本章目录

无人机的装配、调试与试飞

第一章　绪论

1.1　概念分类与应用

1.2　发展历程与趋势

1.3　组成与架构

1.4　坐标系与控制原理

1.5　装配与调试

1.6　RflySim工具链

1.7　学习路线与实验案例

1.8　习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

1.5.1 组件连接与样机组成　教材第1.3.1节

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线　教材1.3.1–1.3.2节

1.5.3 调试与实验（地面验证）　教材第1.3.3节

1.5.4 调试与实验（首飞复查）　教材第1.3.3节

1.5.5 固定翼装配与调试　教材第1.3.1–1.3.3节

1.5.1 组件连接与样机组成：适用范围与示例

通用装调方法：以无人机为例

部件确认	机械与接线	配置与验证	分阶段首飞	飞后复查
型号与接口	固定与通路	基准与响应	断电装桨后	检查与记录

- **全书范围：**面向各类无人载具，以及机器人等具身智能系统。
- **共通方法：**结构与供电集成、测量校准、控制配置和分阶段验证。
- **本节示例：**X500 V2四旋翼详解装调，UltraStick 25e固定翼补充差异。
- **平台适配：**机构、执行器、参数和试验工况随载具类型调整。

可迁移的是装调方法，不同载具的结构与受力决定具体实现。

1.5.1 组件连接与样机组成：整机位置

X500 V2的部件安装位置



平台板及连接件见1.5.2

图：X500 V2带桨整机示意图

- **机架动力：**每臂配电机、电子调速器（电调/ESC）与螺旋桨，两种旋向的桨各2片。
- **飞控定位：**自驾仪（飞控）置于顶板中央、朝向机头；全球导航卫星系统（GNSS）模块由支架抬高。
- **下部结构与通信：**双导轨承接电池托板与平台板，起落架支承机身，接收机与数传固定在机身。

X布局的机头位于两支前臂之间，飞控在顶板中央与机头同向。

1.5.1 组件连接与样机组成：装配层次

机臂、中心板与托架的连接



四片桨分离展示，地面验证后安装

图：X500 V2含螺旋桨的部件示意图

- **中心连接：**四支机臂嵌入下板定位槽；核对内部接线后合板紧固，外设固定于上板或支架。
- **内部供电：**配电板（PDB）隔离固定于下板；电源模块（PM）串接电池与PDB。
- **下部连接：**下板挂架连接双导轨；电池板滑块与平台板挂架分别承接两块托板。

先核对内部接线再合板，可避免夹线和重复拆装。

1.5.1 组件连接与样机组成：装配清单

教学样机的组件与安装数量

安装分组	数量	组成与预装状态
机架	1套	上下板、双导轨、托板、起落架及紧固件
机臂动力总成	4组	每臂1台电机、1个电调，均已预装
供电与飞控	各1	PDB、PM02D电源模块、Pixhawk 6X飞控（6X）及底板
机载外设	各1	GNSS、接收机、数传、microSD卡
安装用螺旋桨	4片	顺时针与逆时针桨各2片，含配套固定件

- **安装与备件：**四片为装机用桨；备桨另存，地面测试期间不装桨。
- **地面配套：**另备电池、发射机、地面数传与充电器；相机和伴随计算机为选配。

1.5.1 组件连接与样机组成：动力配套

电池、电调、电机与桨的配套



图：动力电池示意图

- **本例组合：**4S电池配2216 KV920电机、20A电调和1045桨；换件时按电压、负载和接口核对整套配合。
- **电池标识：**4S指4节串联；普通锂聚合物电池（LiPo）标称14.8V、充满16.8V；5000mAh是容量示例。
- **放电能力：**容量（Ah）乘C倍率得标称放电电流，如5Ah×20C＝100A；实际还受电芯、温升和线材限制。
- **插头与充电：**XT60为主电源头，平衡头引出各节电压；用匹配LiPo、4S及电池允许充电电流的平衡充电器。

电池节数决定电压范围，电机、电调、桨和线束共同限定动力配套。

1.5.1 组件连接与样机组成：动力规格

电机、电调与螺旋桨规格的读法

- **电机2216：**定子直径22 mm、高16 mm；定子越大，转矩一般越大，重量也越大。
- **电机KV920：**空载时每伏电压约对应920 r/min，电压乘KV值约为空载转速。
- **电调20A：**可持续通过约20 A电流，须大于电机带桨满油门时的电流并留余量。
- **螺旋桨1045：**桨径10英寸、螺距4.5英寸；螺距是桨转一圈理论上前进的距离。
- **一步估算：**4S标称14.8 V，乘以920 r/(min·V)约为1.36万 r/min（空载）；装上1045桨后转速下降、电流上升。
- **配套判断：**换大桨或升电压都会增大电流，电调、电池和线材须留余量。

电压和KV决定转速量级，桨越大负载越重，电调电流要覆盖带桨负载。

1.5 装配与调试

1.5.1 组件连接与样机组成：硬件电力连接架构

动力供电、器件供电与控制信号三类线路

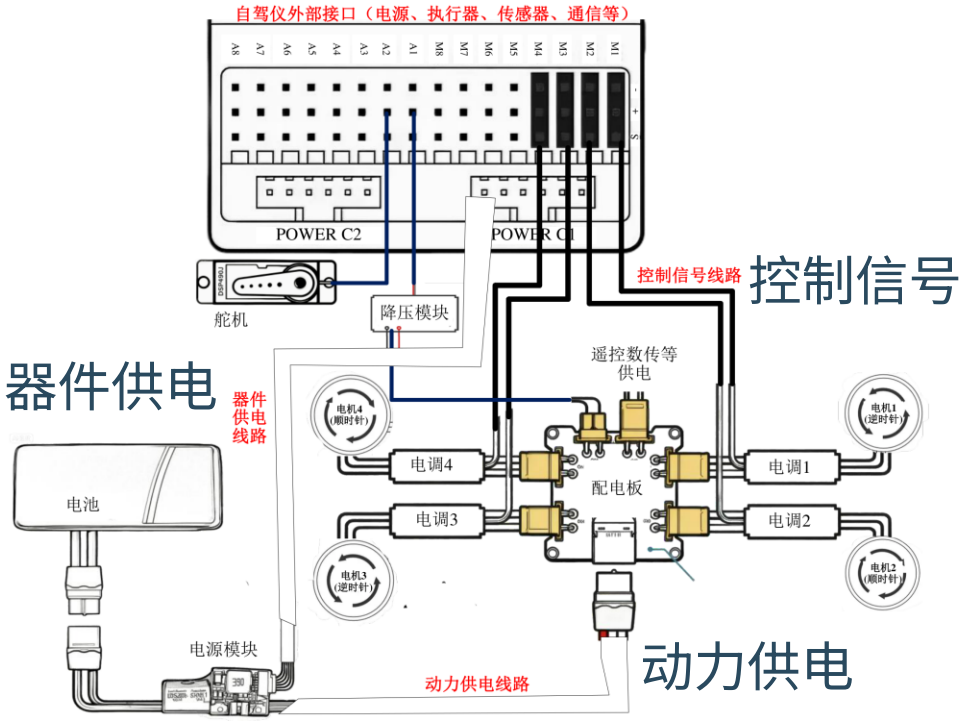


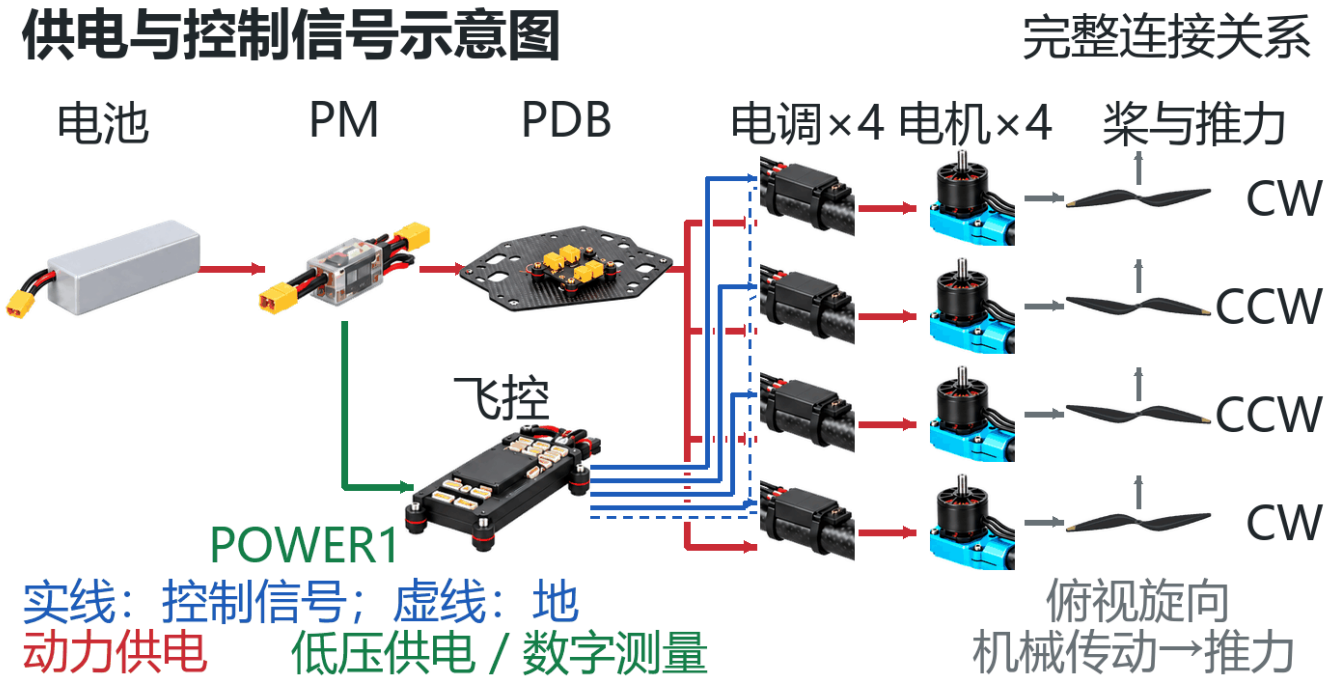
图1.15 硬件电力连接架构

- **动力供电：**电池→电源模块→配电板→电调→电机，电流大，线径、接头和散热要可靠。
- **器件供电：**图中POWER C1仅示意，降压模块供舵机；本例6X接POWER1。
- **控制信号：**自驾仪经M1–M4输出PWM指挥电调；传感器经I^2C、串口、SPI、CAN通信。
- **读图提示：**M、A排针即主输出（MAIN）与辅助输出（AUX）；图中电机编号只是示例。

三类线路分别输送动力、稳压供电和指令，接线时按线路类型逐一核对。

1.5.1 组件连接与样机组成：动力供电、器件供电与控制信号

供电与信号怎样贯穿整机



图：四旋翼供电与推力示意（CW顺时针、CCW逆时针）

- **动力供电：**电池经PM、PDB向电调供电；电调驱动电机，螺旋桨旋转产生推力。
- **器件供电（低压）：**PM02D六芯线接POWER1，给6X供电并传数字测量。
- **控制信号与测量：**PWM线传递电机指令；姿态、定位与电源测量反馈至飞控。

