

立项报告

1 立项背景

1.1 研究背景与意义

自上世纪中后期，各类高精度传感器如陀螺仪、加速度计、气压计的不断发展、小型化，为无人机提供了准确的姿态、高度等信息，使其能够稳定飞行和精准定位。无线通信技术的不断升级迭代，通讯在延迟降低的同时稳定性不断提升，保证了无人机与地面控制站之间大量信息的实时传输，进而操作人员可以远程监控指挥无人机，这为无人机的智能化操作和协同工作提供保障。

本世纪初，无人化、智能化的技术升级拉开了第四次工业革命的序幕。各种新型实用无人机随着电子元件、控制算法、材料科学的日趋成熟而层出不穷，在测绘、农业、军事、艺术等领域大放异彩，推动了社会生产生活方式的进步。



图1 喷洒农药的农业无人机



图2 美军MQ-9 侦察无人机

按结构可将无人机简单划分为固定翼无人机、旋翼无人机和其它结构无人机。其中，旋翼无人机可垂直起降、悬停，适用于狭小空间作业；旋翼无人机的动力学模型更为简单成熟，常被作为验证新型控制算法的平台。然而，旋翼无人机由于自身电池容量、机身体积、空域复杂的气候条件等限制，通常续航时间较短。另一方面，传统旋翼无人机所有旋翼推力方向相同，均垂直于机身平面，可控变量少于机身的六个运动自由度，使之成为欠驱动系统。故其进行水平运动时需倾转机身，姿态运动和位置运动两者耦合，极大降低了旋翼无人机机动性^[1]。



图3 作水平向前运动时向前倾斜机身的无人机

为解决现有旋翼无人机普遍存在的续航短、欠驱动两大痛点问题，进一步扩展其实际应用场景，本项目提出一款具有可倾转四旋翼及从动轮构型设计的空地两栖无人机——“风语鸢心”。倾转旋翼与两栖从动轮的组合应用使其具有了提升航拍的稳定性、机载武器的瞄准精度与超低空巡航的续航能力的潜力。

1.2 研究现状

根据关于可倾转旋翼两栖无人机的研究的重难点，现从实现陆空两栖的方式、倾转旋翼的结构、控制方法三方面分析国内外研究现状：

表 1 实现陆空两栖方式的比较^[2]

实现陆空两栖的方式	优势	劣势
一对从动轮 	轻量化； 单一控制系统控制空地两种运动模式，结构简单；	控制复杂； 不易在地面转向；
多对从动轮 ^[3] 	结构简单； 单一控制系统控制空地两种运动模式，结构简单；	重量大； 不易在地面转向；
笼形从动轮 ^[4] 	旋翼不易损坏； 单一控制系统控制空地两种运动模式，结构简单；	若安装相机，则视野受阻； 不易在地面转向；
各形主动轮 ^{[5][6]} 	地面通过性强； 鲁棒性强；	双控制系统控制旋翼和轮子，结构复杂； 能耗高；

先前已有对无人机陆空两栖运动实现方式的研究，目的主要是实现无人系统在非结构性环境中的平滑运动，同时利用地面效应降低能耗，提升续航。如表 1，实现陆空两栖的方式主要有安装一对或多对传统从动轮、各形新式从动轮、各形主动轮等。对于主动轮结构，尽管采用此结构的无人机由空地双控制系统控制，具有较强鲁棒性，但其往往自重大，结构复杂。对于从动轮结构，不具备独立电机，由旋翼电机统一驱动，需要无人机以一套控制系统控制空地两种运动模式。以往，此类空地两栖无人机大多安装多对从动轮，近来，为了减重提高机动性，一些无人机采用较为激进的一对从动轮甚至单从动轮结构。例如 Tanaka 等人提出的一款空地机器人，其中部安装有一根贯穿机体的横轴，横轴两侧安装一对从动轮^[7]。又



图 4 FAST-Lab 提出的独轮飞行器 Skywalker 示意图

如浙江大学 FAST-Lab 提出的一款独轮飞行器，其正下方安装有一个全向轮，结构紧凑而灵活^[8]。此外，也有无人机采用新型轮式结构，较为典型的是 Kalantari 等人提出的新型无人机在四旋翼基础上增加了一个滚动笼结构，并为之配备独立电机，与传统轮式结构相比能起到保护旋翼的作用，提高系统鲁棒性^[9]。

