垫做一层防水，树脂胶做二层防水，以确保内部电子器件的安全。

3) 控制板选用 Arduino Mega 2560 单片机，其拥有良好的开发平台，与多种传感器的兼容性稳定，Arduino Mega2560 是采用 USB 接口的核心电路板，具有 54 路数字输入输出，适合需要大量 I/O 接口的设计。处理器核心是 ATmega2560，同时具有 54 路数字输入/输出口(其中 16 路可作为 PWM 输出)，16 路模拟输入，4 路 UART 接口，1 个 16 MHz 晶体振荡器，1 个 USB 口，1 个电源插座，1 个 ICSP header 和 1 个复位按钮。

4) 推进器采用飓风电机 U2216 Kv900 搭配直径 5.5 cm 的四叶全浸桨制做，在双向电调的调制下，每个推进器实现的是双向推力。无刷电机具有良好的水下工作能力，只需将导线做好入舱的密封处理，即可保证安全运转。

5) 电子陀螺仪型号为 JY901，载有三轴加速度计、三轴角速度计、三轴角度计、三轴磁力计与气压计，并集成 32 位高性能 MCU 进行数据滤波，直接输出稳定的数据，便于下位机的程序简化。

6) OSD(视频字符叠加)采用 Mini F3，为完全开源的产品，开发方便且兼容性好，下位机负责将处理完成的水下机器人的姿态信息通过串口传输给 OSD，与视频信息整合后，发送给图传，得以在地面端鹰眼锐视显示器(5.8 GHz)显示视频信息与姿态信息。

#### 3.2 程序控制实现

1) 开发环境。

水下探测四旋翼程序开发环境配置如表 1。

表 1 水下探测四旋翼程序开发环境配置

开发系统	硬件配置	IDE	开发语言
64 位 Windows 7	4 G 内存、15 处理器、1T 硬盘	Arduino1.8.0	C 语言

## 2) 算法实现。

理解操作者意图，输出信号控制推进器来完成动作是程序实现重要的功能之一。PPM波解析完成后，输出4路相应的PWM波控制电机，驱动水下机器人执行动作，实现操作者意图，是重要的算法实现过程。部分具体代码如图7所示。

```

test_5_18 | Arduino 1.8.3
文件 编辑 项目 工具 帮助

test_5_18

int ppm=8;
int opwm_up_down=5;
int opwm_right_left=6;
int opwm_front_behind=7;
int pwm_up_down;
int pwm_right_left;
int pwm_front_behind;
void setup() {
  Serial.begin(9600); //初始化串口
  pinMode (ppm, INPUT);
  pinMode (opwm_up_down, OUTPUT);
  pinMode (opwm_right_left, OUTPUT);
  pinMode (opwm_front_behind, OUTPUT);
  attachInterrupt(0, balance, HIGH);
}
//延时函数，用于模拟生成PWM波
int delay_ms();
//获取电子陀螺仪角度，并生成角度值给操作者
void judge_angle();
//将ppm波解析为pwm波，获得遥控器对应的3路pwm脉宽值
void ppm_to_pwm();
//根据操作者意图，生成4路pwm波驱动推进器，完成相应动作
void opwm(int up_down, int right_down, int front_behind);
void loop() {
  judge_angle();
  ppm_to_pwm();
  opwm(pwm_up_down, pwm_right_down, pwm_front_behind);
}
void balance()
{
  opwm(1500, 1500, 1500);
  delay_ms(1000);
}
保存完成。

```

图7 控制器处理算法实现

## 3.3 使用与维护

### 1) 使用。

① 将开关打开，指示灯亮表明供电正常，接着检查各稳压模块的电压读数是否均在工作电压，若各电压均正常，操纵摄像头看其是否能正常工作。

② 检查图像系统是否能正常工作，看显示器接受图像是否正常。

③ 用手将探测器托起，操作控制手柄，检测动力系统是否正常。各项检查均正常后，可将探测器

放入水中，开始工作。

具体操作过程由控制手柄上的摇杆和按钮完成，通过摇杆的上下左右摇动，控制探测器执行上浮、下潜、前进、后退、左转和右转。

### 2) 维护。

笔者设计的水下探测四旋翼结构简单、性能完善、维护简单。动力叶片、防水和通信系统是日常维护的重点。一般来说，要求在探测器工作时，确保动力叶片附近无异物，避免损坏叶片；工作时，严格按照操作流程，确保各部分稳定工作后再下水；工作结束，置于干燥处晾干。

## 4 结束语

笔者以水下探测为目标，自主开发了一套功能高度集成的水下四旋翼平台，设计并加工制作了探测器的整体框架，配备了较灵活的动力系统和实时影像传输系统，独立完成编写了探测器的电机、Arduino Mage 2560 微控制器的驱动程序，可以远程控制使探测器水下灵活运动的同时，进行深水域情况观察与影像实时同步。

该水下探测四旋翼平台成本低，可移植性和扩展性强，可附加运用于军事、科研和海洋开发等方面。下一步的工作将加强水下机器人运动控制方面的理论研究，展开动力系统的性能优化及多传感器的深入运用，以实现更加智能、改进线缆布局扩展有效距离和深度，适应更加复杂环境的水下四旋翼。

## 参考文献：

- [1] 徐玉如, 苏玉民. 关于发展智能水下机器人技术的思考[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(4): 17-21.
- [2] 孙海文, 欧阳中辉, 王彦. 一种改进的GPS周跳探测与修复方法[J]. 兵工自动化, 2016, 35(1): 52-54.
- [3] 程晨. Arduino 开发实战指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 10-32.
- [4] 甘永, 王丽荣, 刘建成, 等. 水下机器人嵌入式基础运动控制系统[J]. 机器人, 2004, 26(3): 246-249.
- [5] 夏细明, 陈巍, 吴志飞. 水下机器人电路防水舱: CN105446384A[P]. 2016.
- [6] 夏丽昆, 莫启元, 田冕. 实战化要求下国产新型红外探测器质量现状[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 25-27.
- [7] 刘春阳, 徐军领, 程洪涛, 等. MPU9250 传感器的姿态检测与数据融合[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 14-17.