



1.3 组成与架构



本章目录

组成与架构：从任务到部件，再到运行

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 3 个教学单元

1.3.1 整机框架

教材对应：第 1.2.1 节

1.3.2 组成与设计原理

教材对应：第 1.2.4 节

1.3.3 智能控制架构

教材对应：第 1.2.5 节



任务导入

一次巡检任务，需要三种系统视角

- **任务场景：**接近指定检查点，获取清晰图像，并根据新障碍调整路线。
- **组成视角：**相机获取图像，自驾仪和机载计算机处理数据，动力部件产生运动。
- **架构与闭环：**说明信息与能量如何传递；运动再被观测，偏差修正下次动作。

任务功能

需要观察、判断与执行什么
见 1.3.1 整机框架

实物部件

谁测量、谁计算、谁驱动
见 1.3.2 组成与设计原理

程序运行

目标下发与反馈如何持续
见 1.3.3 智能控制架构

组成回答有哪些部件，架构说明如何协作，闭环依靠反馈修正动作。

1.3.1 整机框架

无人系统统一框架

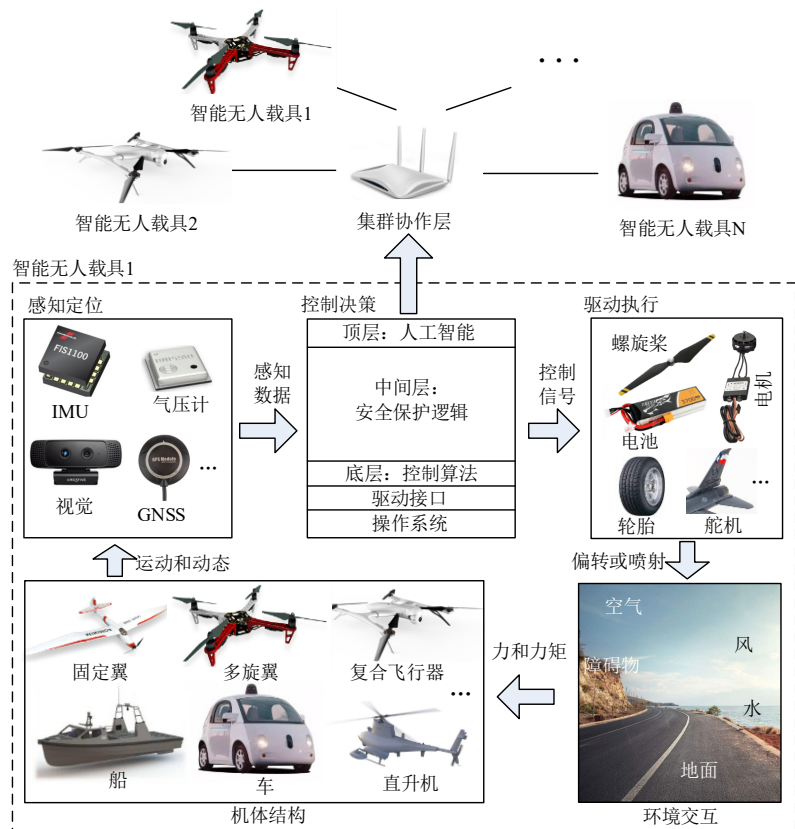


图1.6 无人系统统一框架

前面课程中，无人系统可以根据运行介质分为水下、水面、地面等，可以根据平台构型分为多旋翼、机器狗、机器人等。但是从系统架构的内部视角，如左图又都可以分为感知、控制、驱动、环境、结构和集群等层。

- **观测与理解：**相机观察检查点与障碍，定位提供自身位姿，两类信息共同描述任务状态。
- **目标与执行：**规划器选择接近路线，控制器跟踪运动目标，执行机构使机体产生运动。
- **反馈与修正：**位置偏差改变控制输出，新障碍使原路线失效时触发重新规划。
- **扩展到多机：**网络传递疑点位置和执行进度，分工改变各机目标，各机仍保有自身闭环。

统一框架有助于数据、算法和器件的共享，提升效率

1.3.1 整机框架

六层框架：每一层分别负责什么

- **感知定位层：**测量自身与外界，把位姿、障碍等“感知数据”交给决策。
- **控制决策层：**规划目标、处理约束与故障，发出“控制信号”给执行层。
- **驱动执行层：**电机、舵机按指令动作，经旋转、偏转或喷射作用于环境。
- **环境交互层：**空气、水、地面产生“力和力矩”，风、电磁和障碍是干扰。
- **机体结构层：**安装组件并传递受力，“运动和动态”再由感知定位测到。
- **集群协作层：**交换多机状态，分配任务，协调路径与行为。

六层框架描述机体与环境的闭环作用，并将分析扩展到多机协作。

1.3.1 整机框架：感知定位层

把测量变成可用的状态信息

- **测量与估计：**图像、点云和惯性测量是输入；定位估计形成自身位置、速度与姿态。
- **巡检信息：**识别检查点和障碍，给出相对位置及可通行空间，供规划器选择路线。
- **数据含义：**位置带坐标系，观测带时间戳；相同时刻和参照下的数据才能相互比较。
- **质量影响：**遮挡或定位退化使状态不可靠，系统据估计质量限制速度或重新选择观测位置。



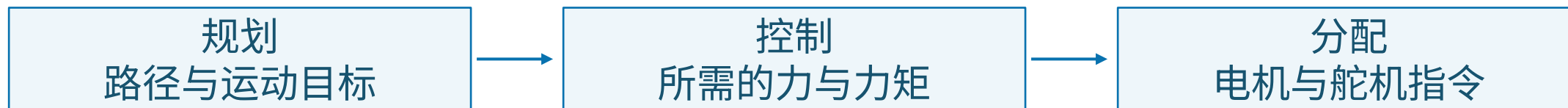
图：多源测量汇成状态与地图（示意）

感知把原始测量转成状态与环境信息，坐标、时间和质量决定其可用性。

1.3.1 整机框架：控制决策层

从任务规划到执行器指令

- **任务规划：**在障碍和续航约束下选择接近路线，给出位置或速度目标。
- **反馈控制：**比较目标与实际状态，计算修正偏差所需的力和力矩。
- **控制分配：**结合构型和执行器上限，将总控制需求转换为各电机或舵机指令。
- **巡检闭环：**小偏差由控制器修正；新障碍使路线失效时，上层重新生成目标。
- **安全保护：**检查电量、定位与通信状态，异常时切换到悬停、返航或降落。



规划确定运动目标，控制修正状态偏差，分配把控制需求落实到执行器。

1.3.1 整机框架：驱动执行层

把控制指令变为机体运动

- **信息作用：**指令表达所需推力、转速或角度，自身不提供驱动电机的能量。
- **能量作用：**电池供能，电调调节电流，电机经桨或传动机构与环境作用。
- **运动结果：**不同作用位置的力共同改变机体平动与转动，传感器再次观测结果。
- **输出受限：**达到电流、转速或行程上限后，继续增大指令不能得到更多控制作用。



指令调节能量转换，执行机构输出力与力矩，能力受电流和载荷限制。

1.3.1 整机框架：机体结构层

部件安装、载荷传递与测量质量

- **结构职责：**机身、机臂和起落架提供安装位置，并传递载荷和驱动力。
- **测量影响：**惯性测量单元（IMU）测量加速度与角速度，机架振动会叠加进测量。
- **气动影响：**机身外形和表面影响气动力，结构减重与气动效率共同影响运动性能。
- **接触影响：**轮胎、地面和法向载荷共同影响附着，限制加速、转弯和制动。



图：机架与配套部件

结构设计同时影响载荷支承、测量质量和运动性能。

1.3.1 整机框架：环境交互层

环境如何改变受力与观测条件

- **空气与气象：**风和空气密度影响气动力，雨雾与温度也会影响设备和观测。
- **地面与接触：**摩擦提供驱动和制动力，打滑、碰撞会改变载具的实际运动。
- **电磁条件：**地磁异常及电机、电源线干扰会影响测量，无线电干扰会影响链路。
- **障碍与光照：**突发障碍要求重新规划，遮挡和光照变化可能降低视觉感知质量。

