

折叠式四轴的一体式潜水勘探器

——2019 年国家级大学生创新创业项目、发明专利、2019 年 ICAN 省级三等奖

林德旸

18 级自动化创新班

3118001018

L^AT_EX

更新：2020 年 1 月 1 日

摘 要

本文总结了创作背景和目标，以及对整合折叠式四轴的一体式潜水勘探器的详细介绍。勘探器上搭载着 4 个无刷电机与 3 个水下推进器，拥有“空潜两用”的能力，使用者可通过遥控器进行形态切换。飞行模式下，勘探器最大可具有 4kg 的最大载重量与 15km 超远距离图像传输；潜水模式时，勘探器最大下潜深度为 10 米，最大正向推力 4kg，反向推力 3.6kg。由于篇幅有限，在此仅着重介绍个人负责的水下动力分析部分，其涉及基础机械原理、自动控制原理与机器人学的相关知识。其详细的设计方案已经上传至 Github，如果您想了解更多关于此项项目，请访问：<https://github.com/ldylab>，在 Repositories 下获取所有项目个人的文件，再次感谢！

关键词：空潜两用，形态切换，大载重量，远距离图传

1 项目背景

出于好奇心与对未知的追求之心，自古以来，人类从未放弃过去用脚步丈量地球、探索地球上的每一个未知领域。如今进入信息化的 21 世纪，人类更是通过各种工具来帮助自己探索自然。然而还存在一些我们难以涉足的危险区域，许多优秀的户外探险专家为其受伤甚至牺牲。这些地域以山洞、溶洞和天坑最为突出，令人叹为观止的迷人景色吸引着一波又一波的勇敢者前往探索，但这些地理环境却隐藏着重重危险。探索者通常需要在一年中的一个“黄金探索期”带上许多专业的装备、经过周密的计划后才能开始一次珍贵而充满危险的探索之旅。一旦错过这一“时间窗口”，探索的难度将会提升不少。

这些地貌都有一些相同的特征：地形复杂、高度落差大并可能含有一些深度未知、水流情况复杂的地下暗河等等。这些棘手的地理环境无疑会给探险队带来许多的困难甚至是生命危险。在溶洞中的环境黑暗潮湿且存在一些高度落差大、岩质酥松的悬崖，探险人员难以打下支撑点并绳降至悬崖底部。并且溶洞中通常会有地下暗河，如果在勘探工作进行时发现两洞室间的通道被水淹没，勘

探人员会选择涉水前行甚至在深度不明、水流情况负责的地下暗河潜水。这无疑会拖慢勘探进程并且会给勘探人员带来生命危险。

因此我们设计并制作了一款经济实用、灵活性好、机动性强，可靠性高、能应付各种复杂环境的整合折叠式四轴的一体式潜水勘探器。运用勘探器，它可以代替人去到指定区域进行勘探，尤其是在一些危险系数大、人为前行勘探风险高、技术要求高的地方。本作品考虑到自然中复杂的环境情况，采用不同的形态到达现场，并通过摄像头把勘探区域的图像回传。为探险的数据采集及做进一步的探险计划提供依据，把勘探风险讲到最低。本作品主要应用于山洞、溶洞、天坑等地理环境复杂、勘探风险大的地域进行勘探及图像数据采集并能完成近海勘察等远距离水中勘察任务。

2 项目实施情况

2.1 结构设计

整合折叠式四轴的一体式潜水勘探器机身选用 Somos 8000 光敏树脂，采用 SLA 技术一体成型。对于开发者而言，光固化成型技术能最大地节约开发成本的同时，能使机身获得各向同性的物理特性。相比之下，FDM 打印成型技术会不可避免地出现层与层之间的打印缝隙，导致机体呈现各项异性的特性。在水中的压力情况下，会出现应力集中的情况，导致水更容易顺着缝隙渗入耐压壳内，致使密封失效。