表 2 倾转旋翼结构的比较

倾转旋翼的结构	优势	劣势
独立倾转旋翼 ^{[10][11]} 	倾转结构独立，容错率高； 高自由度，机动性强；	自重大； 控制方法复杂； 依赖旋翼轴方向、数量；
并联倾转旋翼 ^[12] 	结构简单； 节省舵机； 自重低；	容错率低； 控制方法复杂；
竖直-水平切换式倾转旋翼 ^[13] 	同时具备固定翼飞行器、直升机的特点；	相较于固定翼飞机飞行速度慢；
交叉式双旋翼 ^[14] 	飞行稳定性强； 升力大； 取消尾桨，鲁棒性高；	飞行阻力大； 飞行效率低； 应用局限性强；

先前已有对飞行器倾转旋翼结构的研究，目的是通过提高系统自由度以提升无人机机动性，扩大其应用范围。如表 2，倾转旋翼的结构主要有应用于旋翼无人机的独立倾转旋翼和并联倾转旋翼结构，以及应用于可垂直起降固定翼飞行器的竖直-水平切换式倾转旋翼，另外还有不能严格意义上算是倾转旋翼结构的交叉式双旋翼。对于竖直-水平切换式倾转旋翼，最为著名的应用案例为美军 V22 “鱼鹰”倾转旋翼机，该类飞行器外形上与固定翼飞机相似，翼尖安装由两台可倾转发动机带动的两具旋翼，兼具固定翼飞行器、直升机的特点，应用场景灵活。对于交叉式双旋翼，双旋翼反向旋转，相互交叉，相较于单旋翼提供更大的升力，稳定性强，但因为该结构气动阻力大，故应用局限性强。对于独立倾转旋翼，每个旋翼及其电机装于可倾转平台上，倾转角度独立控制，具有高自由度。其中独具特色的是电子科技大学提出的一种模块化倾转双旋翼无人机，它通过倾转双旋翼实现全向运动，此外多个该型无人机可物理连接协同飞行，通过改变组合的数量和形式，实现负载能力、自由度、速度和续航与不同任务要求的最佳匹配^[15]。对于并联倾转旋翼，相邻的旋翼由直杆连接，舵机带动直杆倾转进而实现旋翼角度的同步倾转，虽然减少了舵机数量，但对控制约束和复杂分配方法提出挑战^[16]。

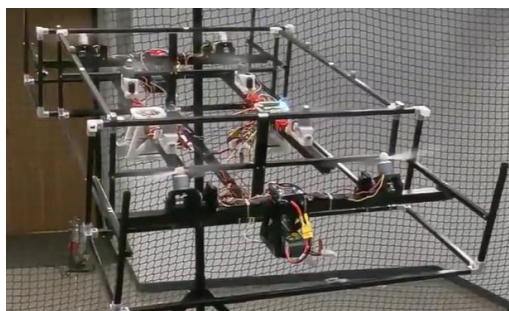


图 5 电子科大提出的物理连接协同飞行的模块化倾转双旋翼无人机

常见的无人机控制方法有 PID 方法、反步法、反馈线性化、鲁棒控制方法、自适应控制方法等。其中，PID 方法不依赖于控制对象的具体模型，鲁棒性强，大多用于线性系统控制，如 Lirong Zhou 等人基于机器学习对旋翼无人机的姿态角度进行 PID 控制，从而平滑应对外部干扰^[17]。反步法是一种非线性控制方法，由于四旋翼无人机模型的积分性质，它非常适合使用反步法进行控制器设计，如 Lingxi Zheng 等人基于反步法对无人机编队问题的研究^[18]。对于反馈线性化，引入了一些数学框架，使非线性系统可以通过微分同胚完全或部分化为线性系统，进而降低控制难度^[19]。对于鲁棒控制方法和自适应控制方法，鲁棒控制就是试图描述被控对象模型的不确定性，估计在某些特定界限下达到控制目标所留有的自由度，自适应控制则是根据外界环境的变化来主动调节控制律参数或者控制律结构，如 Quang Truc Dam 基于鲁棒控制方法对无人机编队问题的研究^[20]。