动力、飞控供电和控制信号沿不同路径传递，测量参与状态判断。

本章目录

无人机的装配、调试与试飞

第一章　绪论

1.1　概念分类与应用

1.2　发展历程与趋势

1.3　组成与架构

1.4　坐标系与控制原理

1.5　装配与调试

1.6　RflySim工具链

1.7　学习路线与实验案例

1.8　习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

1.5.1 组件连接与样机组成　教材第1.3.1节

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线　教材1.3.1–1.3.2节

1.5.3 调试与实验（地面验证）　教材第1.3.3节

1.5.4 调试与实验（首飞复查）　教材第1.3.3节

1.5.5 固定翼装配与调试　教材第1.3.1–1.3.3节

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：装配预演

从分散组件到X500 V2整机



图：X500 V2装配与成机示意图

- **1. 机架与接线：**安装导轨、托架和起落架；机臂定位、内部接线后合板紧固。
- **2. 航电与电池：**飞控在顶板中央朝向机头，定位通信件固定，电池沿导轨方向绑紧。
- **3. 验证与装桨：**无桨核验电机序号、转向和控制响应，通过后断电安装螺旋桨。

机架、接线与设备固定完成后，经过无桨验证，再断电装桨。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：装配准备

工具、紧固件与预装总成

- **工具对应：**内六角扳手配螺钉头，小扳手固定螺母；另备万用表、绑带和线束固定件，用于电气初检与布线。

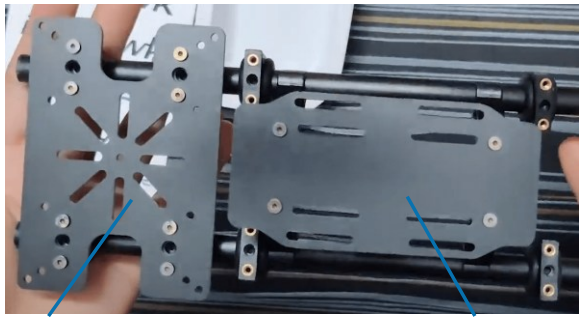
- **紧固件分类：**M3×14表示公称直径3 mm、长14 mm；按规格和长度分开放置，对照安装孔取用，过长会顶到板件或线路。

- **预装检查：**逐臂检查电机和电调固定、接头与绝缘；断电轻转电机钟罩，应无擦碰和引线干涉。

- **接线准备：**本例PDB与电调使用配套插头，完好总成不重复拆装；散件机架的焊接步骤不能直接套用。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：下部托架

托架、导轨与电池安装板

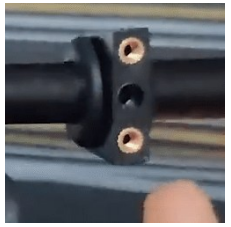



总览示意


平台板挂架


胶圈


电池板滑块


下板挂架×4

图：两块托板与三类连接件

- **1. 托板预装：**胶圈压入挂架槽；M2.5×6沉头螺钉连接电池板与滑块、平台板与挂架。
- **2. 穿入导轨：**4个下板挂架先穿双导轨，再穿入两块托板总成；电池板贴防滑垫。
- **3. 定位检查：**各类连接件就位后固定，导轨平行、托板平正，胶圈无翻边。

下板挂架、平台板挂架和电池板滑块各有连接对象，穿杆后分别定位。

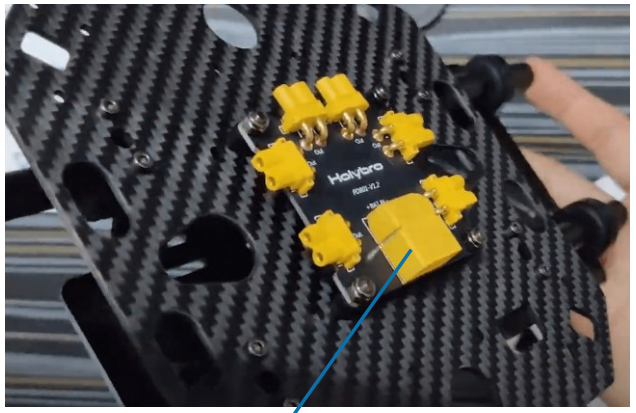
1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：下板与配电

用绝缘支柱固定配电板，并留出接线空间

配电板与下板示意



下板挂架与导轨



核对主插头固定与插拔空间

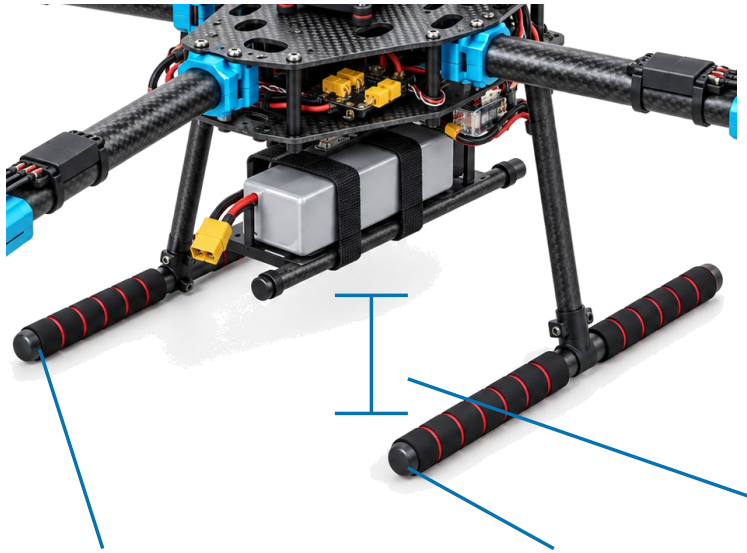
图：下板连接及PDB主插头局部

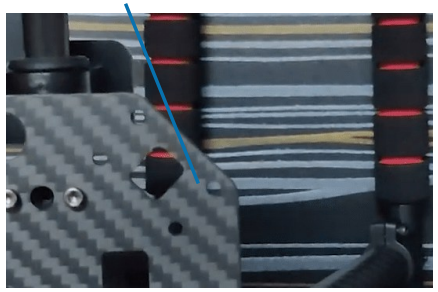
- **1. 隔离固定：** 下板4孔装M3×14螺钉和尼龙支柱，再对孔固定配电板，板底与碳板留隙。
- **2. 连接导轨：** 用配套螺钉连接下板与4个挂架，两杆平行，板件位置一致。
- **3. 主插头检查：** 核对XT60固定及插拔空间；线缆不顶板边，固定件不碰裸露导体。

绝缘支柱使配电板与碳板隔开，接头和线束空间留给后续连接。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：起落架安装

起落架的连接与支承检查





图：两侧支承示意与下板连接局部

- **1. 连接支杆：**松开横杆接头预装螺钉，立杆插至规定位置，核对两侧高度和展开方向。
- **2. 固定下板：**紧固接头至立杆不松转，再用配套M3×8螺钉将起落架固定到下板。
- **3. 检查支承：**平整台面上支承不摇晃，两侧对称，电池托板与载荷区保有离地空间。

起落架通过下板支承整机，装后对称与离地间隙共同决定支承状态。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：机臂预定位

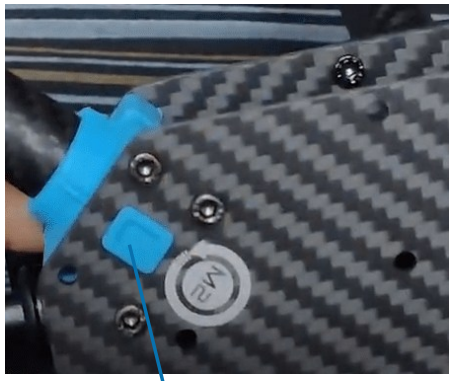
四支机臂与预装动力组件

四臂与下板（示意）



上板未合；未最终紧固

连接处（已合板）



臂根矩形凸台

板槽被凸台遮挡

图：四臂预定位示意与真实连接部位

- **1. 对应机位：**按机头与套件标识放置四支预装机臂，桨拆下；根部矩形凸台嵌入下板槽。
- **2. 预定位：**四臂全部就位、定位面贴合；上板合入前保留对孔余量，不做最终紧固。
- **3. 动力检查：**预装电机、电调不重复拆装；电调固定、引线完好，断电转钟罩无擦碰。

四支机臂先依定位槽全部就位，再为内部布线和上板对孔保留余量。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：断电供电接线

电池、PM、PDB与电调的连接



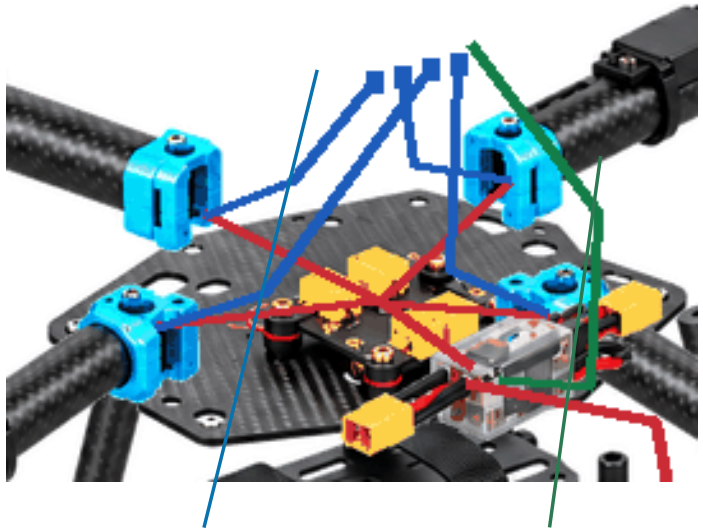
- **动力主路：**电池、USB等电源断开并核对极性；PM主路接PDB的XT60，四电调接XT30分支，电池插头仍留空。
- **低压支路：**PM02D六芯线预留至POWER1，传送稳压供电与数字测量。

动力主路接配电板，低压支路预留给飞控，接线时电池保持断开。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：合板紧固

布线检查与上板闭合

合板前：预留线示意



臂根夹持面



此照片已合板

线束避开夹持面

图：合板前预留线与臂根夹持部位

- **1. 预留线束：**复查PDB隔离，引出四路电调信号线与POWER1线，避开螺孔和夹持面。
- **2. 合板紧固：**四臂与上下板全部对齐后，按说明逐步紧固16套M3×38螺钉及法兰锁紧螺母。
- **3. 装后检查：**四臂不松转、板件不翘、线缆无夹压，接头及预留线仍可访问。

内部线束先避开夹持面，四臂与上下板共同对齐后再完成最终紧固。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：飞控安装

6X的位置、方向与固定



图：6X方向标记与机头方向

- **1. 位置方向：**6X置于顶板中央、接近重心，顶面向上、箭头指向两支前臂之间（X字型），并留插拔空间。
- **2. 固定隔振：**清洁安装面，按厂家要求用胶垫固定；飞控不滑移，线束留松弛。
- **3. 断电连接：**将预留六芯线接入POWER1，核对底板标识与插头到位，接口不受拉。

飞控朝向与机头建立方向对应，稳固安装和松弛线束减少额外扰动。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：定位模块安装