图 1: 整体设计

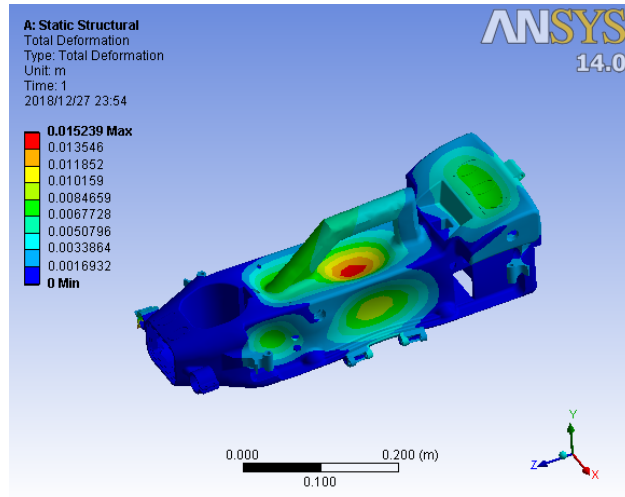


图 2: 仿真测试

2.2 电路设计

整合折叠式四轴的一体式潜水勘探器的硬件方案根据功能的划分，以及设计安装需要，采用了主控板 + 分布式模块连接的设计，我们按照勘探器的结构，设计了两块 PCB 主板：主控制板和电源管理板。整个勘探器的硬件模块连接图如下：

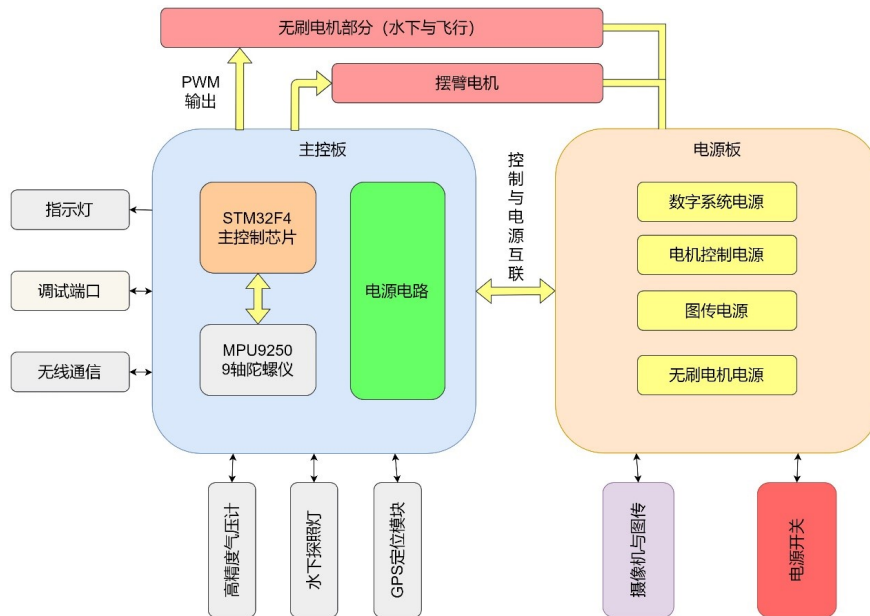


图 3: 整体电路框架

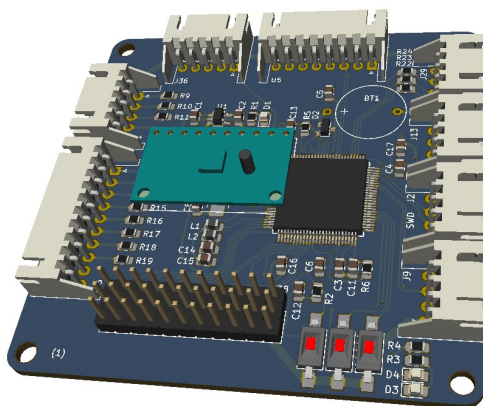


图 4: 主控板

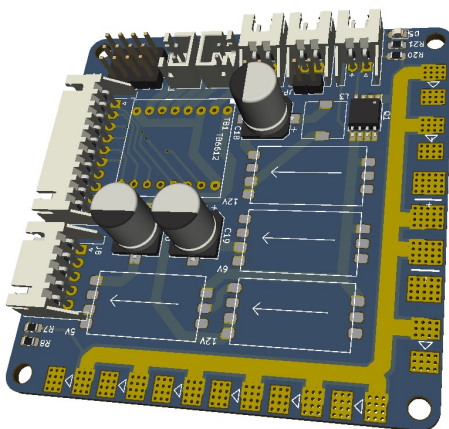


图 5: 电源板

3 项目个人主要承担工作

个人在此项目中主要承担参与折叠机翼的设计与水下动力部分的运动学分析与相关控制算法，由于水下动力分析 ROV 资料较少，很大部分是在自己学习 Robotics 与机器人学相关知识，及其开源飞控控制（参考了比如 Pixel 开源之类的飞控）之后设计，其中或许有些许不足，也让老师您见笑了。