综上，国内外在可倾转旋翼两栖无人机领域已取得一定研究进展。在空地两栖运动无人机设计方面，现有研究主要集中于传统和新型轮式结构的应用；在倾转旋翼无人机设计方面，现有研究主要集中于倾转旋翼结构的创新，如独立倾转旋翼和并联倾转旋翼等。控制方法方面，PID 控制、反步法、反馈线性化、鲁棒控制和自适应控制等技术也被广泛研究和应用。然而，现有无人机设计仍面临续航时间短、机动性不高、控制复杂等挑战，特别是缺少一款兼具空地跨域作业、长续航时间及全驱机动能力的微型无人机，其相应的构型设计、倾转旋翼控制算法开发、能量效率、平滑完成跨域机动等问题均有待解决。

2 项目概述

2.1 项目简介

计划制作一款可倾转四旋翼双从动轮两栖无人机。

四旋翼无人机作为最经典的旋翼无人机，结构简单对称，易于实现各类控制算法，故该无人机采用四旋翼结构。考虑到 X 形机架具备较高机动性，无人机采用 X 形机架。

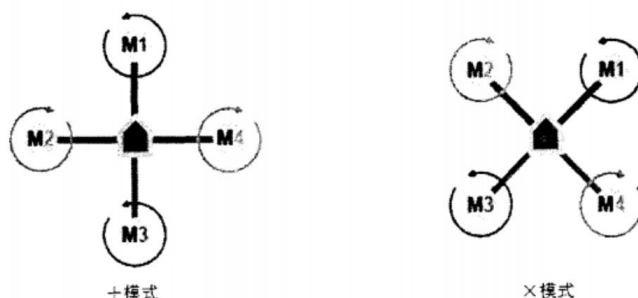


图 6 两种常见机架构型——X 形机架与十字机架的示意图

该无人机的机架由可适配安装倾转旋翼的机臂和可适配安装从动轮的底盘构成，动力系统主要由电池、分体电调、无刷电机、桨叶构成，控制系统主要由飞控、机载电脑、遥控器、接收器构成。

该无人机于底板下方安装一对万向轮作为从动轮，从而具备两栖运动能力，可在周围环境较为平坦空旷时保持近地飞行或触地滑行，利用地面效应减小诱导阻力，进而降低旋翼功耗，提升综合续航。

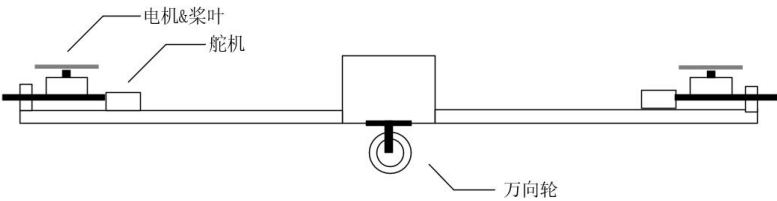


图 7 无人机结构侧视图

该无人机于机臂末端安装单轴可倾转平台，该平台由舵机、定制螺丝、套筒构成，平台上安装电机和桨叶，从而实现旋翼的单轴倾转。可倾转旋翼使无人机成为过驱动系统，具备更高的控制精度和鲁棒性。地面上，倾转旋翼通过改变俯仰角来抵消摩擦力，提升机械效率。同时，倾转旋翼还提供补偿力，使无人机仅一对轮触地时保持平衡。空中，倾转旋翼通过改变倾转角度从而使无人机在升降转向时不改变机身姿态，提升机身稳定性。

2.2 项目所需软硬件的选择

表 3 硬件选用的型号与数目

	设备	型号	数目
机架	机臂（包含定制螺丝、套筒）	自行用尼龙材料 3D 打印	≥ 4
	中心板	Totem Q250	≥ 1
	拓展底盘	自行用塑料材料 3D 打印	1
动力套件	分体电调	EMAX 银燕 BLHELI 45A	≥ 4
	无刷电机	Tmotor F60 Pro 2550KV	≥ 4
	电池	TATTU FPV 2300mAh 4S	2
	5 寸桨叶	GEMFAN 51477	≥ 4
	万向轮		2
控制套件	飞控	CUAV Autopilot X7	1
	接收器	RadioLink R12DSM	1