GNSS支架、罗盘与GPS1连接

安装关系示意



平台板侧固定底座

标记朝机头



安全开关

10针线接底板GPS1口

图：平台板安装关系与官方GPS朝向

- **1. 固定支架：**支架连接平台板指定孔位；模块天线朝上、标记朝机头，底座不松。
- **2. 安装环境：**模块内含测航向的磁罗盘，远离PM、电调和动力线；天线上方无遮挡。
- **3. 断电接线：**本例串口GNSS用匹配线接GPS1；线缆固定、接口不受拉，开关可操作、指示灯可见。

定位模块安装兼顾朝向与磁环境，接线对应实际模块及接口。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：通信与存储安装

遥控、数传与记录介质的安装



- **遥控：**接收机经SBUS（单线传多路通道）把摇杆与开关指令送入RC IN。
- **数传：**SiK电台成对使用，机载端接TELEM1，与地面站双向传状态与参数。
- **存储：**microSD卡记录飞行日志；断电检查，未装时插入6X卡槽。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：物理端口与逻辑电机

把MAIN/AUX端口对应到Motor编号

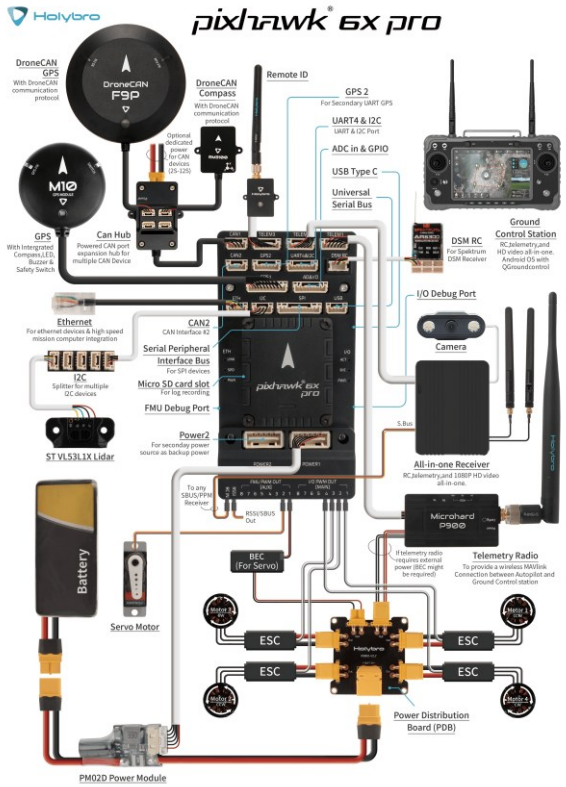
6X底板标识	PX4物理输出组	本例连接
FMU PWM OUT	AUX	AUX1–4接四个电调的信号与地
I/O PWM OUT	MAIN	本例未占用；用途由功能分配决定

- **信号与地：**FMU是主处理器，I/O是协处理器；电调信号与GND按底板针脚接。
- **逻辑映射：**Motor 1–4是电机功能，结合构型与接线分配，再无桨逐路核对。
- **独立电源轨：**输出排针“+”排给舵机等负载供电，POWER1/2不为它供电；电调动力来自PDB，舵机另需匹配电源。

物理端口与逻辑电机分别命名，功能映射把接线对应到实际电机。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：官方接线拓展

Pixhawk 6X Pro拓展接线示例



- **型号范围：**图示为6X Pro的可选外设总览；本节样机使用6X标准底板，针脚与接法按实际底板核对。
- **供电与输出：**POWER连接电源模块，PDB给电调供电；PWM是控制信号，舵机需匹配电源。
- **可选扩展：**定位、数传、遥控与任务计算机按任务选配，不要求把图中设备全部装上。

PX4官网：接线图、装配与底板针脚定义

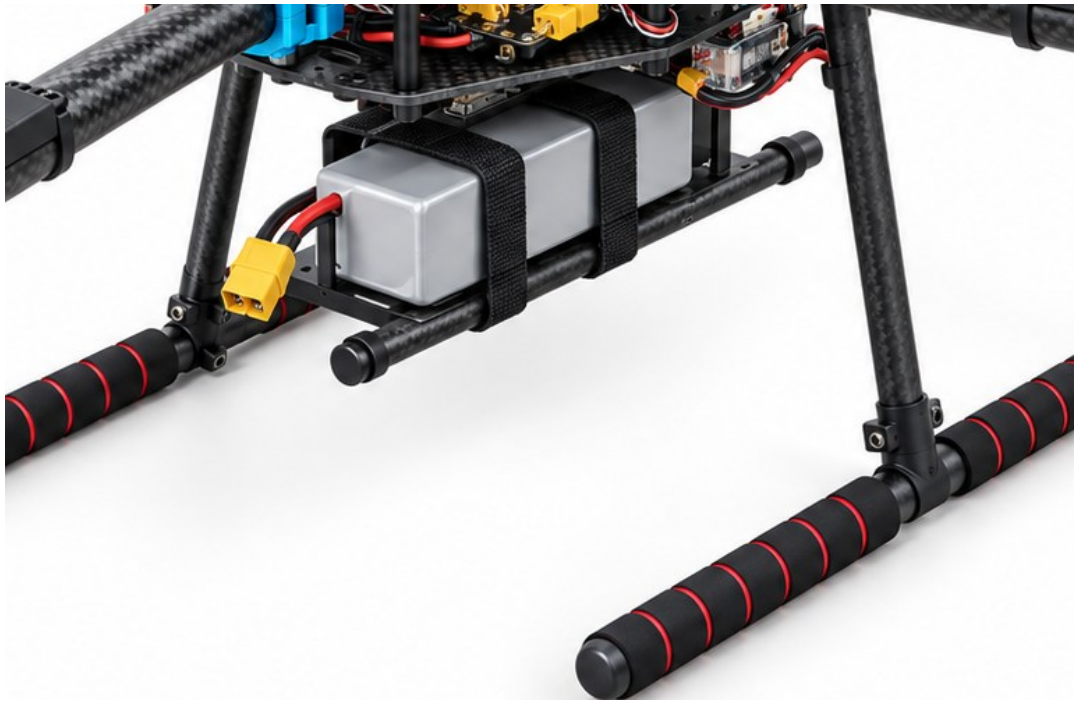
https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/pixhawk6x_pro

图：6X Pro官方接线图（Holybro / PX4）

官方接线图把飞控端口对应到外设，具体连接以本机底板和针脚定义为准。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：电池与整机布局

电池固定、重心与线束终检



图：电池、绑带与托板示意图

- **1. 调整位置：**承托可靠后，沿导轨调前后位置；左右偏重查布局。
- **2. 最终固定：**电池贴防滑垫，双绑带与托板均锁定；轻推不滑移，主插头仍断开。
- **3. 线束终检：**线束、天线与支架避开桨盘，断电转钟罩无擦碰。

电池位置改变整机重心，双绑带与托板锁定共同限制电池位移。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：上电前初检

断电检查与首次上电条件

- **无源与无桨：**断开电池、USB及其他供电，确认四台电机均无桨，输入电容按设备说明放电后再测电阻。
- **结构与连接：**轻摇机臂、起落架和电池应不松动（装配强度校验）；复查PDB隔离、插头锁扣与极性，无裸露导体、金属碎屑或夹线。
- **明显短路初检：**用万用表电阻或通断档检查总输入正负端；持续低阻需分支排查，短暂鸣响可能来自电容充电。
- **进入上电：**解释并处理测量异常，记录结构和接线检查结果，清点工具及剩余紧固件，再转入受控上电。

断电初检核对结构、极性与明显短路，测量现象结合电路逐项解释。

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线：首次无桨上电

首次上电与设备状态观察

- **准备状态：**整机放在稳固绝缘台面，确认无桨、未解锁，预留可操作的断电位置，手和工具避开电机。
- **接通主电源：**暂不接USB，接通已核对的4S主供电；也可先用可设电流上限的直流电源按4S电压限流上电，短路时电流被限住，上限须够启动。
- **观察启动：**对照实际硬件和固件说明核对飞控、外设指示，记录是否正常启动、供电稳定或反复重启。
- **异常停止：**出现异味、冒烟、异常升温或反复重启，停止检查并按预定方式断电，查清原因后再试。

首次无桨上电核对启动与供电，动力负载表现仍需后续验证。

本章目录

无人机的装配、调试与试飞

第一章　绪论

1.1　概念分类与应用

1.2　发展历程与趋势

1.3　组成与架构

1.4　坐标系与控制原理

1.5　装配与调试

1.6　RflySim工具链

1.7　学习路线与实验案例

1.8　习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

1.5.1 组件连接与样机组成　教材第1.3.1节

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线　教材1.3.1–1.3.2节

1.5.3 调试与实验（地面验证）　教材第1.3.3节

1.5.4 调试与实验（首飞复查）　教材第1.3.3节

1.5.5 固定翼装配与调试　教材第1.3.1–1.3.3节

1.5.3 调试与实验（地面验证）：调试与实飞步骤

从固件烧录到实飞测试的两列步骤

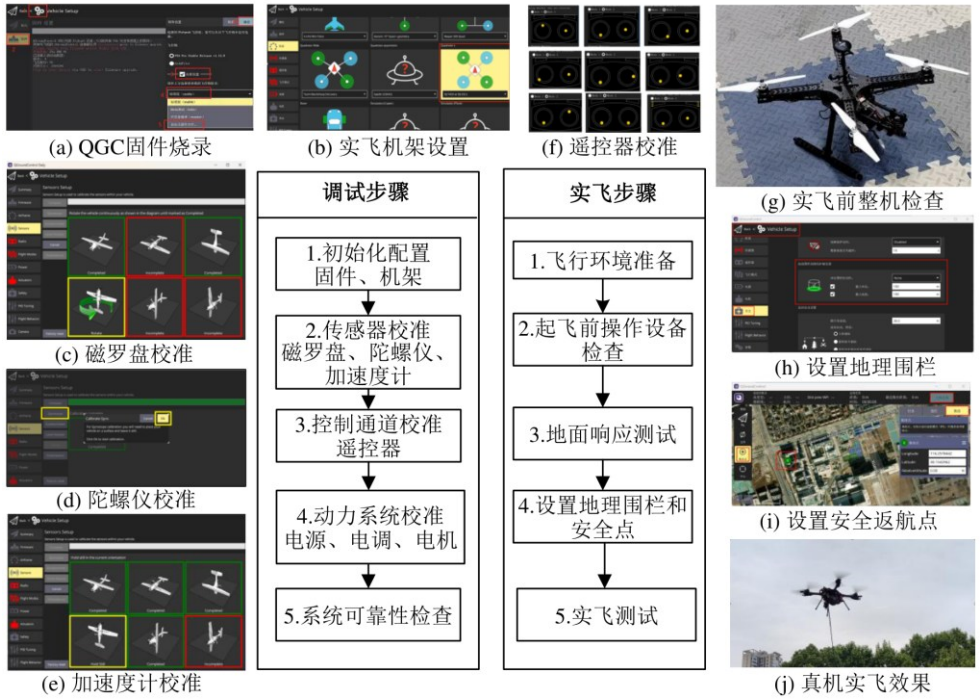


图1.16 调试与实验步骤

- **调试步骤：** 固件与机架→传感器校准→遥控器校准→动力系统校准→可靠性检查。
- **实飞步骤：** 环境准备→起飞前检查→地面响应测试→设置地理围栏与安全点→实飞。
- **地理围栏：** 圆柱围栏示例以固件Home点为中心限定半径与高度，越界后告警、悬停、返航或降落。
- **对应关系：** 左列在本单元逐项展开，右列在首飞单元展开。