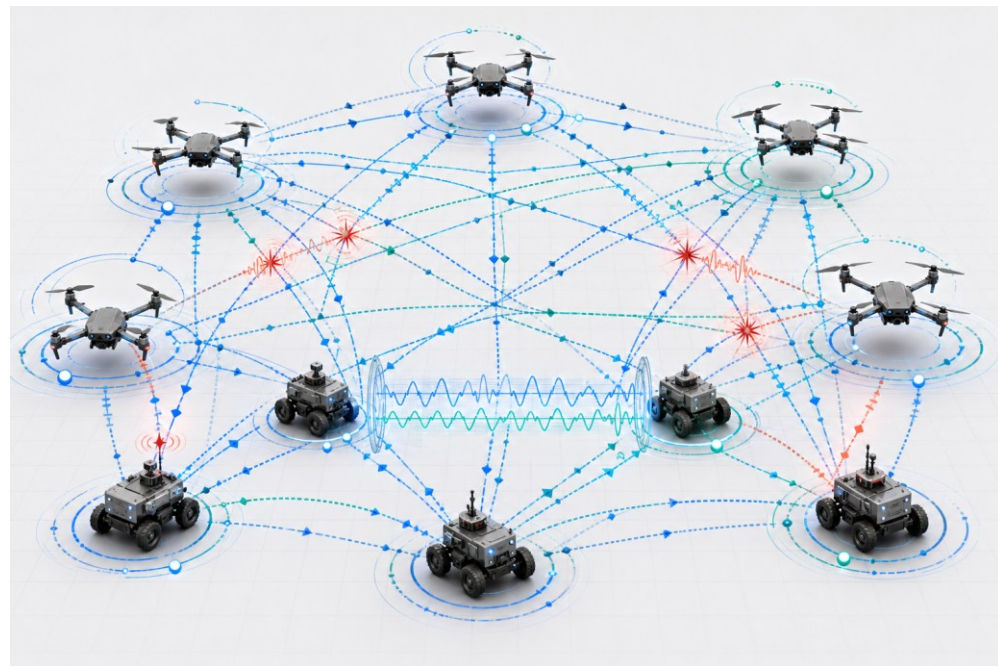


环境既改变实际运动，也改变传感器看到的结果。

1.3.1 整机框架：集群协作层

多机如何交接任务、共享状态

- **任务交接：**普查机发送疑点位置、类型和时间，复查机据自身能力接受检查任务。
- **状态共享：**各机回传位置、电量与进度，共同清单据此区分已完成与未完成项。
- **运行配合：**任务分工生成各机目标，路径协调减少冲突，各机仍独立完成快速反馈控制。
- **异常接续：**节点退出后依据剩余载荷与能源重分配；消息过期时不能当作当前状态。



图：节点通信与协调冲突示意

共享状态让多机能够分工协作，节点退出后需按剩余能力重新组织任务。

本章目录

组成与架构：从任务到部件，再到运行

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 3 个教学单元

1.3.1 整机框架

教材对应：第 1.2.1 节

1.3.2 组成与设计原理

教材对应：第 1.2.4 节

1.3.3 智能控制架构

教材对应：第 1.2.5 节

1.3.2 组成与设计原理

多旋翼装配分解：部件组成与连接关系

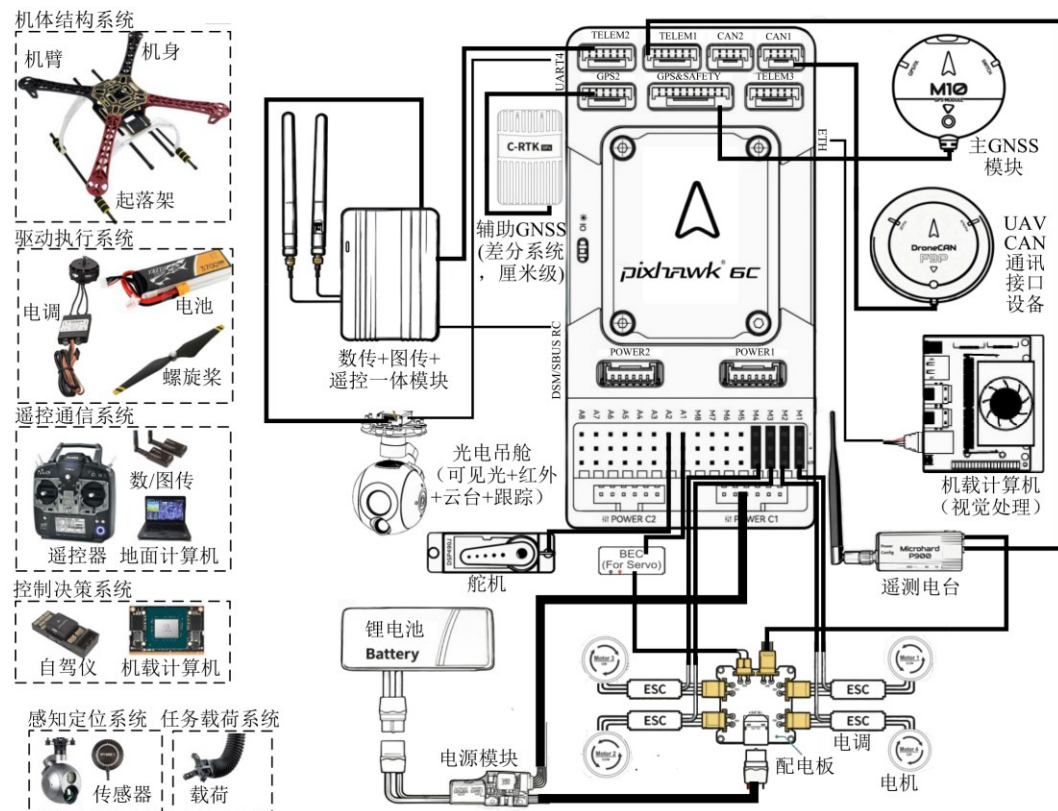


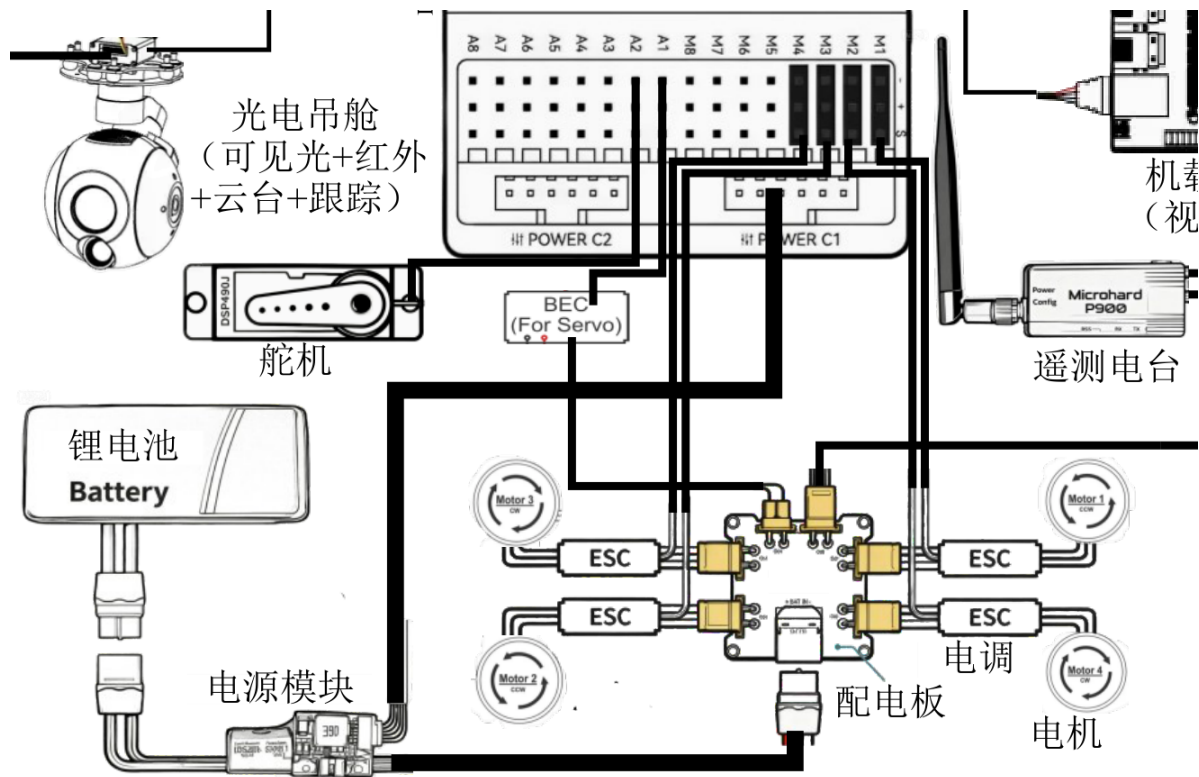
图1.13 多旋翼装配分解图

- **部件分组：**结构、感知、控制、执行、通信和载荷构成六个子系统。
- **动力供电：**电池经配电线路给电调供电，电调再向电机绕组供电。
- **控制供电：**电源模块等为自驾仪提供所需电压，独立于电机的功率输出。
- **控制信号：**自驾仪经信号接口发送指令，电机动力电流不经过该接口。

连接关系：供电电压与极性决定设备能否正常上电；接口引脚和通信协议决定信号能否被正确接收。

1.3.2 组成与设计原理

图1.13局部：动力、供电与信号的三类通路



- **动力通路：** 电池→电源模块→配电板→四个电调→四台电机，承载大电流。
- **自驾仪供电：** 电源模块另引稳压电源到POWER接口，并测电池电压和电流。
- **舵机供电：** 免电池电路（BEC）从配电板取电降压，接入舵机所在的输出排针。
- **控制信号：** M1-M4四路信号线接各电调，舵机信号取自A组输出口。

图1.13 局部：多旋翼动力与信号接线

1.3.2 组成与设计原理

六个子系统怎样落实整机功能

- **同名四项：**机体结构、感知定位、控制决策、驱动执行，既是功能层，也是部件系统。
- **部件侧新增：**遥控通信系统连接地面与其他载具，任务载荷系统指相机、吊舱等作业设备。
- **功能层独有：**环境交互是外部条件，不是部件；集群协作靠通信设备与协同算法实现。
- **巡检对应：**相机提供检查图像，机载计算机判断目标，自驾仪与动力系统维持观察位置。