3.1 折叠机翼分析与设计

随着四旋翼无人机的发展，商用多旋翼无人机普遍具有体积大、轴距长的特点，大体积不利于运输携带，长轴距不便于展开回收。为了解决这些问题，市面上出现了可以手动折叠无人机机臂的商用无人机，通常做法为卡扣设计，使用时手动展开无人机，回收时手动折叠无人机并回收。这种折叠机臂的方法虽然实现了机臂折叠和回收，但是并不方便，在遇到需要无人机机臂需要自动折叠的场合，这种手动的方法不能够完成任务。比如我们的勘探器在飞行到勘察水域的时候，我们可以

使用遥控器控制勘探器进行姿态变换，无人机机臂折叠到机身两侧后进入潜水模式。由此一来，我们便可以在远距离操作无人机下水。这是目前市场上的无人机折叠机臂所不能完成的。

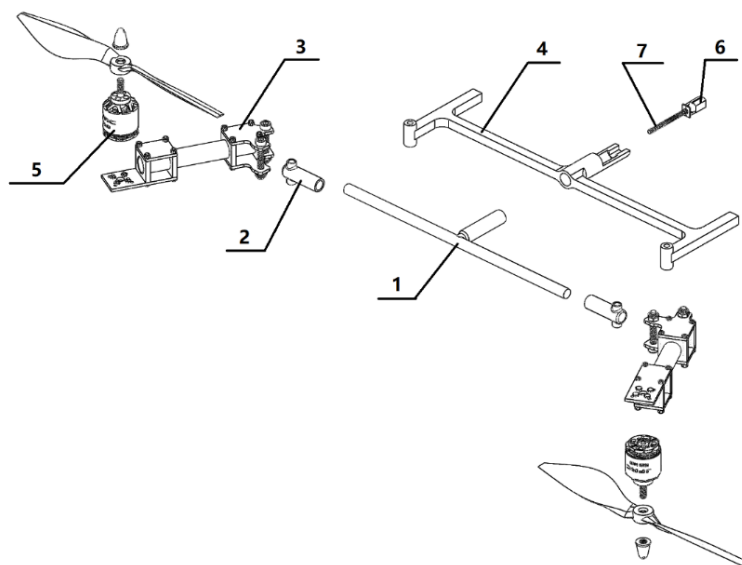


图 6: 零件爆炸视图

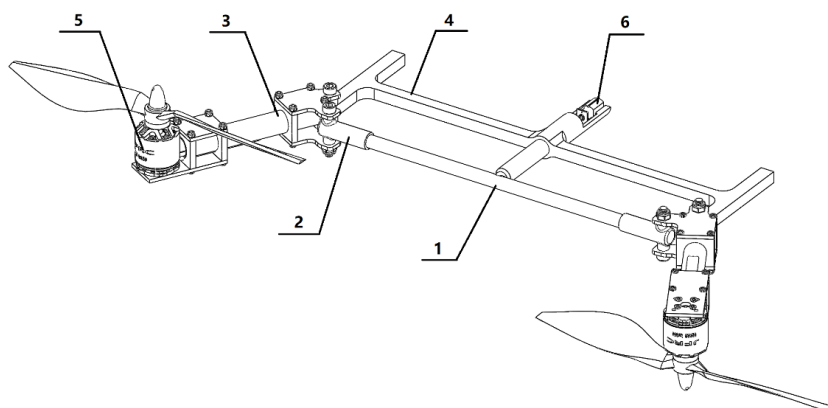


图 7: 机构展开示意图

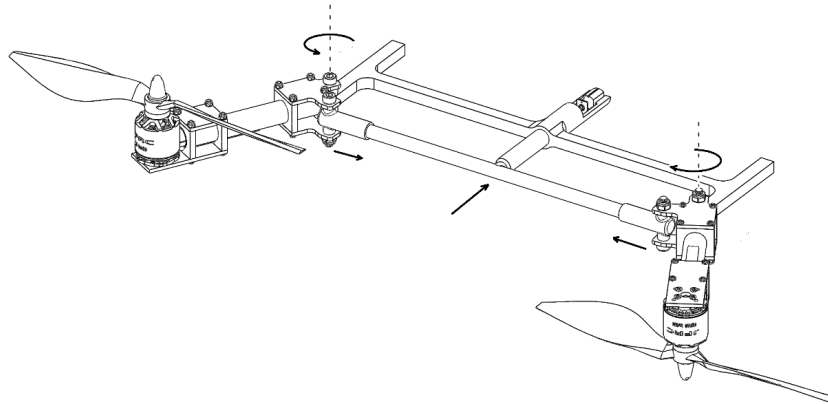


图 8: 零件运动状态示意图

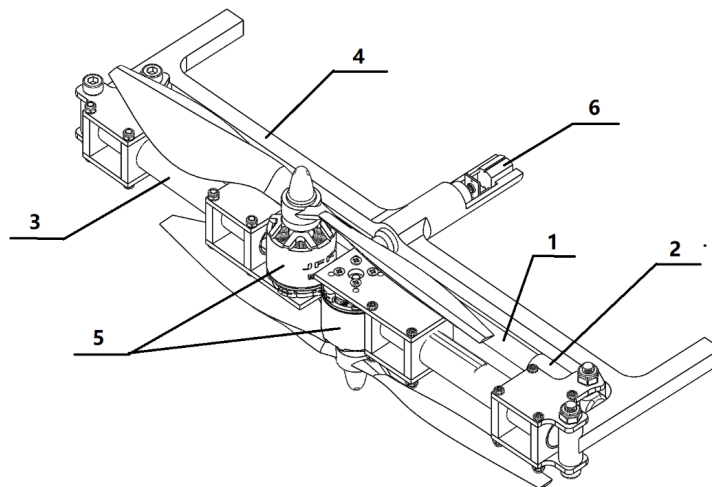


图 9: 机构折叠示意图

此技术已申请发明专利，申请号为：2019102186050

3.2 水下动力数学模型

3.2.1 控制器原理框图

其动力控制框图如下图所示：

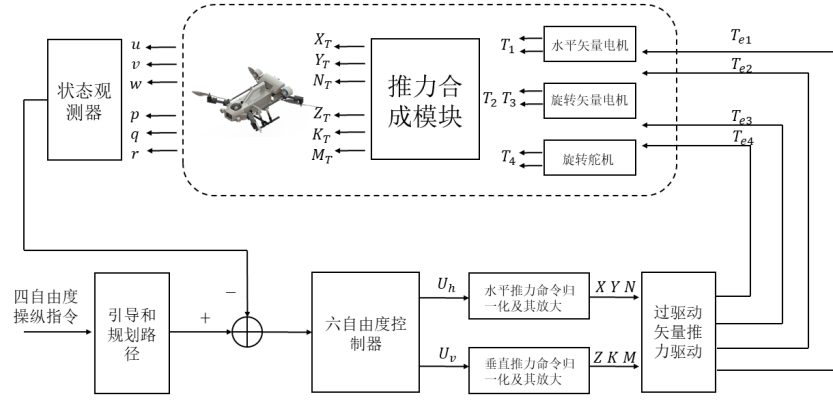


图 10: 水下动力控制框图

3.2.2 水下动力分析

该水下部分如图所示，其安装了一个在垂直方向的矢量推动电机，两个水平可转动水平矢量推动电机，同时一个转动水平方向矢量电机的舵机。建立水下机器人本体坐标系 $O_b - X_b Y_b Z_b$ ，其坐标原点 O_b 取在勘探器重心上，坐标轴 $O_b X_b O_b Y_b O_b Z_b$ 分别与 ROV 惯性主轴一致。