地面调试让配置对应实物，实飞前还要设好围栏与返航点，再逐级放飞。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：连接与调试入口

地面站连接与无桨调试预演

无桨地面验证

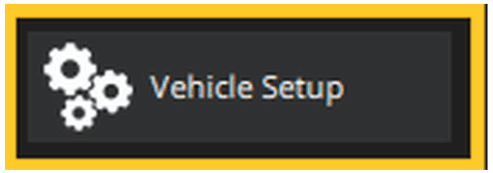
X500 V2 + 6X 示意

无桨整机：机头朝左



先断开动力电池

官方界面示例



USB数据连接

读取参数，观察状态

无桨连接 → 姿态核对 → 遥控输入 → 输出映射 → 响应记录

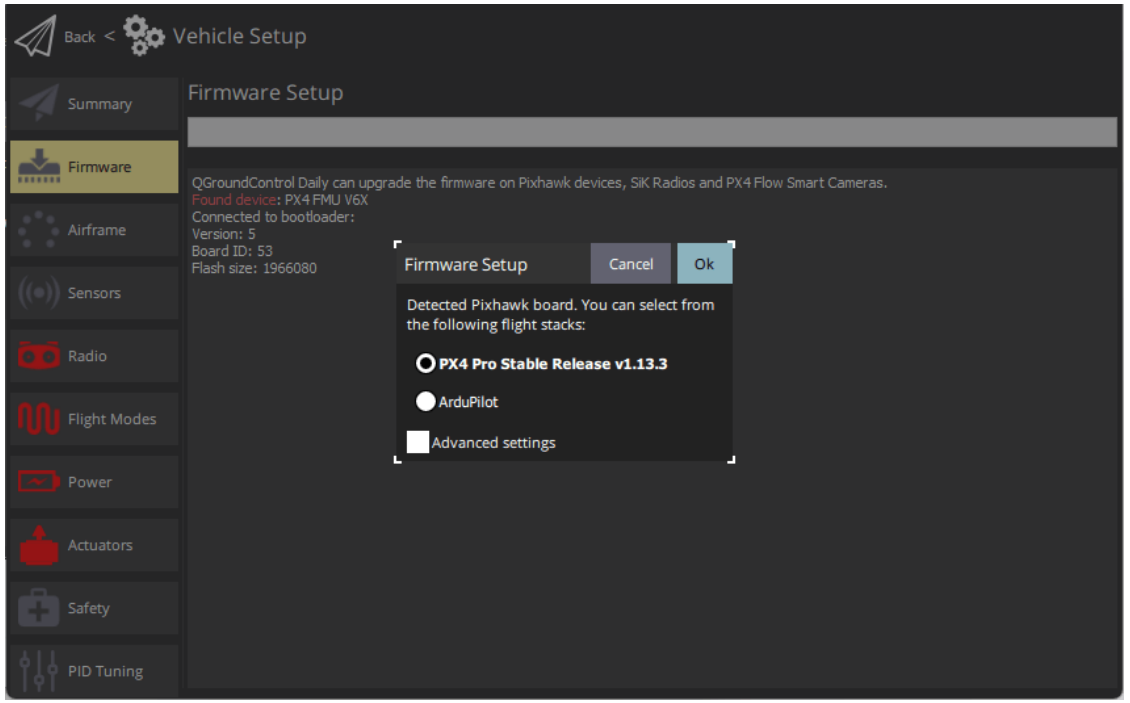
图：无桨地面验证示意图

- **地面站：**无桨、动力电池断开；USB数据线直连6X，打开QGroundControl（QGC）。
- **配置入口：**识别机体、读完参数后进入飞行器设置，先查姿态与遥控输入。
- **电机验证：**放稳整机，按流程给电调供电后，无桨逐台点动并记录响应。

地面站把实物动作与飞控状态联系起来，配置后还要观察响应。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：硬件与软件组合

实际硬件、固件与地面站记录



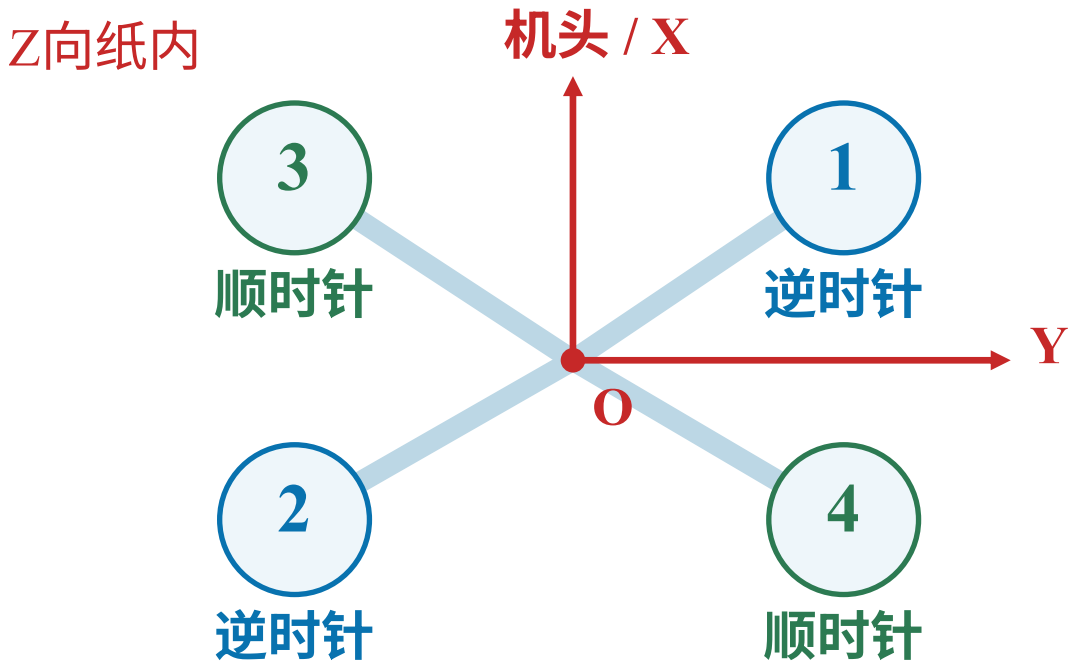
图：QGC固件页识别6X并选择PX4

- **教学组合：**同名6X的底板与修订版，接口和电源模块支持可能不同；本例为标准底板配PM02D。
- **实际记录：**登记飞控、底板、电源模块及外设修订，保存实际PX4、QGC版本和配置日期。
- **固件刷写：**断电池、存参数，进QGC固件页再插USB，识别板卡后选PX4版本；刷后复核配置。

硬件修订与固件共同决定配置方法，实际组合是复查的依据。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：机架预设与电机几何

选择X形四旋翼预设，核对机头与电机位置



图：顶视机体坐标与逻辑电机号

- **机架选择：**选择所用固件支持的X500 V2预设，核对四台电机的X构型及实际机头方向。
- **几何基准：**机体坐标X向前、Y向右、Z向下；对角两台同向、相邻两台反向，反扭矩相互抵消。
- **编号映射：**逐个核对逻辑电机号、实物位置及旋向，再对应输出端口；预设不能代替实物验证。

机架预设定义电机几何，输出映射还要逐一对应实物位置。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：朝向与静止校准

飞控安装方向与陀螺仪零偏



图：陀螺仪静止校准步骤

- **安装朝向：**核对6X方向标记与机头关系，配置飞控相对机体的实际朝向。
- **静止校准：**陀螺仪静止平均读数的偏差称零偏；整机放稳、电机保持停转后校准。
- **姿态核对：**传感器就绪后抬头、滚转，显示须对应实际动作；方向不符先查朝向，漂移先查扰动。

正确朝向让测量对应机体运动，静止校准建立转动零点。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：加速度与水平基准

加速度计六面校准与水平基准



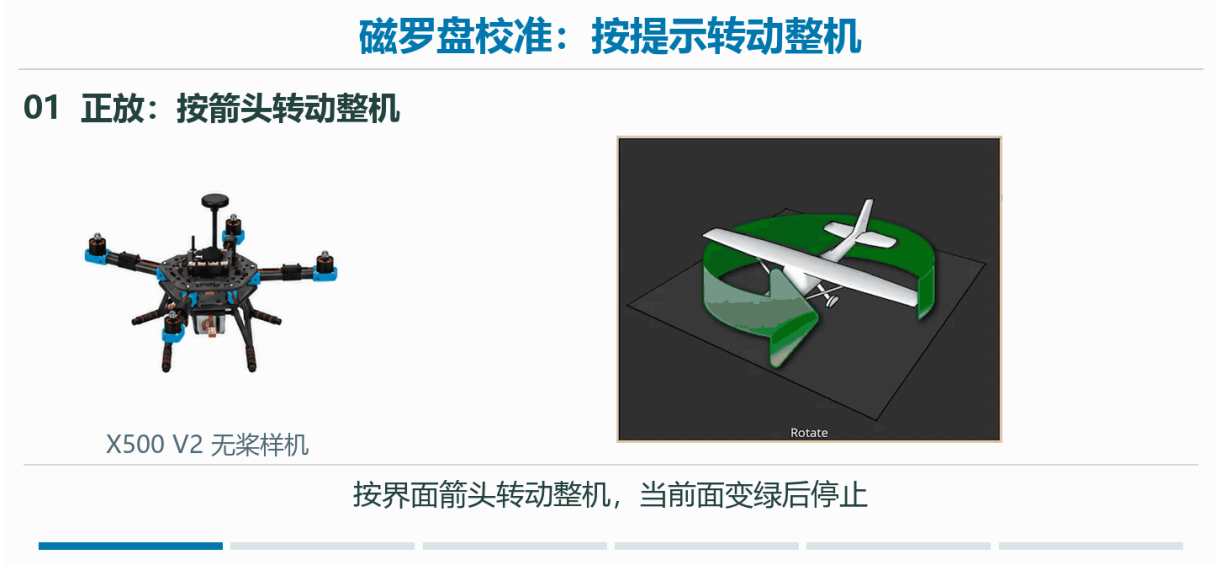
图：六面采样与水平校准步骤

- **六面校准：**朝向设置后按六个姿态静止采样，修正加速度测量的偏差与比例。
- **地平校准：**以可靠水平支承和机体基准摆正，再校准小安装偏差；不能替代朝向设置。
- **结果核对：**分别改变俯仰、滚转再摆平，显示应对应实际姿态，并返回水平基准。

六面校准建立加速度测量基准，水平校准修正小安装偏差。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：航向与定位