功能层与部件系统并非一一对应，一个部件可以参与多项系统功能。

1.3.2 组成与设计原理：机体结构系统

质量、强度与阻力怎样取舍

- **结构减重：**较轻机架可降低悬停推力需求，但过度减薄会增大变形与振动。
- **承载与刚度：**强度关系到是否破坏，刚度关系到变形大小，两者影响安装和受力。
- **材料与连接：**碳纤维、铝合金和工程塑料各有特性，接头和加工方式同样影响整体性能。
- **外形与布局：**固定翼兼顾升力与阻力，多旋翼还需为桨盘、载荷和维护留出空间。



结构减重只有同时满足承载与安装要求，才可能带来整机收益。

1.3.2 组成与设计原理：感知定位系统

板载与外部传感器：安装位置与连接方式

- **板载传感器：**直接集成在自驾仪电路板上，常见惯性器件、磁力计和气压计。
- **板内接口：**常用串行外设接口（SPI）或集成电路总线（I²C）传输测量。
- **外部传感器：**卫星导航（GNSS）模块、外置磁力计等独立接入，便于调整安装位置或按任务更换。
- **扩展接口：**串口（UART）、控制器局域网（CAN）、通用串行总线（USB）连接外设。



IMU



气压计



视觉



GNSS

图：传感器的不同形态

板载强调直接集成，外部强调独立接入；测量作用与安装方式是不同维度。

1.3.2 组成与设计原理：感知定位系统

IMU、磁力计与气压计：各自测量什么

- **惯性测量：**加速度计测比力，即单位质量上的非重力合力；陀螺仪测角速度。
- **轴数：**加速度计与陀螺仪各三轴称6轴，加三轴磁力计称9轴，再加气压计称10轴。
- **辅助参照：**地磁观测补充航向信息，气压变化辅助估计高度，两者都受到环境影响。
- **器件形态：**民用多为微机电系统（MEMS），有板载芯片与封装模块；噪声漂移需融合。



板载惯性芯片



Xsens封装模块

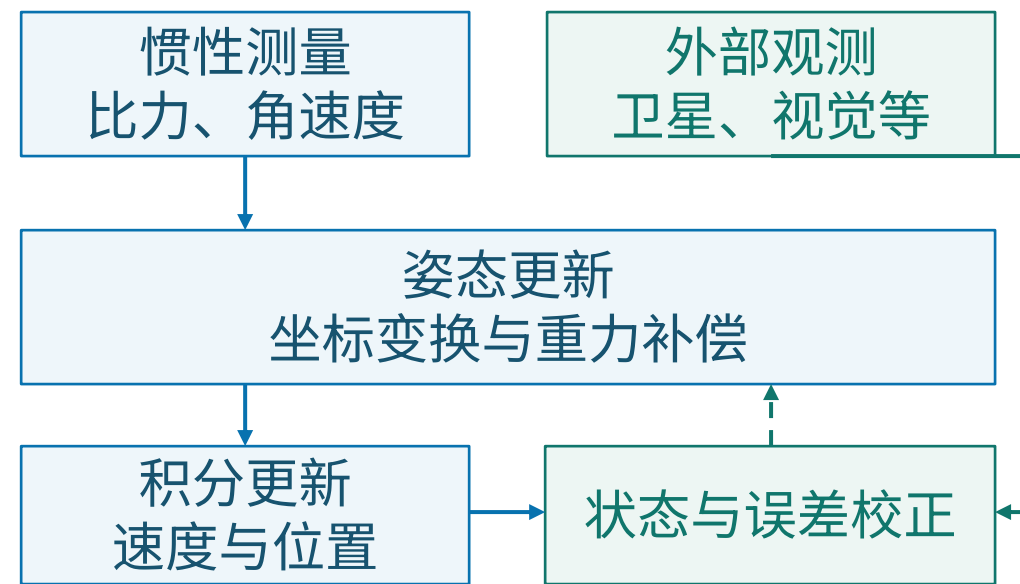
气压计
辅助高度估计

惯性测量提供连续运动信息，磁场与气压观测分别补充航向和高度参照。

1.3.2 组成与设计原理：感知定位系统

惯性导航：运动积分与误差校正

- **姿态与坐标：**校正惯性测量偏置，更新姿态，将比力转换到导航坐标系并补偿重力。
- **运动积分：**结合初始状态，对运动加速度积分得速度，再积分得位置。
- **误差传播：**偏置、噪声和姿态误差会传入积分结果，造成速度与位置漂移。
- **观测校正：**卫星或视觉约束运动状态，融合估计同时修正状态及可估计的传感器偏置。



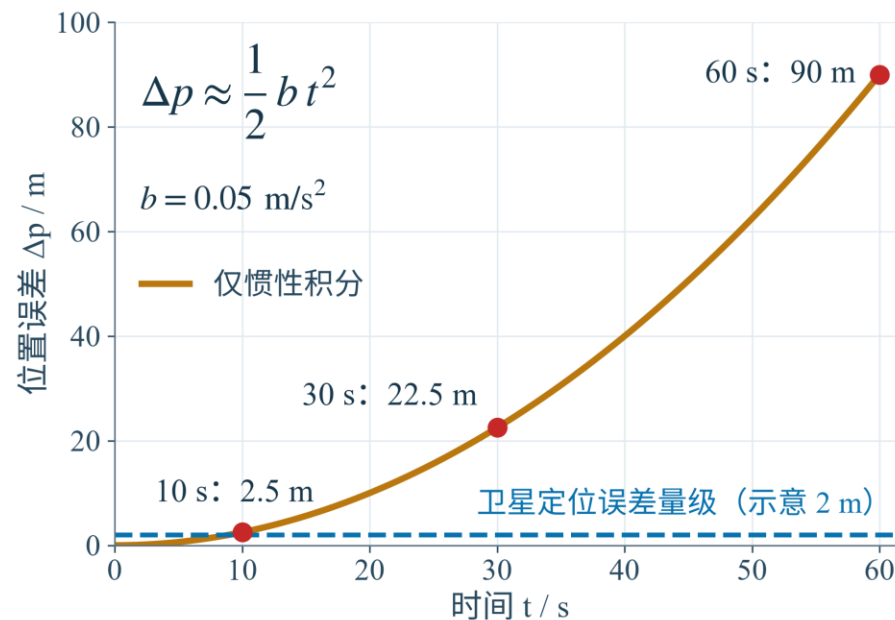
校正后的状态作为后续更新的起点

惯性测量能连续估计运动，长期误差需要合适的观测约束。

1.3.2 组成与设计原理：感知定位系统

惯性漂移有多快：一个数值例子

- **误差来源：**加速度计偏置或姿态误差留下多余加速度 b ，速度误差约 bt ，位置误差约 $bt^2/2$ 。
- **数值例子：** $b = 0.05 \text{ m/s}^2$ （约 0.3° 倾斜），10 s后约2.5 m，30 s后约22.5 m，60 s后约90 m。
- **器件差别：**MEMS器件漂移较大；光纤或激光陀螺能长时间保持姿态，但体积、成本高。
- **观测校正：**卫星或视觉定期给出位置，融合修正位置、速度并估计偏置，使误差有界。