	遥控器	RadioLink ATS9 Pro	1
	舵机	Power Pro SG90	4
辅件	稳压模块	BARY DM02	2
	HDMI 欺骗器		1
	供电线	XT60	若干
	数据线左右弯头		若干
	Type C 连接线		若干
	硅胶线		若干
	硅胶杜邦线		若干
	双通铝柱		若干
	焊锡		若干
	绝缘胶带		若干
	螺丝螺母		若干

表 4 软件工具的选用与用途

		工具	用途
Ubuntu (VMware 虚拟机)	ROS	MAVROS	建立飞控与机载计算机间的通讯
		Dynamic Reconfigure	实时参数调节
		Rviz	仿真和数据可视化
		PlotJuggler	数据可视化及分析
		NoMachine	远程桌面
		VS Code	IDE
		Solidworks 2021	三维建模
		QGroundControl	地面站

3 实施方案

3.1 研究内容与阶段目标

研究内容包括学习相关理论与实际设计制作一款可倾转四旋翼双从动轮两栖无人机，最终设计飞行测试以检验无人机基础飞行能力、陆空跨域切换能力、倾转旋翼对于陆空机动性的提升水平和近地触地运动时的续航提升水平。

研究的重难点主要在于倾转旋翼的硬件实现方案、双从动轮的安装方案、对于旋翼倾转的控制算法设计和飞行测试实验。

第一阶段：硬件准备&无人机搭建

设计可适配倾转旋翼的机臂、可适配万向轮的底盘，并对其三维建模打印。采购无人机的所需的各硬件，对其焊接、连线、装配。

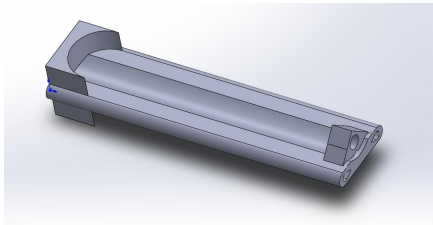


图 8 机臂模型

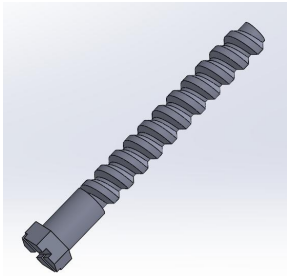


图 9 定制螺丝模型

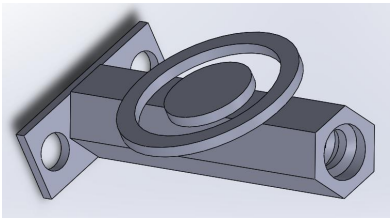


图 10 套筒模型

如图 8、9、10 所示，对于可适配倾转旋翼的机臂的组装，将定制螺丝自外向内穿过机臂末端的小孔，与套筒结合。套筒上设有电机安装处，套筒末端可与舵机相连，从而舵机带动套筒旋转，实现旋翼单轴倾转。

第二阶段：飞控调试&飞行测试

下载开源飞控固件烧录至飞控，完成飞控的调试与校正，完成遥控器设置。在室内空旷场地进行无人机试飞，检验其包括升降转向悬停在内的基础飞行能力。无人机飞手进行无人机飞行训练，以减少炸机率。