磁罗盘校准与卫星定位状态



Fly视图 → GPS图标 → 定位解与质量

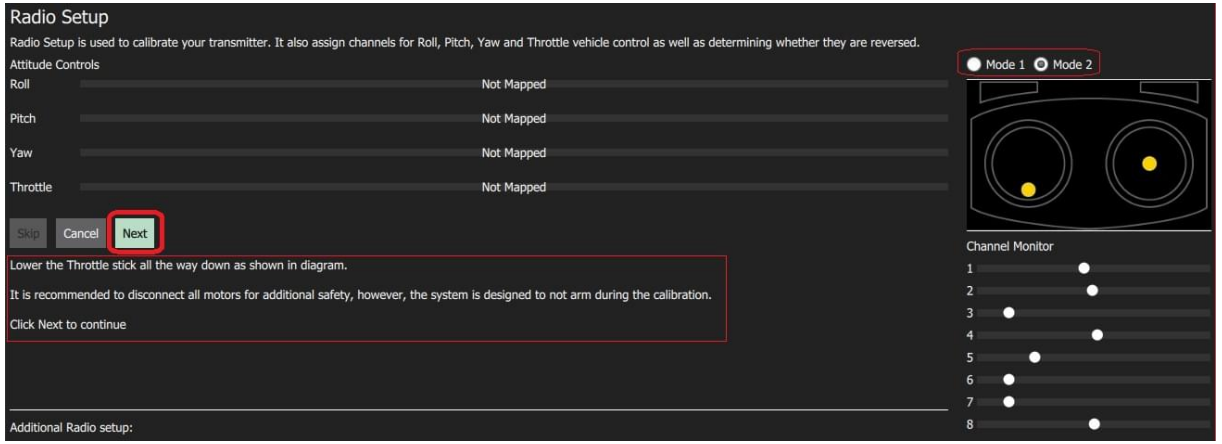
图：磁罗盘校准与GPS状态入口

- **航向校准：**远离钢结构与强磁干扰，无桨停机，按向导转动整机并核对航向。
- **定位解：**点GPS图标查看定位解；水平精度因子（HDOP）反映卫星几何，无量纲。
- **估计状态：**点左上角就绪状态看位置相关检查，核对当前模式；航向与位置分别判断。

磁罗盘与卫星定位提供不同信息，航向和位置须分别核对。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：遥控输入

遥控对频、通道与端点校准



图：遥控通道校准界面示例

- **对频接入：**按遥控器说明完成SBUS接收机对频，经RC IN接入飞控，先确认链路有效。
- **通道行程：**逐一核对滚转、俯仰、偏航和油门的方向、中位与端点，单独确认油门最低位。
- **开关对应：**逐档观察开关通道，记录档位再分配模式及解锁功能；不同遥控器不套固定通道号。

遥控校准把摇杆行程转换成正确输入，开关功能还要单独映射。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：模式与输入含义

飞行模式与松杆响应

模式	滚转、俯仰与油门	松杆后的响应	估计前提
自稳	倾角；总推力	回水平，仍需控高度与漂移	姿态有效
定高	倾角；升降速度	油门回中保高，水平可漂移	姿态、高度有效
定点	水平加速度或速度；升降速度	制动后保持位置和高度	姿态、高度、位置有效

- **开关核对：**逐档确认QGC显示的实际模式（自稳Stabilized、定高Altitude、定点Position）；偏航杆给出转向速率。

飞行模式改变摇杆含义，松杆响应取决于控制目标与估计条件。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：执行器输出映射

把电机功能分配到端口，并匹配输出协议

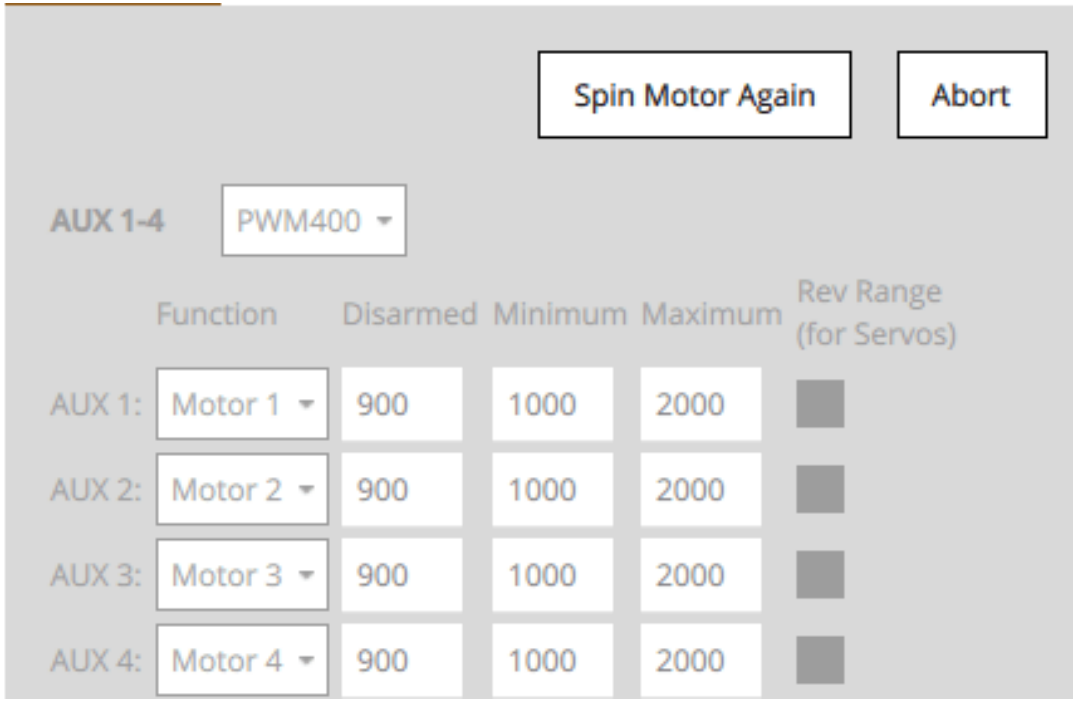
电机功能	物理端口	协议
Motor 1	FMU1/AUX1	PWM
Motor 2	FMU2/AUX2	PWM
Motor 3	FMU3/AUX3	PWM
Motor 4	FMU4/AUX4	PWM

- **输出分配：** AUX由主处理器FMU直接输出、延迟更低，PX4推荐电机接AUX；表中映射须逐台验证。
- **PWM：** 1000–2000 μs脉宽对应最低到最高指令；同一定时器组须同协议、同速率。
- **DShot：** 以数字量发送油门，免端点校准；需电调支持并接FMU通道，旋向仍须核对。

逻辑电机经映射连接物理端口，协议条件由硬件和电调共同限定。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：无桨逐电机测试

逐台低速点动，核对编号、位置与旋向



图：QGC执行器页的电机识别界面

- **无桨准备：**拆桨放稳，清空旋转范围后给电调供电；测试逐台低速点动。
- **顶视核对：**以机头为前，从机体上方核对逻辑编号与旋向，记录实物位置及启停响应。
- **异常返回：**启动须平顺、停机须有效；位置或旋向不符即停测，插拔换线前断开电池和USB。

逐个点动核对实际电机，位置、旋向和启停都要与配置相符。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：无桨逐电机测试

点动异常：先查位置，再查旋向

无桨点动：位置 / 旋向

顶视

Motor 1



先核编号与旋向

停测 → 断电 → 修正 → 复测

- **位置错：**点1却是2转；断电查映射与插口。
- **旋向错：**点3反转；断电按电调说明换向。
- **复测：**无桨低速点动，核位置、俯视旋向和停机。

图：无桨点动异常判读（顶视示意）

位置或旋向异常先停测断电，修正后再无桨低速复测。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：数字电源测量

数字电源模块识别与电池读数



图：PM02D数字电源模块

- **数字识别：**核对PM02D修订、接线与固件识别；仅识别失败时按芯片和固件检查驱动。
- **读数核对：**按电池资料配置串数、容量与阈值，用仪表对照电压，观察无桨点动的电流变化。
- **异常分流：**无读数查连接和驱动；电压、电流合理而电量估计异常，再查电池配置。

先确认数字电源模块测量可信，再用电池配置估算剩余电量。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：保护与返航条件

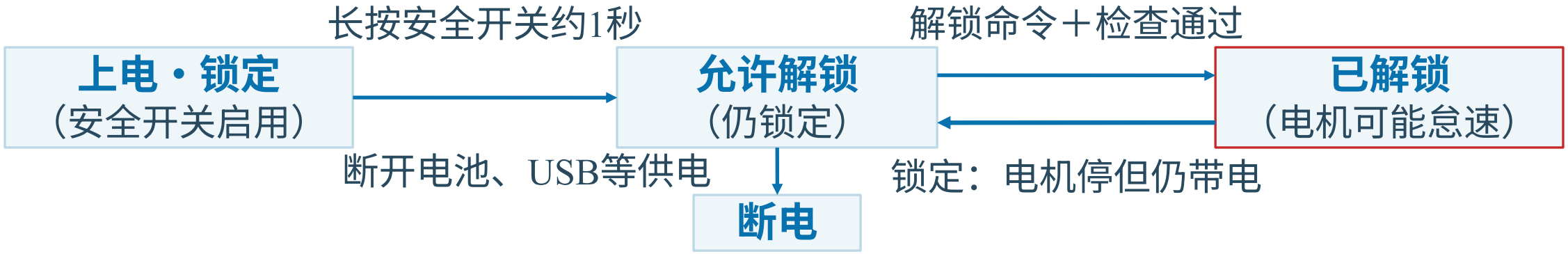
失联、低电量与返航条件

- **遥控失联：**接收机须让PX4识别信号丢失或失效；保持上次有效通道值可能掩盖失联。
- **数传失联：**SiK中断属于地面站链路丢失，与遥控分开核对触发延时、适用模式和保护动作。
- **低电保护：**按电池估计与保护级别设置警告、返航或降落，为返回及落地保留余量。
- **返航与验证：**核对返航目标、位置估计、高度及其基准、障碍与余电；用仿真或合适无桨方法验证。

失效保护依靠正确检测与可执行动作，返航还取决于位置和余电。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：安全许可与解锁

安全开关、解锁与模式切换



- **安全开关：** 启用时提供解锁前的安全许可；解除安全锁定不等于电机已解锁。
- **解锁状态：** 命令被接受且检查通过后，电机可能转动；重新锁定也不等于断电。
- **模式切换：** 改变控制目标和估计条件；以飞控实际接受的当前模式为准。
- **拒绝解锁：** 读取失败项，排查供电、传感器、遥控与模式前提，修复后重新检查。

安全许可、解锁和模式各有作用，状态确认后才能进入相应操作。

1.5.3 调试与实验（地面验证）：验证记录与首飞准入

地面记录与进入首飞的条件

- **记录对象：**日期____ 配置/固件____ 项目____；改线或改参数后保留版本。
- **日志与准入：**保存日志文件和时段；试录可读、异常复验合格后进入首飞准备。