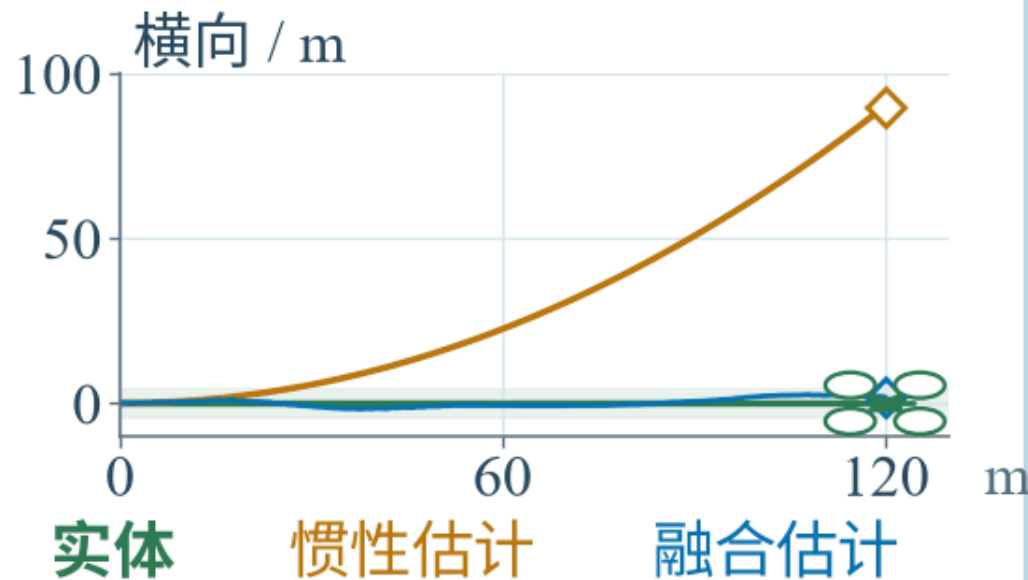
图：惯性积分的位置误差曲线

恒定加速度偏置使位置误差按时间平方积累，外部观测可抑制漂移。

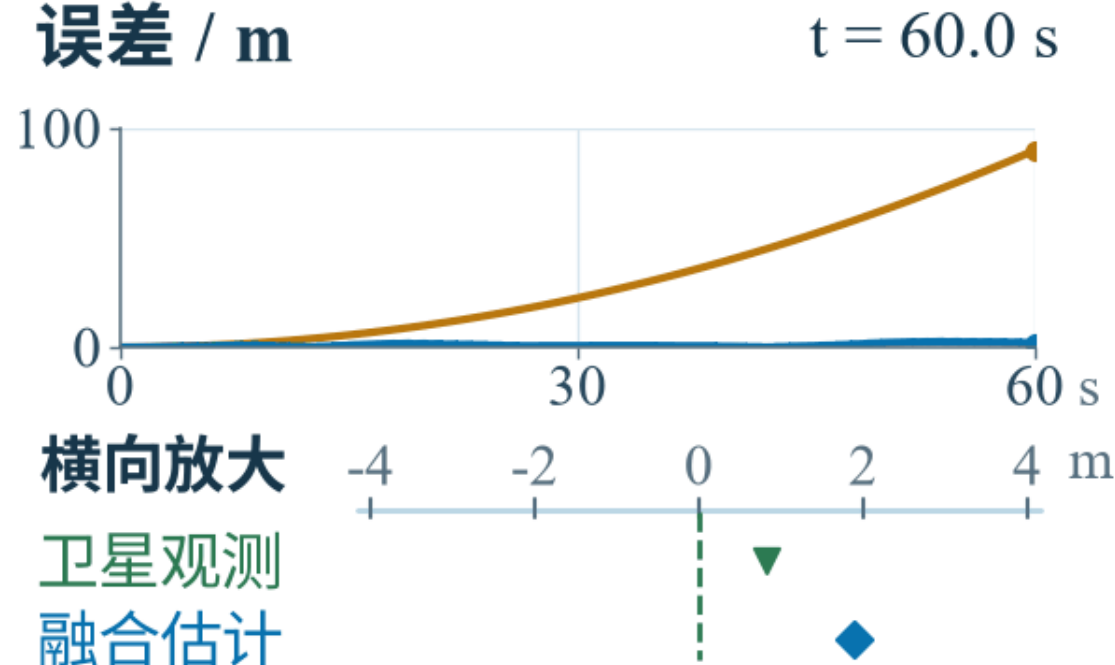
1.3.2 组成与设计原理：感知定位系统

惯性漂移与外部观测校正

真实运动与位置估计



误差 / m



图：恒定加速度偏置下的位置误差及外部观测校正（教学仿真）

仅惯性积分：加速度偏置经积分使位置误差增大。

加入卫星观测：定期校正估计；间隔与噪声影响残余误差。

1.3.2 组成与设计原理：感知定位系统

GNSS卫星定位：统称与具体系统

- **总称：**全球导航卫星系统（GNSS）为接收机提供定位、测速与授时信号。
- **具体系统：**美国全球定位系统（GPS）与中国北斗、欧洲伽利略、俄罗斯格洛纳斯并列。
- **多星座融合：**接收机可联合多套卫星信号，增加可用观测，改善定位几何条件。
- **使用边界：**建筑遮挡和信号反射仍会造成误差，复杂环境中常需融合其他传感器。



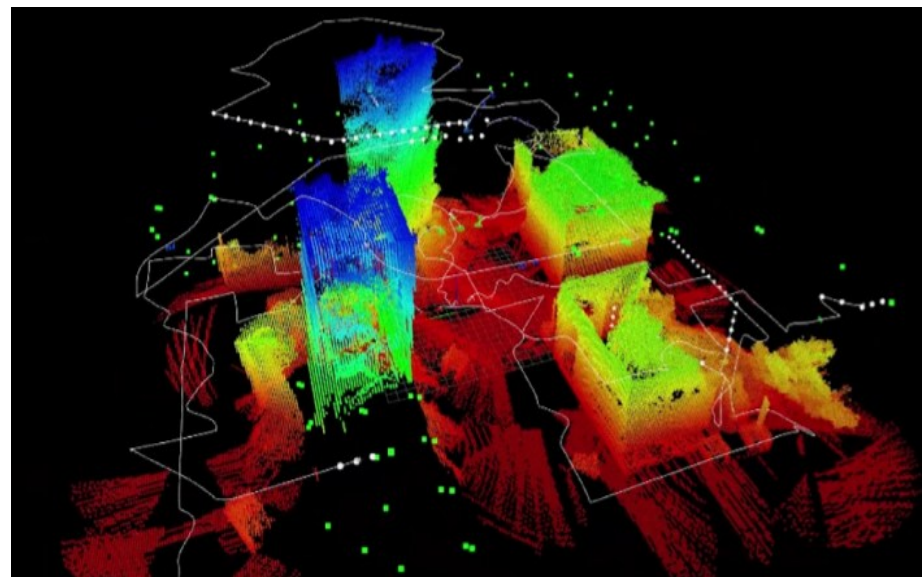
GNSS定位：传播时间乘光速得伪距，含接收机钟差；用四颗以上卫星联合解算三维位置与钟差。

GNSS 提供全球位置参照，复杂环境下常需融合惯性等观测。

1.3.2 组成与设计原理：感知定位系统

视觉与激光定位：无GNSS时的环境参照

- **拒止环境：**室内、隧道或强干扰区域可能缺少可用卫星信号，或信号不可信。
- **环境参照：**相机、激光雷达匹配特征或局部地图，估计相对运动；多机需统一坐标系。
- **惯性补充：**惯性测量提供连续的短时运动信息，外部观测约束累积误差。
- **退化条件：**普通视觉依赖光照与纹理；重复或单一几何结构也会削弱激光定位约束。



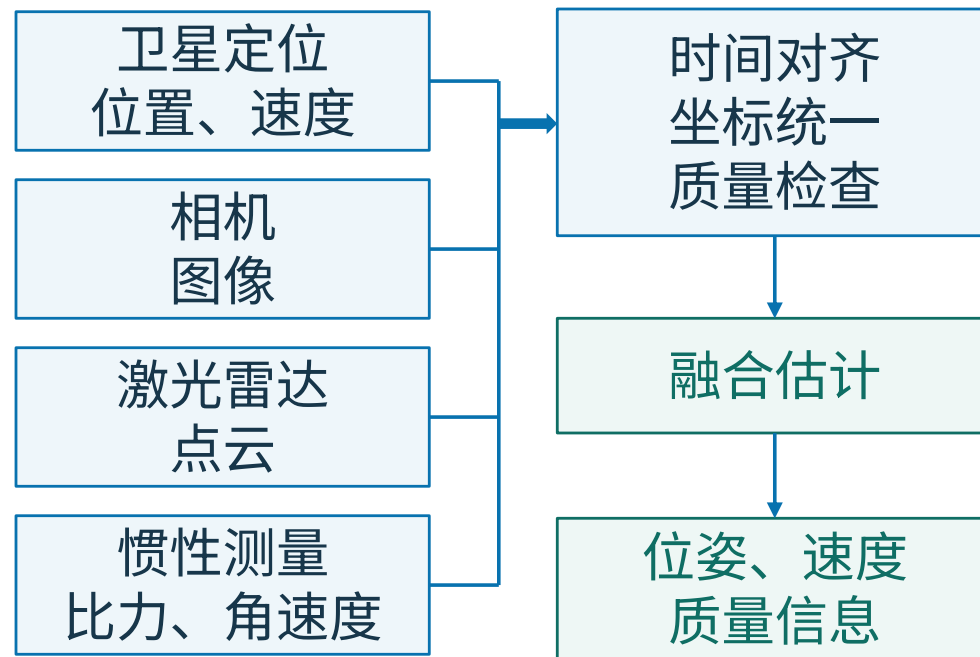
同步定位与建图（SLAM）：用相机或激光雷达同时估计自身位姿、构建地图。

视觉或激光定位常以局部地图为参照，多机协同需要统一坐标系。

1.3.2 组成与设计原理：感知定位系统

外部传感器：观测互补与融合估计

- **卫星定位**：提供位置、速度和时间参照，精度受接收设备、遮挡与信号反射影响。
- **相机与激光**：图像特征和点云几何描述环境，可用于定位、建图及障碍识别。
- **辅助观测**：超声波或激光向下测距得相对高度，光流结合距离和姿态可估计水平速度。
- **融合条件**：时间对齐与坐标统一使观测能够比较，质量检查识别异常与退化。



图：多传感器融合示意图。

传感器提供互补参照，统一时间、坐标并检查质量，支持可靠融合。

1.3.2 组成与设计原理：感知定位系统

外置磁力计：为什么安装位置很重要

- **地磁参照：**磁力计测量局部磁场，结合姿态为航向估计提供参照。
- **干扰机制：**电机、电调、动力线和磁性材料会改变局部磁场，影响航向观测。
- **位置作用：**单根导线通20 A时，5 cm处约80 μT ，已超过地磁场强度；距离越远，磁场越弱。
- **校准作用：**安装方向、固定磁偏差和负载变化影响测量，校准不能替代合理布置。