第三阶段：倾转旋翼控制算法设计&飞行测试

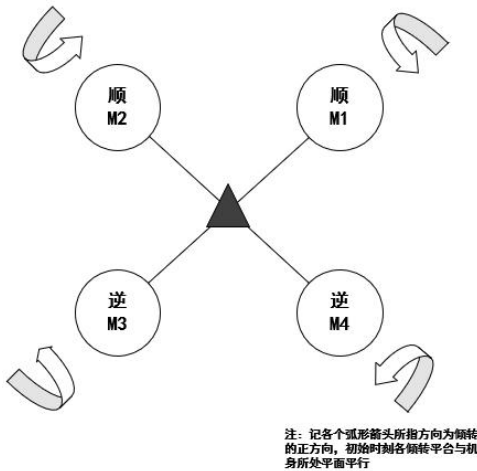


图 11 无人机结构与运动方向示意图

由图 11，该无人机的四旋翼系统可视为 M1 和 M3、M2 和 M4 两组相同双旋翼系统的耦合，故仅对 M1-M3 进行分析。M1、M3 对侧反桨，扭矩抵消。设四旋翼系统的左前方为 M1-M3 的前方。若要使 M1-M3 向前运动，则 M1 反方向倾转 α ，M3 正方向倾转 α ；若要向后运动，则 M1 正方向倾转 α ，M3 反方向倾转 α 。四旋翼系统的水平运动可由两组双旋翼系统的前后运动耦合。例如，若要使四旋翼系统向前运动，则使 M1-M3、M2-M4 均向前运动；若要向左运动，则使 M1-M3 向前运动、M2-M4 向后运动。

根据上述设计串级 PID 倾转旋翼控制方案，对飞控固件进行二次开发，烧录至飞控，于空旷室内进行飞行测试，利用倾转旋翼实现无人机空中水平运动，观察机身姿态，评估测试效果。

第四阶段：安装从动轮&飞行测试

购置一对万向轮并安装于底盘。于空旷室内进行飞行测试比较无人机近地触地飞行与悬空飞行的续航情况。于非结构性地面场景进行飞行测试检验无人机陆空跨域切换能力。

第五阶段：数据分析&结题

根据测试数据评估陆空跨域切换能力、倾转旋翼对于陆空机动性的提升水平、近地触地运动时的续航提升水平和自主避障效果，得到研究结论与启示。

3.2 涉及知识与自学安排

课题涉及安装各类软件并学会基本的应用，包括编程、三维建模、仿真建模等，计划通过《古月居 ROS2 入门 21 讲》、《从零制作自主空中机器人》、《PX4 固件二次开发初级课程》、《SOLIDWORKS 教学精品课程》等教程自学相关知识。

课题涉及硬件安装，包括焊接、接线等，计划通过请教学长学姐自学相关知识。

课题涉及实验及实验场地设计，计划基于课题实际完成情况和现有硬件设施请教导师课题组自学相关知识。

3.3 场地使用安排

正心楼研讨室、科学园科创大厦 K1326 无人机飞行实验场地等。

4 中期及结题预期目标

中期目标：初步掌握相关知识，完成研究第一、二阶段。

结题目标：基本完成研究第三、四、五阶段。

5 经费使用计划

表 5 经费使用计划

需购买的设备&型号 需购买的工具、耗材	购买链接	十一月初的实时总价格 单位：元（含运费）
机架+脚架*1 Totem Q250	http://e.tb.cn/h.gA4U9uwVgQduO17	47.65
电调*4 EMAX 银燕 BLHELI 45A	http://e.tb.cn/h.gALedfysuoEL9T1	829.58
电机*4 Tmotor F60 Pro 2550KV	http://e.tb.cn/h.gAPXXajplejLb6W	454.00
飞控*1 CUAV Autopilot X7(含 NEO3 PRO 线长 35cm)	http://e.tb.cn/h.TaQq9688PlmMvll	2638.00
遥控器&接收器*1 RadioLink ATS9 Pro+R12DSM+锂电池+充电器	http://e.tb.cn/h.T0P6fthn7v2B44N	545.00+32.40 (含发票税点)
舵机*4 SG90 Pro 180 度	http://e.tb.cn/h.gzitMQBeuSL3I1P	22.80
电池*2 TATTU FPV 2300mAh 4S	http://e.tb.cn/h.gzU7rWpuKBfMg4y	231.80
桨叶*2 套 GEMFAN 51477	http://e.tb.cn/h.gzICZdYVEsCMeCw	22.10
稳压模块*2 BARY DM02	http://e.tb.cn/h.gziFBo4IzdDwFKO	31.00
供电线*1 XT60	http://e.tb.cn/h.TaQxs10EA3x8d8r	22.00
万向轮*2		合计约 100 元
硅胶线（20AWG、18AWG、14AWG）		
杜邦线（公对母 10cm、20cm）		
螺丝（M3*6）		
螺丝刀（2mm、2.5mm）		
绝缘胶带		