记录格式示例：无桨点测Motor 1（留空项由实验填写）

预期 配置中的实物位置____；顶视旋向____；停止命令应有效。

观察 实际转动位置____；旋向____；启动/停机表现____。

判断 与预期一致 / 不一致____；异常现象与相关通路____。

复验 断电后处理____；再次点测结果____；日志/记录编号____。

本章目录

无人机的装配、调试与试飞

第一章　绪论

1.1　概念分类与应用

1.2　发展历程与趋势

1.3　组成与架构

1.4　坐标系与控制原理

1.5　装配与调试

1.6　RflySim工具链

1.7　学习路线与实验案例

1.8　习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

1.5.1 组件连接与样机组成　教材第1.3.1节

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线　教材1.3.1–1.3.2节

1.5.3 调试与实验（地面验证）　教材第1.3.3节

1.5.4 调试与实验（首飞复查）　教材第1.3.3节

1.5.5 固定翼装配与调试　教材第1.3.1–1.3.3节

1.5.4 调试与实验（首飞复查）：首飞顺序预演

起飞、悬停、移动与降落预演

四旋翼首飞预演

轨迹与旋桨示意

前提：地面验证、装桨及飞前检查通过

检查通过

再起飞



地面示意

检查通过 → 起飞 → 稳悬 → 小幅移动 → 降落锁定 → 断电复查

图：四旋翼首飞流程示意图

- **起飞准备：**地面验证、装桨和飞前检查完成，由有经验人员现场指导。
- **逐段验证：**起飞短时悬停，正常后再小幅移动和转向；留足降落电量。
- **受控收尾：**按计划降落；异常即停止扩展，可控时尽快降落，锁定停转、断电后复查。

首飞逐段增加动作，每段观察结果决定继续试验还是结束降落。

1.5.4 调试与实验（首飞复查）：螺旋桨与场地准备

地面验证后的装桨与场地准备



图：完成无桨验证后的装桨示意图

- **断电装桨：**地面验证后断开电池、USB等电源，按电机旋向选桨并核对安装朝向。
- **固定检查：**按套件说明锁紧桨座与防脱扣，检查松动、损伤和桨盘干涉；不只凭颜色装桨。
- **场地准备：**空旷场地和风况须适合样机与操作者，明确降落区域，人员退出旋翼作业范围。

地面验证完成后断电装桨，桨型、旋向、固定与场地一并核对。

1.5.4 调试与实验（首飞复查）：飞前状态与操控准备

检查机体、链路、保护设置与现场条件

- **机体与电池：**复查螺旋桨、紧固件、重心和线束；电池固定可靠，电量与健康状态适合本次任务。
- **操控与链路：**确认遥控有效、油门在所需起始位，起飞模式、模式切换与停机操作已明确。
- **定位与保护：**核对估计条件、返航点与返航高度、地理围栏范围及保护动作，消除飞前失败项。
- **现场确认：**操作者与观察员明确分工、停止条件及降落区域，确认日志可用、飞行区域无人进入。

飞前检查把机体状态、控制方式和现场条件落实到本次飞行。

1.5.4 调试与实验（首飞复查）：首次离地与悬停

首次起飞与短时悬停观察



图：四旋翼飞行构型示意图

- **起飞观察：**由有经验人员指导，起飞后短时悬停，观察姿态、偏航、振动及电源警报。
- **模式判据：**定点应制动并保持位置；自稳或定高可受风漂移，观察须结合当前模式。
- **异常处置：**出现异常便停止扩展动作，仍可控时尽快降落；落地后排查，不在空中改参数。

短时悬停观察真实负载下的状态，并按当前模式判断异常。

1.5.4 调试与实验（首飞复查）：小幅操纵与恢复

小幅操纵与响应验证



图：四旋翼飞行构型示意图

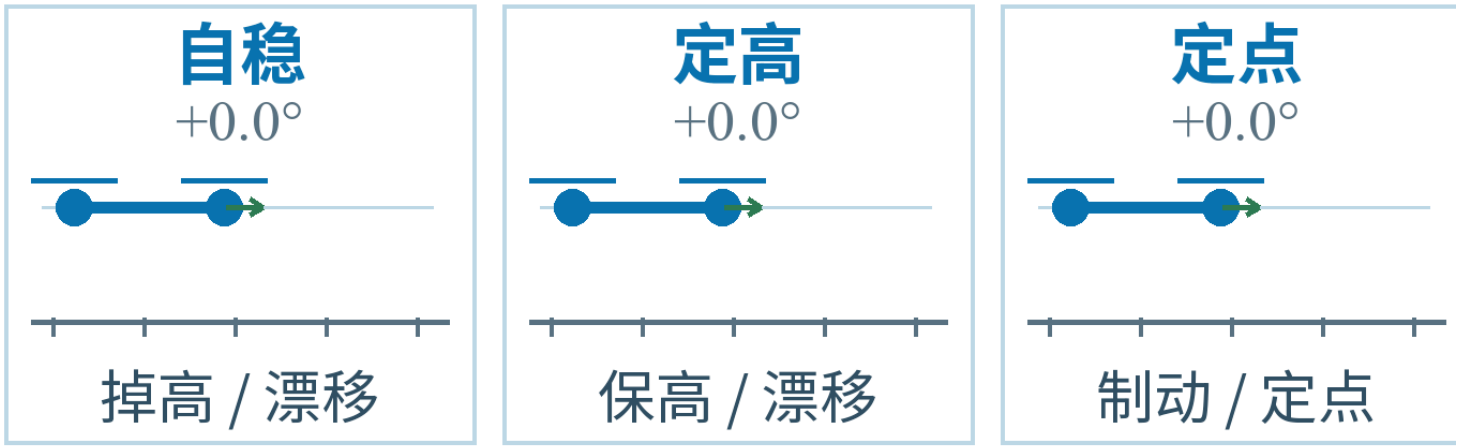
- **逐项操纵：**悬停正常后逐一加入小幅滚转、俯仰、偏航及升降输入，每次只验证一项。
- **方向恢复：**以机头为参照核对方向，按当前模式观察回水平、保高或制动定点。
- **继续条件：**前项稳定再继续；持续振荡、反向响应或警报时结束尝试，首飞只做基本操纵。

一次验证一个小幅指令，方向和恢复符合预期后再扩大动作。

1.5.4 调试与实验（首飞复查）：小幅操纵与恢复

松杆后分别看回平、保高与定点

松杆后：水平 / 高度 / 位置



- **自稳：**松杆回平，可能掉高且漂移。
- **定高：**松杆回平、保高，仍会漂移。
- **定点：**反倾制动，再迎风停住。

图：三种模式松杆响应（教学简化）

松杆后的恢复判据随模式不同：回平、保高与制动定点逐级增加。

1.5.4 调试与实验（首飞复查）：降落与结束供电

降落、锁定、停转与断电

- **准备下降：**回到预定降落区域，控制水平运动，再按当前模式平稳下降。
- **着地确认：**确认机体稳定着地；按已验证方式锁定，自动锁定须核对实际状态。
- **停转后接近：**确认四台电机完全停转再接近；油门最低、已经着地都不等于已锁定。
- **结束供电：**正常停机后按本机流程结束日志、等待写入，再断开各路电源，最后关闭遥控器。

降落以稳定着地、锁定和停转为判据，确认后再接近并断电。

1.5.4 调试与实验（首飞复查）：飞后复查与问题定位

飞后结构、电源与日志复查

- **结构检查：**断电后检查桨、机臂、紧固件、飞控与线束固定，记录松动、擦碰或位移。
- **电源检查：**检查电池状态及电机、电调、接头的异常温升；与飞行中的电压、电流变化对照。
- **日志对照：**按异常时刻查看模式、输入、姿态目标与响应、振动及电源记录，不凭单一曲线定因。
- **修正复验：**把问题返回装配、测量、配置或控制环节；每次只改相关项，再做对应无桨验证。

飞后把实物现象与日志按时间对照，修正原因后再验证和复飞。

本章目录

无人机的装配、调试与试飞

第一章　绪论

1.1　概念分类与应用

1.2　发展历程与趋势

1.3　组成与架构

1.4　坐标系与控制原理

1.5　装配与调试

1.6　RflySim工具链

1.7　学习路线与实验案例

1.8　习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

1.5.1 组件连接与样机组成　教材第1.3.1节

1.5.2 四旋翼装配步骤与接线　教材1.3.1–1.3.2节

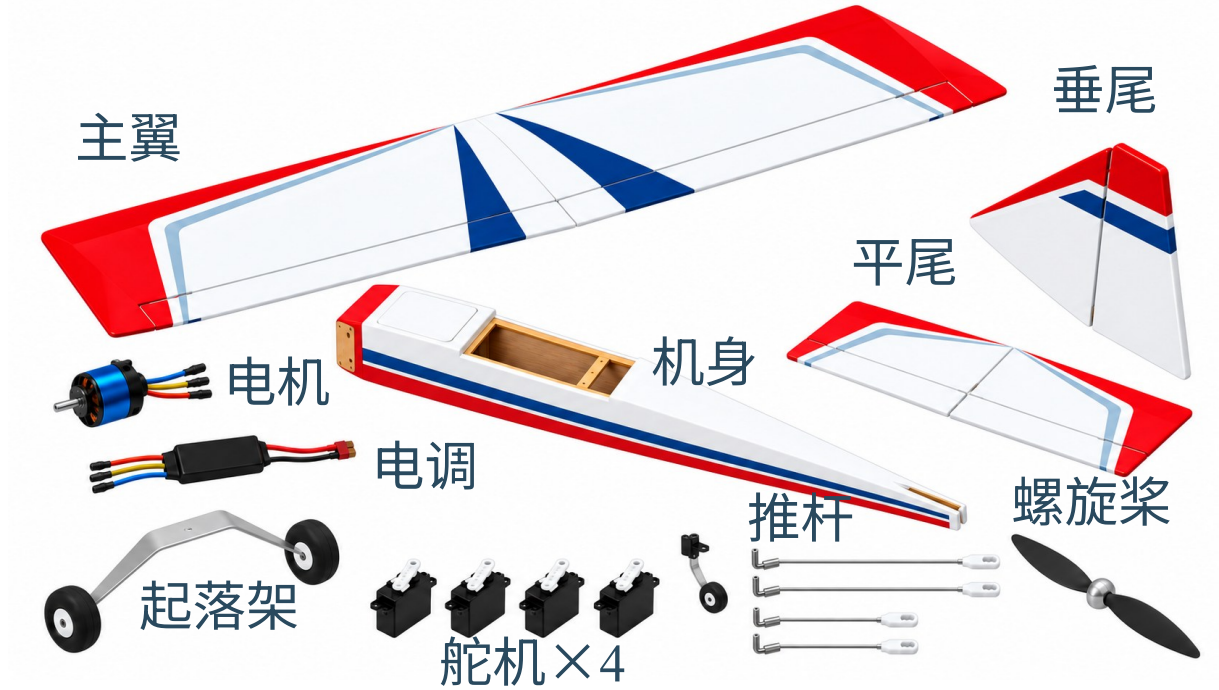
1.5.3 调试与实验（地面验证）　教材第1.3.3节

1.5.4 调试与实验（首飞复查）　教材第1.3.3节

1.5.5 固定翼装配与调试　教材第1.3.1–1.3.3节

1.5.5 固定翼装配与调试：整机与舵面

UltraStick 25e的整机与部件



图：UltraStick 25e部件示意图

- **整机构型：**高翼、前拉式单电机、常规尾翼；起落架支承机身并提供螺旋桨离地空间。
- **四路舵面：**左右副翼各用一只舵机，升降舵和方向舵各一只，经连杆控制滚转、俯仰与偏航。
- **教学改装：**飞控、GNSS、数传与空速传感器为课程加装，布局兼顾重心、布线和活动空间。