GNSS接收卫星信号；
磁力计测量磁场，
部分模块将两者集成。

电机 / 动力线

距离

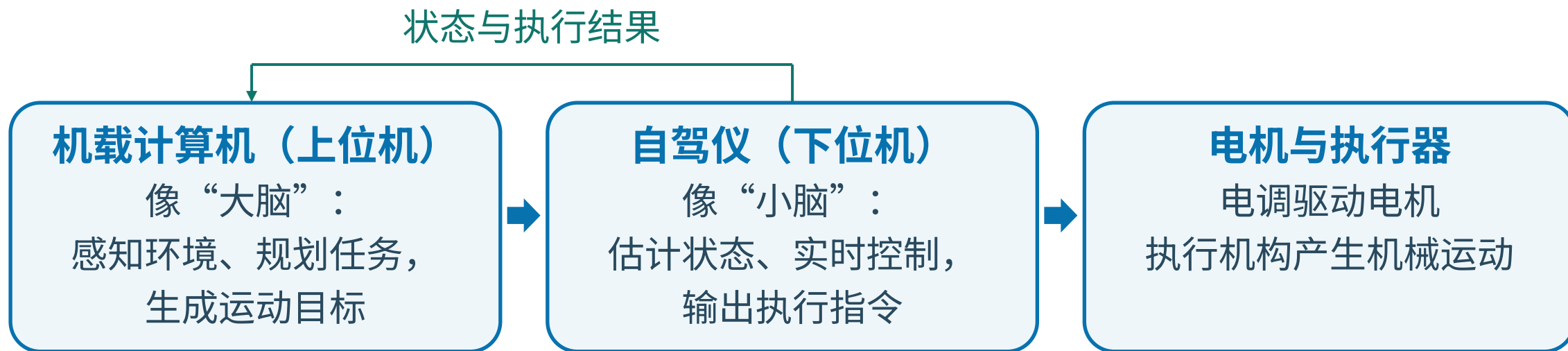
外置磁力计

电机和动力线会改变局部磁场，远离干扰源有助于稳定航向观测。

1.3.2 组成与设计原理：控制决策系统

自驾仪与机载计算机的连接与职责

自驾仪是本书的通用称呼，在无人机上通常俗称“飞控”。



上层下发任务目标，自驾仪执行实时控制并回传状态。

1.3.2 组成与设计原理：控制决策系统

自驾仪与机载计算机：硬件组成与任务分工

机载视觉需要图像吞吐与算力，运动控制需要及时采样和输出。

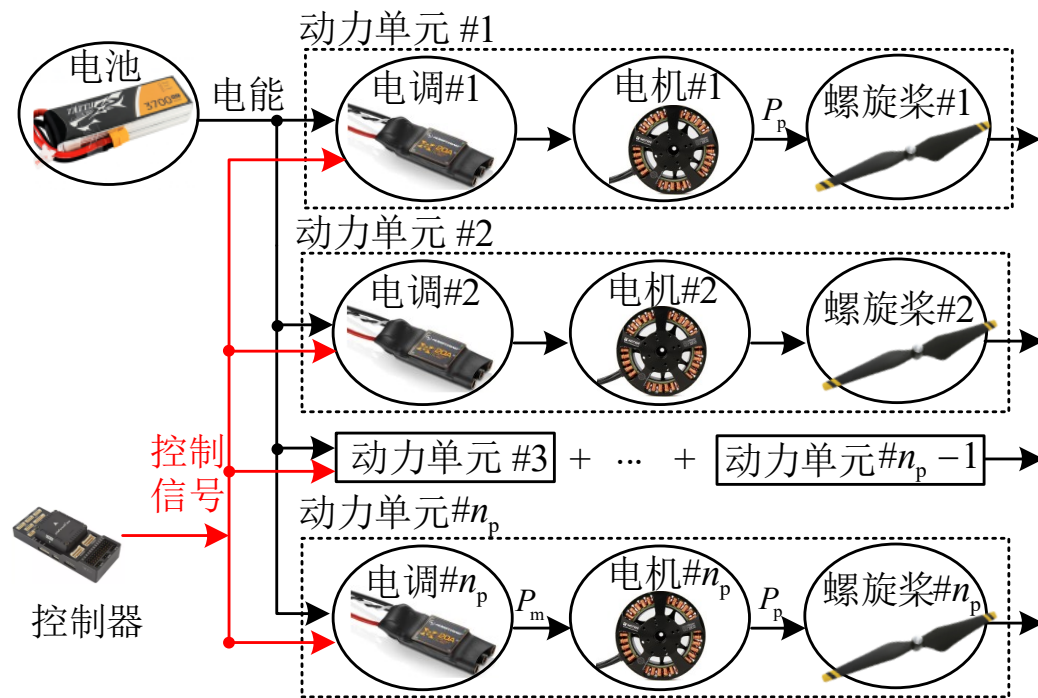
部件	硬件构成	运行内容
自驾仪	微控制单元（MCU，集成处理器、 存储与输入输出的芯片）、 板载传感器与接口	实时调度、状态估计、 运动控制与保护
机载计算机	Orin NX、RK3588、 树莓派等计算平台	操作系统、感知、规划； 按接口与自驾仪协作

硬件选型既要满足计算负载，也要满足控制时限与接口要求。

1.3.2 组成与设计原理：驱动执行系统

能源怎样转化为机体运动

- **能源来源：**电动系统使用电池等电源，油动系统依靠燃料和发动机提供机械功。
- **执行机构：**电机、舵机或发动机把输入转换成可调节的转动、角度或推力。
- **作用方式：**车轮通过地面摩擦驱动，螺旋桨加速空气，喷气装置喷出工质。
- **多旋翼组合：**电池供能，电调驱动电机，电机带桨；各桨推力组合控制运动。



图：多旋翼动力单元组成（示意）

执行机构利用能源产生力和力矩，通过环境作用改变载具运动。

1.3.2 组成与设计原理：驱动执行系统

螺旋桨：产生推力，也带来反扭矩

- **推力来源：**旋转桨叶加速空气，空气的反作用形成沿桨轴的推力。
- **反扭矩：**电机驱动桨，也向机体施加反向力矩；反向旋转的桨可平衡偏航力矩。
- **尺寸与匹配：**桨径增大可提高推力，也增加功率与转动惯量，需匹配电机与机架间距。
- **桨距含义：**桨转一圈理论上前进的距离；如1045桨即直径10英寸、桨距4.5英寸。



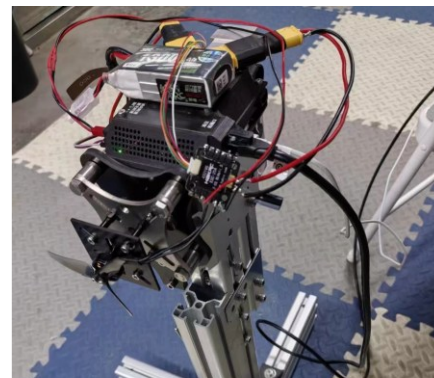
(a) 二叶桨



(b) 三叶桨



(c) 四叶桨



图：电机与桨实物

电机对桨
施加驱动扭矩

桨对电机及机架
施加反向力矩

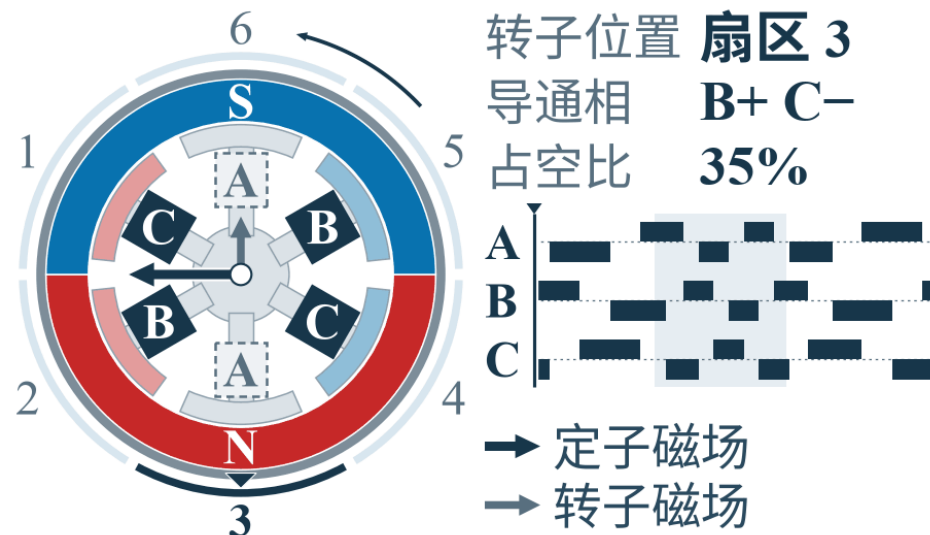
同一桨轴，方向相反

桨产生推力，也给机体带来反扭矩；旋向与动力匹配共同影响控制。

1.3.2 组成与设计原理：驱动执行系统

无刷电机：电子换相与动力匹配

- **基本作用：**无刷直流电机（BLDC）把电能转换为转矩，带动螺旋桨旋转。
- **换相方式：**电子电路按转子位置切换各相通电，替代机械电刷换相。
- **主要特点：**无电刷摩擦，寿命长、易调速；效率和发热取决于设计与工作点。
- **匹配要求：**按载重和机动需求选转速、扭矩与功率，同时检查电流、散热和桨负载。