3.2.3 水平推进器的合推力

勘探器本体受到 2 台水平推进器的推力作用，其受到推力正方向与 $O_b X_b$ 轴的夹角都为 β_h ，经过推力分解，水平推进器推力对勘探器本体产生的合推力在本地坐标系各轴上下式表示：

$$X_h = T_1 \cos \beta_h + T_2 \cos \beta_h$$

$$Y_h = T_1 \sin \beta_h + T_2 \sin \beta_h$$

$$Z_h = 0$$

3.2.4 水平推进器的合推力矩

由于 3 台水平推进器安装于勘探器重心的下方，且成矢量对称布置，因此会对勘探器本体产生相应的三个自由度的推力矩。则 3 台水平推进器对勘探器本体产生合推力在坐标系的三个轴上可用下式表示：

$$K_h = -T_{1y} z_h + T_{2y} z_h$$

$$M_h = T_{1x} z_h + T_{2x} z_h$$

$$N_h = T_{1x} y_h + T_{1y} x_h - T_{2x} y_h - T_{2y} x_h$$

3.2.5 垂直推进器的合推力

勘探器本体受到 1 台垂直推进器的推力作用，其受到推力正方向与 $O_b Z_b$ 轴的夹角都为 β_v ，经过推力分解，则垂直推进器推力对勘探器本体产生的合推力可分别用下式表示：

$$X_v = 0$$

$$Y_v = T_3 * \sin \beta_v$$

$$Z_v = T_3 * \cos \beta_v$$

式中： T_3 为勘探器本体受到垂直矢量电机的推力； X_v, Y_v, Z_v 分别为勘探器本体受到垂推沿 $O_b X_b$ 轴、 $O_b Y_b$ 轴、 $O_b Z_b$ 轴的合推力； β_v 为垂推的推力方向与 $O_b Z_b$ 轴的夹角。