固定翼靠前拉动力推进，以副翼和尾部舵面改变姿态。

1.5.5 固定翼装配与调试：装配预演

由机翼、尾翼与起落架组成整机

Ultra Stick 25e **固定翼装配**



先无桨装配与检查，再验证并装桨

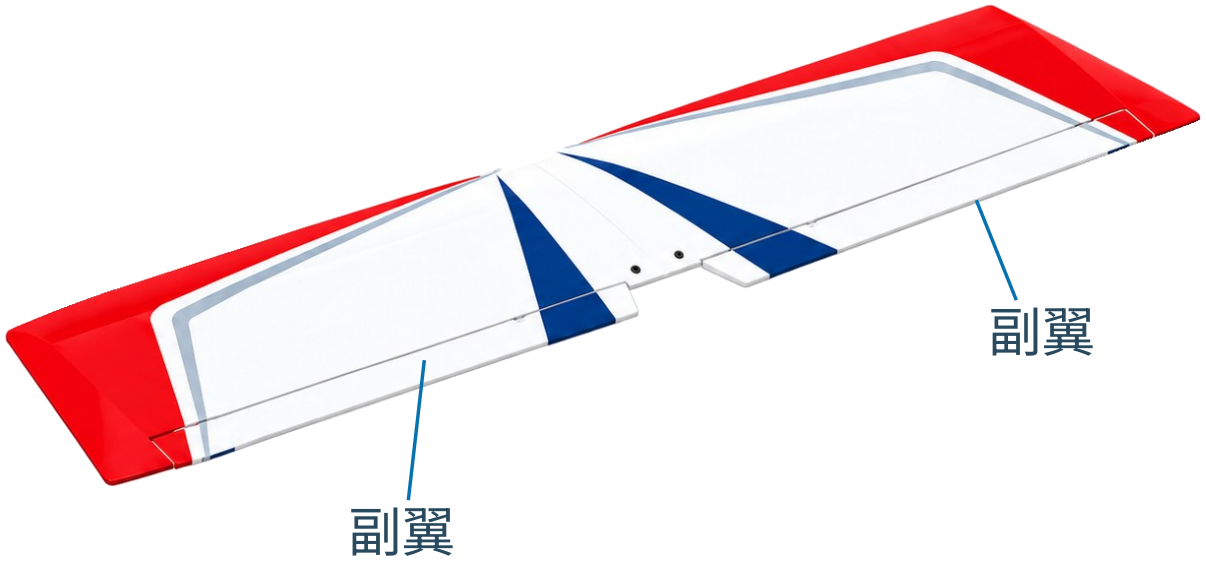
图：固定翼装配与成机示意图

- **支承与翼尾：**断电无桨安装动力和起落架，预装尾翼；装主翼后对齐紧固。
- **连杆传动：**摇臂与推杆连接舵角，供电和中位核实后再定长锁固。
- **验证与装桨：**核对重心、间隙与线束；无桨验证舵面和动力，通过后断电装桨。

翼尾对齐、传动检查与无桨验证完成后，再断电安装螺旋桨。

1.5.5 固定翼装配与调试：主翼与起落架连接

主翼定位、起落架紧固与引线检查



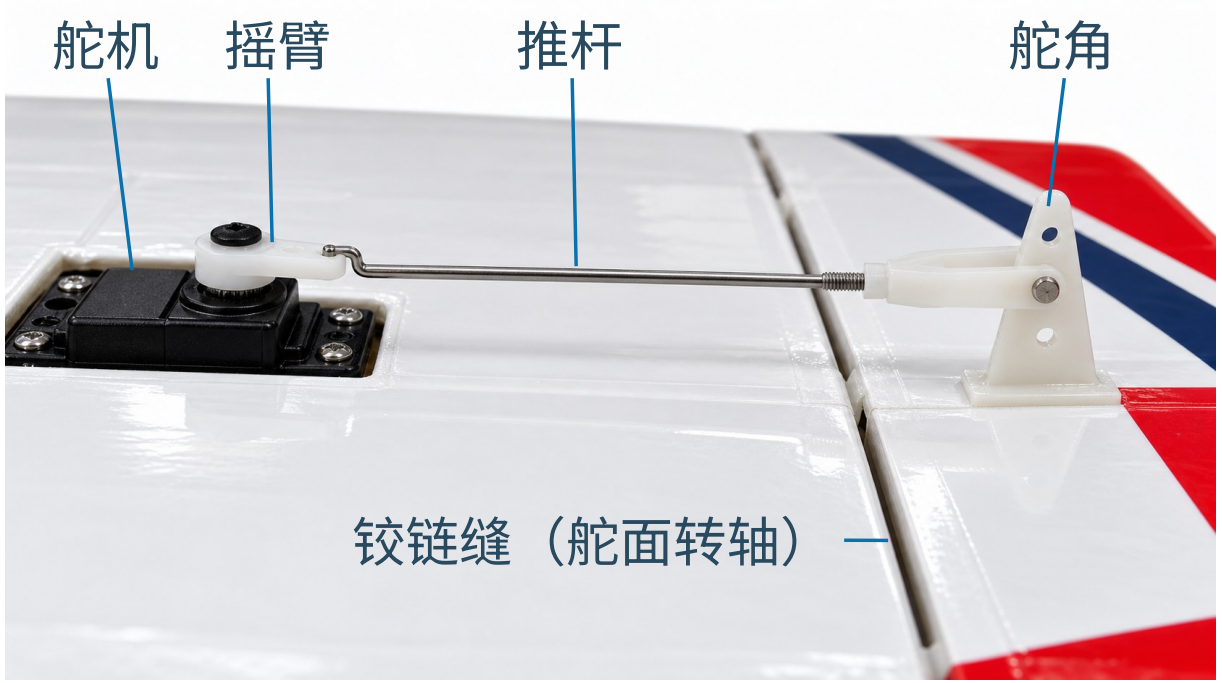
图：主翼与副翼舵面示意图

- **主翼连接：**先接副翼引线，再将定位销入孔；用原厂两枚螺栓和垫圈紧固，安装面贴合且不夹线。
- **起落架：**按原厂孔位方向用三枚螺钉固定，检查机身支承正常、轮子转动顺畅。
- **装后检查：**主翼与尾翼对齐后最终紧固；引线留有余量，避开舵面和连杆，装拆后复查响应。

主翼定位与紧固共同保证连接可靠，装回时还要核对副翼引线。

1.5.5 固定翼装配与调试：尾翼与传动连接

尾翼、舵机摇臂与连杆



图：摇臂、推杆与舵角示意图

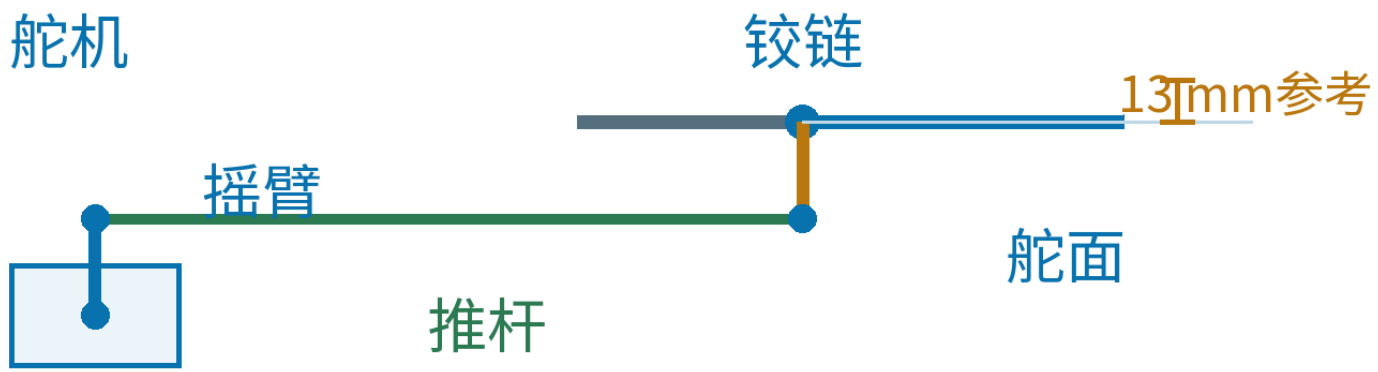
- **尾翼与传动：**尾翼按原厂螺纹杆、垫圈和锁紧螺母连接；摇臂经推杆与舵角带动舵面绕铰链偏转。
- **中位与杆长：**无桨、动力隔离，核实供电与输出后给中位，再断电调整摇臂和杆长。
- **牢固与行程：**核对铰链、连杆牢固，无桨复电查回中及两端行程，无卡滞、顶死或明显虚位。

舵机中位与连杆长度共同确定舵面中立，全程顺畅才能准确传力。

1.5.5 固定翼装配与调试：尾翼与传动连接

中位、杆长与舵面行程如何相连

中位、杆长、行程



- **中位**：本模型取1500 μs；实机核对中位后断电调杆长。
- **行程**：后缘单侧13 mm为示意值。
- **限位**：推杆弯曲或振动即停，缩小行程。

本例中位 1500 μs：后缘 0

图：四连杆运动与舵面行程（教学模型）

中位先对齐，杆长断电调，行程到机械限位前必须停止。

1.5.5 固定翼装配与调试：飞控改装与机型

固定翼飞控安装与机型配置



图：UltraStick 25e机舱改装示意图

- **改装安装：**6X在机舱内靠近重心固定，箭头朝机头；定位通信设备避开动力干扰，线束避开连杆。
- **机型与几何：**选常规尾翼固定翼，配置一个推进电机及左右副翼、升降舵和方向舵四路舵面。
- **共性验证：**无专用预设时从通用标准固定翼配置，沿用共性检查并重新核对本机输入、输出和测量。

固定翼机型、安装朝向与舵面几何必须对应同一架实物飞机。

1.5.5 固定翼装配与调试：舵机供电与输出映射

舵机供电与输出功能

逻辑功能	实物负载	6X物理输出
Motor 1	电调油门	FMU/AUX1
Servo 1	左副翼	I/O/MAIN1
Servo 2	右副翼	I/O/MAIN2
Servo 3	升降舵	I/O/MAIN3
Servo 4	方向舵	I/O/MAIN4

- **供电支路：**PM只供飞控POWER1；舵机另由免电池电路（BEC）降压后供MAIN排针“+”排。
- **共地与容量：**BEC负极与舵机地、信号地相连；额定电流覆盖四舵机同时动作的峰值，两路BEC正极不并联。
- **输出检查：**表为PWM教学接法，舵机常用50 Hz；无桨逐路核查，并看多舵机同时动作时的供电。

舵机供电与控制信号各有通路，输出映射把逻辑功能对应到实物。

1.5.5 固定翼装配与调试：重心与舵量基准

重心、中立位与舵面行程

舵面	原厂低舵量	测量方向
副翼	各13 mm	向上、向下
升降舵	各19 mm	向上、向下
方向舵	各51 mm	向左、向右



图：俯视翼根，机头朝上，自前缘向后测量

- **原厂重心：**翼根处前缘向后63.5 mm；偏后俯仰易失稳，偏前抬头费力。
- **原厂低舵量：**说明书给出的较小舵面偏转量，适合首飞；在舵面最宽处测后缘从中立位到单侧端点的位移。
- **实物复核：**先调机械中立再测两端行程；移动并锁定电池调重心。无桨验证通过后断电装桨，按完整飞行构型复核。