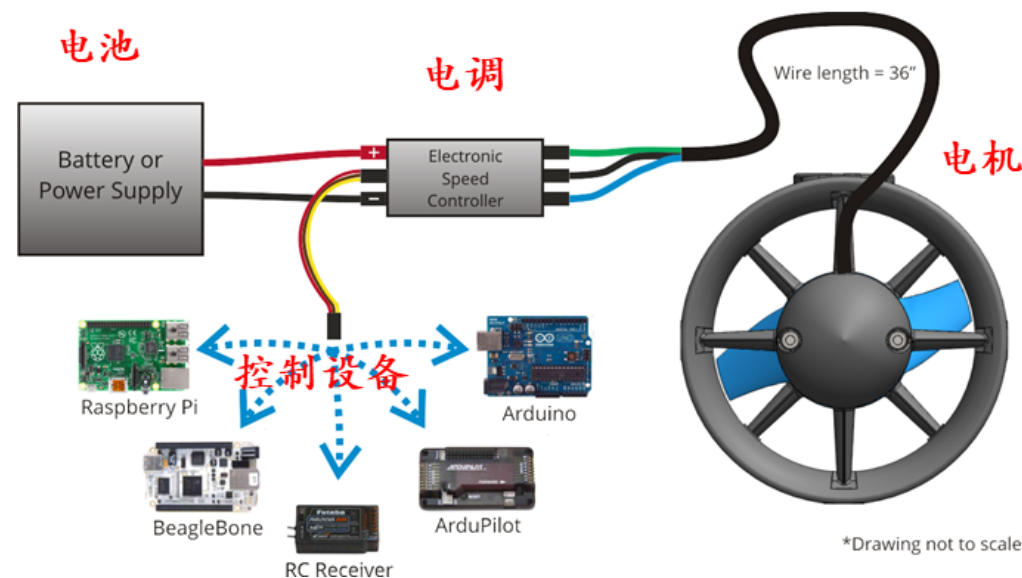
原理：无刷电机通过电子换相器按照转子位置依次控制定子绕组通电，形成旋转磁场并驱动永磁转子持续转动。

无刷电机靠电子换相输出转矩，实际效率和温升取决于桨、供电与工作点。

1.3.2 组成与设计原理：驱动执行系统

电子调速器：换相与功率调节

- **部件职责：**电子调速器（ESC，电调）接收控制指令，并驱动无刷电机换相。
- **输入指令：**传统脉冲宽度调制（PWM）用约1–2 ms脉宽表示油门，或用DSHOT等数字协议。
- **内部驱动：**电调调节各相电压、电流；内部功率调制与输入油门编码不是一回事。
- **运行约束：**供电、电流和散热限制持续输出；温度、转速反馈与保护功能依型号而定。



原理：电调依据转子位置安排三相导通顺序，并用PWM调节输出电压，完成换相与功率控制。

飞控编码控制目标，电调完成换相与功率调节，两者各司其职。

1.3.2 组成与设计原理：驱动执行系统

两种PWM：指令脉宽与功率调制

脉宽指令



1450 μ s

功率开关



$D = 45\%$

6.7 V

电机转速



35%

红线: 目标

图：输入油门脉宽与电调内部功率调制的不同职责（原理示意）

脉宽指令：约1–2 ms脉宽编码油门目标。

功率开关：电调调节内部占空比，并安排三相换相。

1.3.2 组成与设计原理：驱动执行系统

电池：锂电池类型、航时估算与燃料电池

- **锂聚合物 (Li-Po)：** 能量密度高、可大电流放电，小型多旋翼最常用；“聚合物”指电解质，多为软包。
- **铁锂与三元：** 按正极材料区分；磷酸铁锂热稳定性好、循环寿命长，三元锂比能量高，同等储能更轻。
- **航时与功率：** 能量约为电压乘容量，14.8 V、5 Ah电池约74 Wh，平均耗电300 W时理论约飞15 min；瞬时电流受放电倍率限制。
- **氢燃料电池：** 电堆把氢与氧反应的化学能转为电能，储氢罐携带燃料，供氢与散热增加系统质量。



图：电池包外形



图：圆柱电芯

储能量影响航时，峰值功率限制瞬时负载，配套装置增加质量。

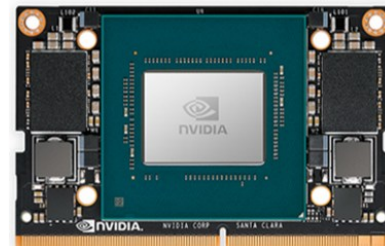
1.3.2 组成与设计原理：驱动执行系统

无人车电机控制：电机控制器与ECU

- **基本定义：**电子控制单元（ECU）是车用控制模块的统称，可能承担不同功能。
- **驱动控制：**电机控制器按指令调节电流、扭矩或转速，并监测温度与工作状态。
- **层级关系：**上层ECU给出扭矩或转速需求，电机控制器调节电机并回传状态。
- **平台差异：**无人车还需协调制动、转向和附着条件，不能照搬无人机的失效策略。



自驾仪



机载板卡



ECU

车端控制也要形成指令与反馈闭环，并协调驱动、转向和制动。

1.3.2 组成与设计原理：遥控通信系统

遥控、数传与图传：连接地面与载具

- **遥控**：地面发送操纵量与模式选择，机载接收机将信号交给自驾仪。
- **数传**：载具回传位置、电量与任务状态，地面站反向发送航点、参数或任务。
- **图传**：载具回传图像或视频，支撑巡检观察与第一人称视角（FPV）操纵。
- **任务交互**：机载端回传标注画面与位置，地面确认后下发任务，载具报告进展。



遥控器



数/图传



地面计算机

通信中断影响哪些能力，取决于失去的是哪类业务。

1.3.2 组成与设计原理：遥控通信系统

通信链路：频段示例与传输取舍

以下频段为教材示例；实际可用频段受设备设计与运行地区规定约束。

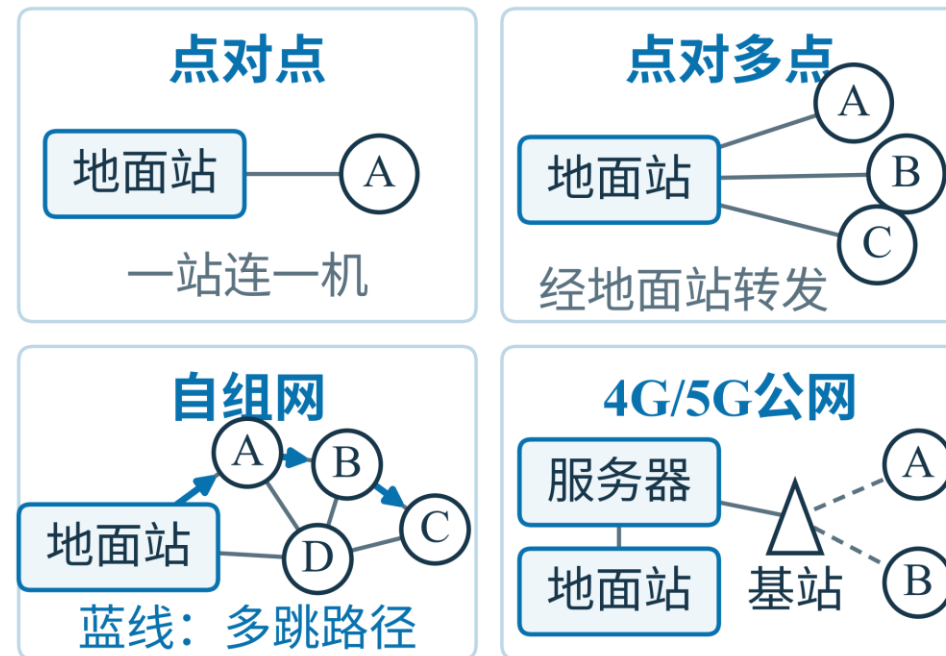
链路	常见频段示例	传输取舍
遥控通信	2.4 GHz 等	连续更新操纵量 时延与抖动影响响应
数传通信	433 MHz 或 915 MHz	状态按需更新 任务下发需要确认
图传通信	5.8 GHz 等	提高画质占用更多带宽 压缩与缓存影响延迟

操纵重时效、视频占带宽，容量分配影响共享链路的响应。

1.3.2 组成与设计原理：遥控通信系统

组网方式：点对点、点对多点、自组网与公网

- **点对点**：一个地面站连接一个载具，结构简单，常用于单机作业。
- **点对多点**：一个地面站同时连接多个载具，载具间信息经地面站转发。
- **自组网**：地面站与各载具互联互通，消息可经其他节点多跳转发，适合集群。
- **4G/5G公网**：经移动基站与公网服务器联网，覆盖取决于基站信号。



图：四种组网方式示意

组网方式决定信息经谁转发，也决定某个节点失联时影响范围多大。

1.3.2 组成与设计原理：任务载荷系统

载荷用途与平台要求

- **任务定义：**载荷是直接完成观察、测量、通信或作业任务的设备。
- **常见形式：**相机、光电吊舱、激光雷达、专用传感器、通信中继和投放装置等。
- **系统需求：**核对质量、重心、安装空间、功耗及数据带宽，确认满足任务要求。
- **功能归属：**同一相机可服务导航或任务成像，应按实际用途划分并说明共享接口。