3.2.6 过驱动推进系统合推力

由上述方程组，ROV 所安装的 3 台推进器对勘探器本体产生六自由运动度的合推力：

$$X_T = X_h + X_v$$

$$Y_T = Y_h + Y_v$$

$$Z_T = Z_h + Z_v$$

$$K_T = K_h + K_v$$

$$M_T = M_h + N_v$$

$$N_T = N_h + N_v$$

式中： X_T, Y_T, Z_T 分别为 3 台推进器对勘探器本体产生的纵向推力、横向推力和垂向推力； K_T, M_T, N_T 分别为 3 台推进器对本体产生的横倾推力矩、纵倾推力矩、偏航推力矩。

故作用在勘探器本体上的六自由度的控制矢量可用下式表示： $\tau = \mathbf{B}(\beta)\mathbf{T}$ 式中： $\tau = [X_T Y_T Z_T K_T M_T N_T]^T$ 为作用在勘探器本体上的六自由度推力矢量。

3.2.7 运动推力分配方法

当水平面三个期望推力对应的控制电压同时输出时，可能导致水平面的某个推进器的推力饱和。为了避免这种现象，首先可将水平面的三个期望控制电压进行归一化：

$$\delta_1 = |u_X| / u_H$$

$$\delta_2 = |u_Y| / u_H$$

$$\delta_3 = |u_z| / u_H$$

式中： $u_H = |u_X| + |u_Y| + |u_N|$ 为水平方向推力对应的控制电压的绝对值之和； δ_{123} 分别为归一化后纵向控制电压、横向控制电压和偏航控制电压。

然后根据纵向、横向和偏航力矩的权重，分别将归一化后的期望控制电压进行放大：

$$X = k_1 u_X \delta_1$$

$$Y = k_2 u_Y \delta_2$$

$$N = k_3 u_N \delta_3$$

最后，根据勘探器的 3 台推进器成矢量对称布置的特点，可将纵向推力、横向推力和偏航推力矩按照下式进行分配：

$$T_e1 = X + Y + N$$

$$T_e2 = -X - Y + N$$

$$T_e3 = X - Y$$

式中： T_e1, T_e2, T_e3 分别为三台推进器的期望推力。

4 个人总结

自己通过这一个项目更加了解到结构，电路，编程算法三者结合的重要性，也通过这一个项目让自己比较系统的学习到机器人学相关知识原理，也通过这一个项目学习到串联 PID 相关控制原理，同时也对于卡尔曼滤波有着更为深刻的理解，这一个项目主要是在大一下开始逐步的进行，其实也通过这一个项目让自己比较深入的了解学习像是滤波算法，机器人学，传统控制理论（PID，LQR 算法），现代控制理论（了解了 ADRC 控制算法）和图像识别的相关知识，也让自己在大二时不再迷茫于往哪一个方向深入学习，也毅然选择了自己更感兴趣的机器人学与自动控制原理方向，并也选择在大二上半时期独立完成并开源一个二级倒立摆作为自己大二上的学期设计（在下一篇）。

参考文献

- [1] Gill P E, Golub G H, Murray W, et al. Methods for modifying matrix factorizations[J]. Mathematics of Computation, 1974, 28(126):505-535.
- [2] 杨兴帮，梁建宏，文力，王田苗. 水空两栖跨介质无人飞行器研究现状 [J]. 机器人 ROBOT, 2018,40（1）: 102-114.
- [3] Lock R J, Vaidyanathan R, Burgess S C. Impact of marine locomotion constraints on a bio-inspired aerial-aquatic wing: Experimental performance verification[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 6(1): 1-10.
- [4] 张亦波，刘牧东，熊峻江. 变体飞机技术 [J]. 航空科学技术, 2013(6): 64-68. Zhang Y B, Liu M D, Xiong J J. Morphing Aircraft Technology[J]. Aeronautical Science and Technology, 2013(6): 64-68.
- [5] 贺媛媛，王博甲. 国外变形飞行器的研究现状 [J]. 飞航导弹, 2013, 10(10): 49-55. He Y Y, Wang B J. Current research status of abroad morphing aircraft[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2013, 10(10): 49-55.
- [6] Rodriguez A R. Morphing aircraft technology survey[C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, USA:AIAA, 2007: 1-16.