重心按完整飞行构型复核，舵量按本型号的测量基准实测。

1.5.5 固定翼装配与调试：输入方向与反馈方向

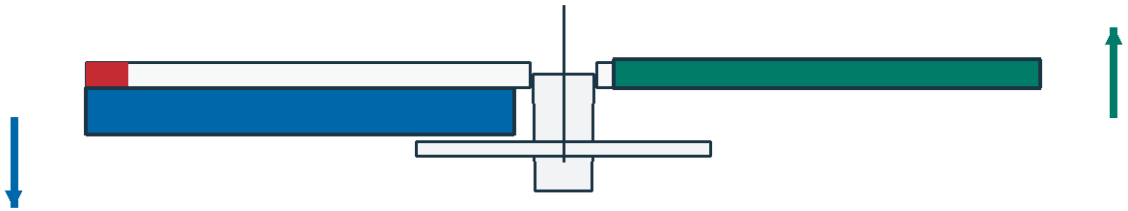
人工输入与自动修正的方向检查

手动模式：右滚输入



后视：左右按机体定义

机体不动，舵面响应人工指令



左副翼下偏　　**右副翼上偏**

无桨、动力隔离；舵机可预解锁输出；退出执行器测试

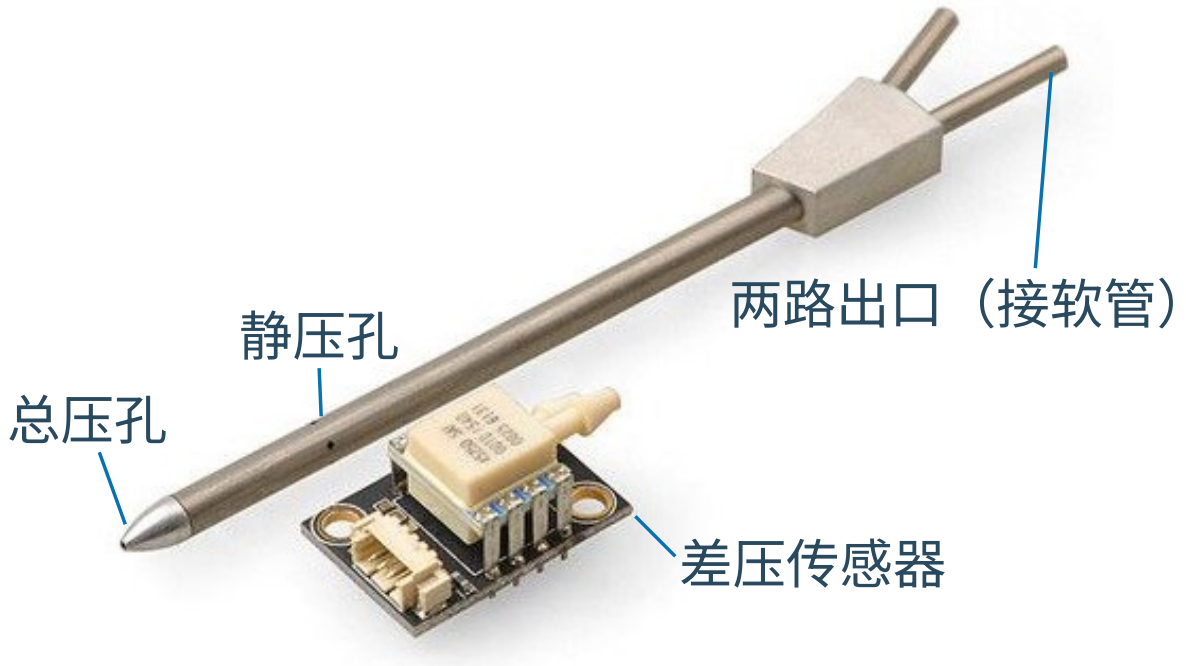
图：人工输入与自动修正示意图

- **测试条件：**无桨、动力隔离，预解锁舵机可动；退出执行器测试，确认模式。
- **手动输入：**机体不动，右滚与抬头指令产生同向作用，反向输入也要核对。
- **自稳修正：**姿态杆回中再施加扰动，检查恢复作用；偏航响应依具体配置。

人工输入检查期望运动，自动修正检查受扰后的恢复作用。

1.5.5 固定翼装配与调试：空速与取压检查

空速传感器与测量检查



图：差压传感器与空速管

- **空速与地速：**空速相对空气，地速相对地面；风使二者不同，空速影响升力与舵效。
- **取压与管路：**总压口迎流并避开桨流，静压口取环境静压；按设备标识接管，保持畅通无泄漏。
- **零偏与响应：**无桨停机，挡风不堵孔校准；轻微气流应使差压为正、空速增大，撤去后回落。

空速来自正确的取压与差压测量，地速不能替代气动状态检查。

1.5.5 固定翼装配与调试：空速与取压检查

差压怎样换算成空速

$$\Delta p = p_t - p_s = \frac{1}{2}\rho V^2$$

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

其中p_t为总压，p_s为静压，ρ为空气密度，V为空速。适用于低速、不可压缩气流的理想换算，忽略安装误差。

- **一步计算：** 取$\rho = 1.225\ \mathrm{kg/m^3}$，$\Delta p = 61\ \mathrm{Pa}$时$V = \sqrt{2 \times 61/1.225} \approx 10\ \mathrm{m/s}$。
- **零偏影响：** 5 m/s时差压只有约15 Pa，3 Pa零偏就使空速偏大约10%，所以要挡风校零。
- **接反判断：** 总压、静压管接反时差压为负，按设备标识对调管路后再测。
- **密度影响：** 同一差压在高原或高温时对应更大的真空速，飞控可用气压与温度估计密度来修正。

空速由差压开方换算，低速时差压很小，零偏和取压都要仔细检查。

1.5.5 固定翼装配与调试：固定翼放飞条件

固定翼试飞前的差异检查

- **飞行构型：**无桨验证完成后，断电装好匹配螺旋桨；以电池及全部改装件就位的构型复核重心、翼尾和连杆。
- **操纵与供电：**回查无桨验证记录：人工方向、自稳修正、中立与舵量通过，停机时舵面受控，多舵机动作时供电正常。
- **模式与保护：**确认空速、姿态与链路可用，按本机复查失联、低电量和返航设置，并核对返航航线、盘旋区及高度。
- **场地与预案：**核对跑道、风况、障碍和复飞空间，约定地面中止与空中接管，完成共性飞前检查及日志准备。

固定翼放飞需要舵面、重心和空速检查通过，并预留起降与复飞空间。

1.5.5 固定翼装配与调试：固定翼起降与航线

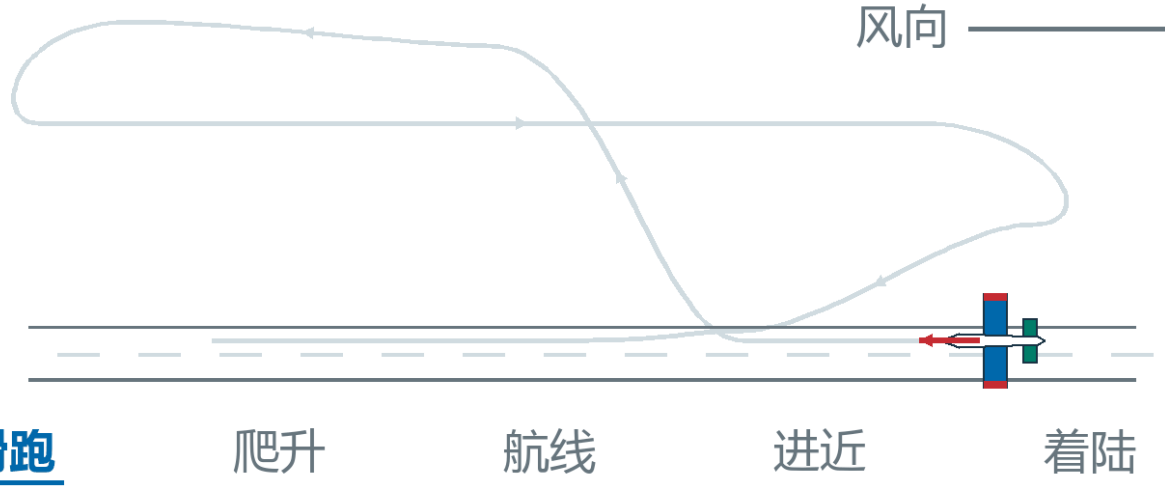
固定翼起飞、航线与着陆预演

滑跑：保持方向并平顺加速

俯视航迹，不按比例；箭头表示前进方向



外观对照



图：固定翼起降航线示意图

- **起飞爬升：**迎风滑跑并保持方向，满足本机离地条件后柔和抬头爬升。
- **基本航线：**保持空速，先直线再小坡度转弯；自稳松杆后仍持续前飞。
- **进近着陆：**配合油门与俯仰完成进近、拉平和接地，停稳停机后断电复查。

固定翼起降全过程都要管理空速，转弯、进近与复飞需要空间。

本节资料：装调文档与官方指南

课后按文档完成四旋翼与固定翼装调

- **实验文档：** [安装目录]\RflySimAPIs\1.RflySimIntro\1.BasicExps\e10.DroneAssTutorial\
- **四旋翼：** 1.QuadUAVAss\Readme.pdf，机架、动力、飞控、通信与QGC配置。
- **固定翼：** 3.FWAss\Readme.pdf，含软件在环、硬件在环与真机步骤。

PX4官方：Pixhawk 6X接线快速入门

https://docs.px4.io/main/en/assembly/quick_start_pixhawk6x

PX4官方：传感器、遥控与执行器配置

https://docs.px4.io/main/en/config/

PX4官方：失效保护与地理围栏设置

https://docs.px4.io/main/en/config/safety

把文档步骤与实物响应对应起来，才能把一次装配变成可复现的方法。

本节练习：故障定位

故障判断：连接、配置与响应

- **电机定位：**四旋翼无桨点测Motor 1，转动的电机与所选机架配置图不符。能只按插口号判断吗？先查什么，修正后怎样复测？

  参考：核对机架位置、功能映射与接线；无桨逐台复测位置和旋向。

- **供电判断：**电池已接通，飞控在USB连接时正常，拔掉USB后立即关机。能据此断定飞控损坏吗？怎样沿供电路径排查？

  参考：查电池、PM02D、POWER1的连接和电压；USB正常不能判飞控损坏。

- **舵面反馈：**固定翼手动右滚响应正确；自稳、姿态杆回中时压低右翼，右副翼仍上偏。这说明什么？为什么只改遥控器反向不够？

  参考：查飞控朝向、姿态估计与稳定输出方向；遥控反向不能修正反馈。

故障判断应给出可能原因、核查方法和修正后的复测依据。

本节小结

装配与调试的完整关系

部件确认	机械与接线	配置与验证	分阶段首飞	飞后复查
型号与接口	固定与通路	基准与响应	断电装桨后	检查与记录

- **装配：**建立结构连接和动力、低压供电、信号通路。
- **配置：**使机型、安装方向和输出功能对应实物。
- **验证：**无桨核对输入与响应，固定翼另查舵机供电、重心和空速。
- **复查：**首飞后结合结构和日志追查异常，修正后复测。

装调完成的依据是实物、配置、响应与记录能够相互核对。