吊舱



机械爪



武器

任务载荷定义工作内容，并反向约束平台、供电和通信。

本章目录

组成与架构：从任务到部件，再到运行

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 3 个教学单元

1.3.1 整机框架

教材对应：第 1.2.1 节

1.3.2 组成与设计原理

教材对应：第 1.2.4 节

1.3.3 智能控制架构

教材对应：第 1.2.5 节

1.3.3 智能控制架构

底层与上层的组成及职责

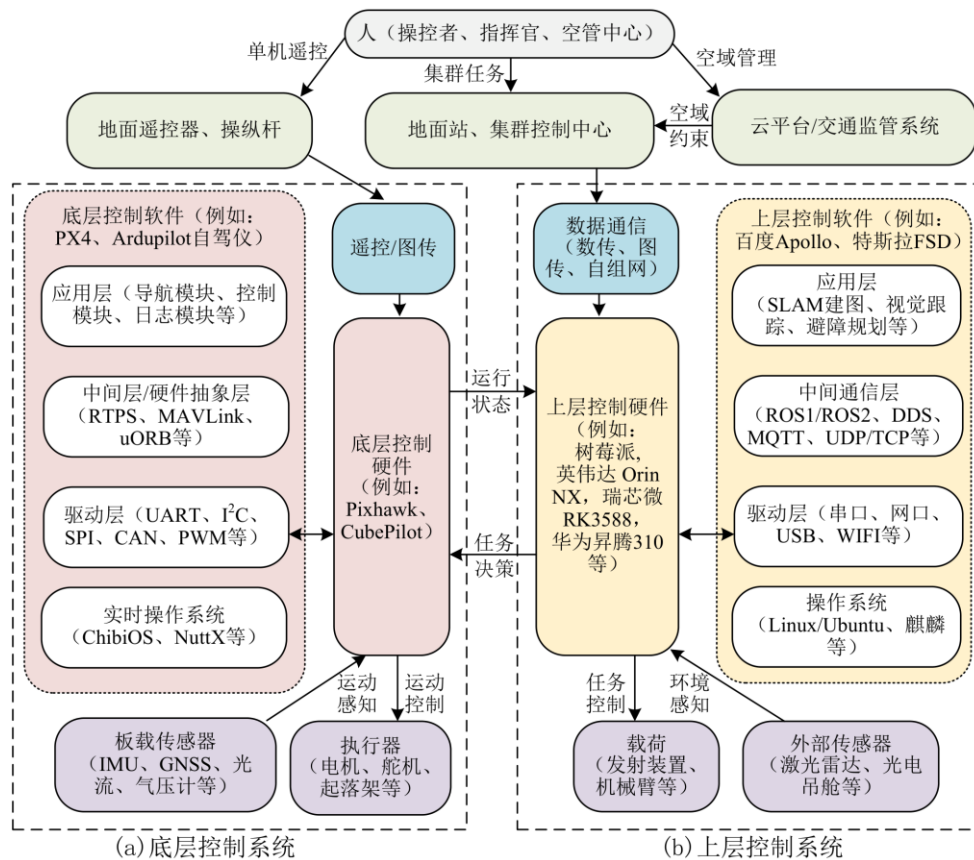
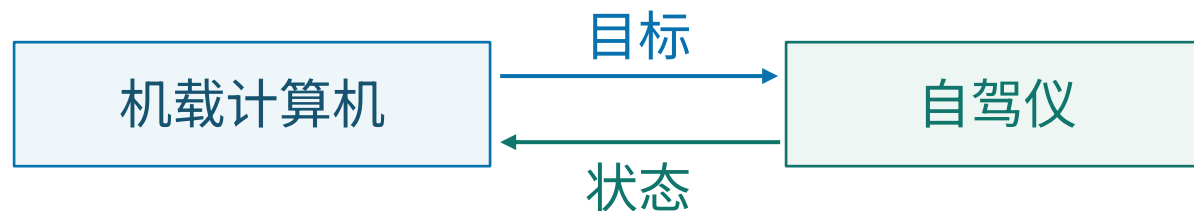


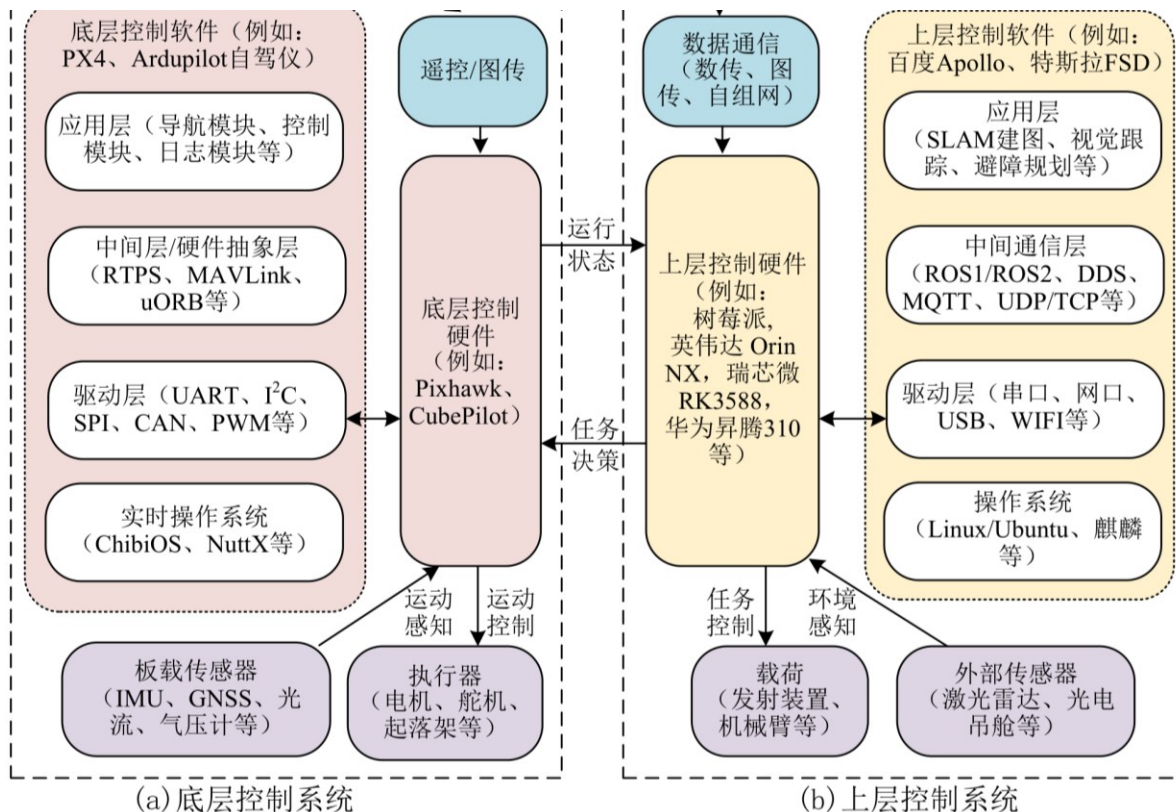
图1.14 无人系统控制结构框架

- **底层闭环：** 自动驾驶仪读取传感器，控制执行机构，处理基础运动与保护。
- **上层任务：** 机载计算机处理感知和规划，任务由人或地面系统提供。
- **层间协作：** 运动目标下发，状态与结果回传，异常时按预定模式处置。
- **分工依据：** 底层以嵌入式芯片加实时系统保证可靠与时限，上层以高算力板卡处理图像。