焊锡		
HDMI 欺骗器		
TYPE C 连接线		
数据线左右弯头		
双通铝柱		
3D 打印（尼龙）	第三方网站： https://www.jlc-3dp.cn/	材料型号：3201PA-F 单价（含税）约 1.5 元/g 合计约 600 元
		总价：5576.33 元

参考文献：

- [1]张宇. 三轴可倾转旋翼无人机的控制方法[D]. 杭州：浙江大学，2021, 1-5.
- [2]Kalantari A et al. Drivocopter: A concept Hybrid Aerial/Ground vehicle for long-endurance mobility[J]. 2020 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2020, pp. 1-2.
- [3]Page J R et al. The Quadroller: Modeling of a UAV/UGV hybrid quadrotor[J]. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, IL, USA, 2014, pp. 4834-4841.
- [4]Kalantari A et al. Design and experimental validation of hytaq, a hybrid terrestrial and aerial quadrotor[J]. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013, pp. 4445–4450.
- [5]Tanaka K et al. A design of a small mobile robot with a hybrid locomotion mechanism of wheels and multi-rotors[J]. 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan, 2017, pp. 1503-1508.
- [6]Kalantari A et al. Drivocopter: A concept Hybrid Aerial/Ground vehicle for long-endurance mobility[J]. 2020 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2020, pp. 5.
- [7]Tanaka K et al. A design of a small mobile robot with a hybrid locomotion mechanism of wheels and multi-rotors[J]. 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan, 2017, pp. 1503-1508.
- [8]Pan N, Jiang J, Zhang R, Xu C, Gao F et al. Skywalker: A Compact and Agile Air-Ground Omnidirectional Vehicle[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, May 2023, vol. 8, no. 5, pp. 2534-2541.
- [9]Kalantari A et al. Drivocopter: A concept Hybrid Aerial/Ground vehicle for long-endurance mobility[J]. 2020 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2020, pp. 1-5.
- [10]独立可倾转四旋翼无人机旋翼故障检测和控制系統[EB]. <https://www.bilibili.com/video/BV1BN4y1a74N/>, 2023-12-08.

- [11]大学生发明“特技”无人机，六旋翼能独立旋转，可任意角度飞行[EB].
<https://www.bilibili.com/video/BV1a441167ug/>, 2019-08-26.
- [12]Li K et al. Flight Control for a Tilt-Rotor Quadcopter with Linear Servo Motors[J]. 2024 43rd Chinese Control Conference, Kunming, China, 2024, pp. 3167-3173.
- [13]CV-22 型鱼鹰倾转旋翼机[EB]. https://picture.pconline.com.cn/article_list/2220.html/, 2018-01-31.
- [14]双旋翼交叉式直升机（KMAX）[EB]. <https://www.bilibili.com/opus/446347411020299773>, 2020-11-01.
- [15]Wu Z et al. Design, Modeling and Control of a Composible and Extensible Drone with Tilting Rotors[J]. 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Kyoto, Japan, 2022, pp. 12682-12689.
- [16]Li K et al. Flight Control for a Tilt-Rotor Quadcopter with Linear Servo Motors[J]. 2024 43rd Chinese Control Conference, Kunming, China, 2024, pp. 3167-3173.
- [17]Zhou L et al. Modeling and PID control of quadrotor UAV based on machine learning[J]. Journal of Intelligent Systems, vol. 31, no. 1, 2022, pp. 1112-1122.
- [18]Zheng L et al. Backstepping-based Sliding Mode Control for Multi-Quadrotor UAV Formation[J]. 2024 43rd Chinese Control Conference, Kunming, China, 2024, pp. 705-710.
- [19]张宇. 三轴可倾转旋翼无人机的控制方法[D]. 杭州：浙江大学，2021，7-9.
- [20]Quang T D. Synthesis of Observers and Robust Control Laws for Swarm or Formation Flight of Unmanned Aerial Vehicles[D]. Le Havre: Normandie Université, 2023, pp. 26.