1.3.3 智能控制架构：分层协作

观测、计算与执行的连接关系



底层支路（左）

传感器→底层控制硬件→执行器
对应运动感知与运动控制

上层支路（右）

外部传感器→上层控制硬件→载荷
对应环境感知与任务控制

双向接口（中）

任务决策下发，运行状态回传

图中“板载”的含义

泛指接入自驾仪的传感器；
GNSS、光流常为外部模块。

图1.14 局部：底层与上层的运行支路

1.3.3 智能控制架构：分层协作

底层与上层控制系统：任务与时序分工

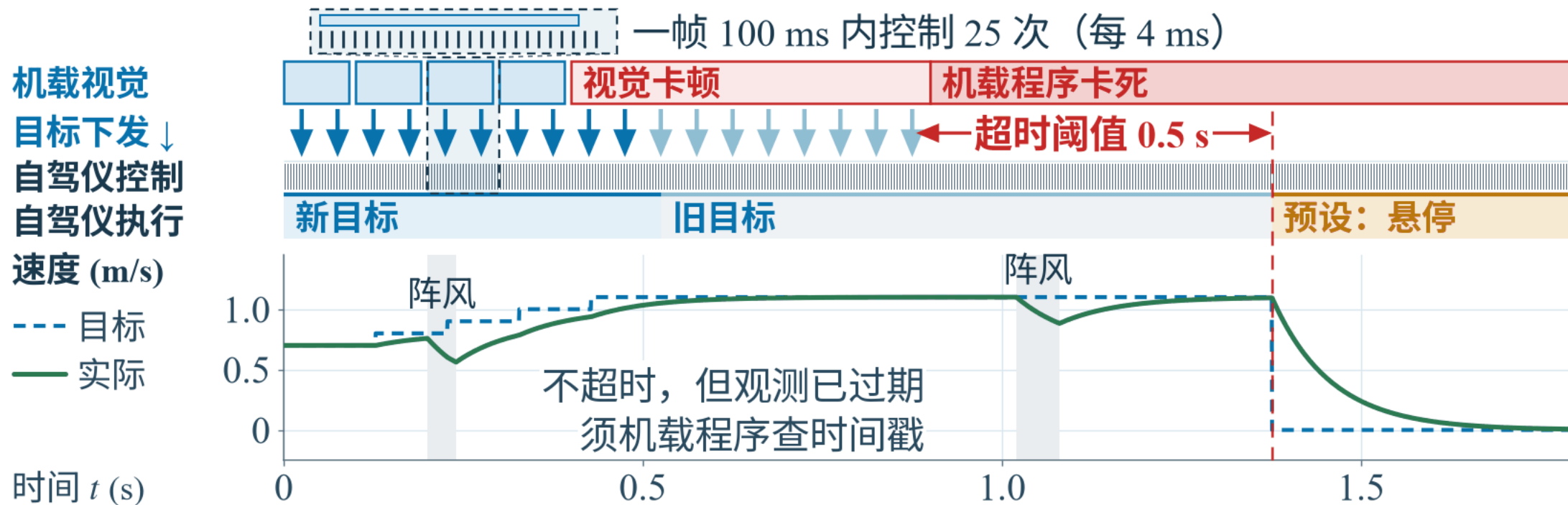
图像处理期间，姿态控制仍须持续更新；上层输出的是可跟踪目标。

维度	底层控制系统：更稳定、更听话	上层控制系统：更智能、更协同
目标	按时稳定跟踪运动目标	完成感知与自主任务
典型任务	状态估计、姿态与位置控制	识别、建图、规划与协同
硬件	嵌入式处理器及传感器接口	高算力板卡或远端计算资源
关注点	控制时限、故障检测与保护	计算负载、数据时效与异常降级

底层重视控制时限，上层重视任务计算，两级都要处理故障。

1.3.3 智能控制架构：分层协作

上层超时，底层控制还能做什么



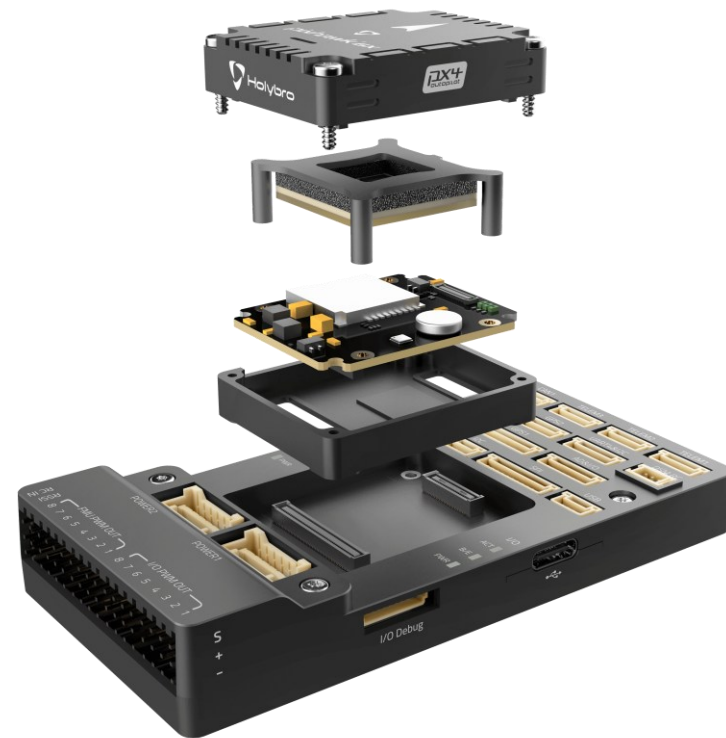
图：分层控制的更新时间、通信时延与超时降级（原理示意）

上层计算可变时，底层仍按固定周期控制，并处理过期目标。

1.3.3 智能控制架构：底层控制系统

自驾仪硬件：传感、计算与实时控制

- **硬件平台：**自驾仪以处理器运行估计与控制软件，传感器提供测量，接口连接外设与执行机构。
- **状态更新：**采样与融合提供姿态、速度和位置估计，观测越晚送达，控制器使用的状态越滞后。
- **控制输出：**控制器依据目标与估计状态计算执行指令，模式管理切换目标来源，保护逻辑处理异常。
- **实时调度：**实时操作系统（RTOS）按优先级安排任务，中断或共享资源占用可能推迟控制输出。



图：Pixhawk 6X板卡示例
采样 → 估计 → 控制 → 输出

自驾仪串联采样、估计与控制，实时调度保障闭环按时更新。

1.3.3 智能控制架构：底层控制系统

自驾仪软件：把传感器、算法与输出连接起来

- **驱动层**：封装设备访问和中断，通过串口和总线连接传感器与执行器，并提供输出接口。
- **调度层**：实时操作系统管理定时、优先级与同步，使任务按约定时序运行。
- **算法层**：状态估计连接姿态、速度和位置控制，控制分配把需求转换为执行指令。
- **通信层**：以MAVLink等轻量消息协议，与地面站和机载计算机交换状态与指令。

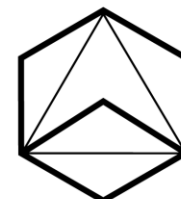


NuttX RTOS

实时操作系统



自驾仪软件



THE
AUTOWARE
FOUNDATION

自动驾驶全栈示例



自驾仪软件

驱动取得测量，估计算法给出状态，控制与分配产生执行指令。

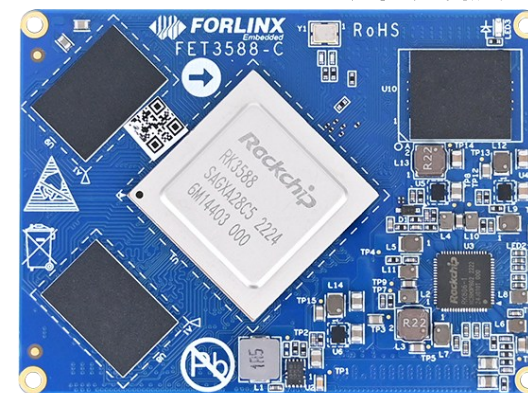
1.3.3 智能控制架构：上层控制系统

机载计算机：计算任务与硬件集成取舍

- **计算任务：**视觉识别处理图像，建图定位维护姿态与地图，数据量和更新频率共同决定计算负载。
- **硬件形态：**Jetson 开发板提供外设连接，RK3588 核心板需配合载板，把计算模块接入整机。
- **算法适配：**硬件加速取决于软件支持，传感器驱动和数据接口决定图像、点云能否持续送入算法。
- **机载代价：**计算板与载板增加质量和用电，散热占用空间与载重，热条件限制持续处理能力。



Jetson 开发板



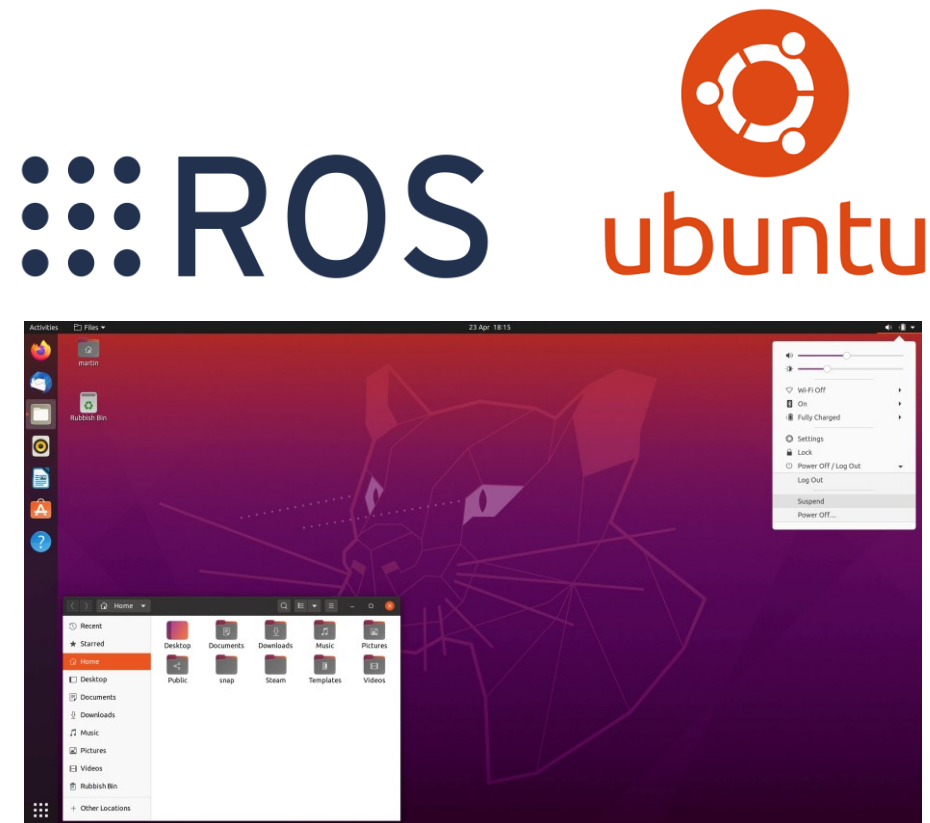
RK3588

机载算力服务感知与规划，算法、接口、供电和散热限制持续性能。

1.3.3 智能控制架构：上层控制系统

机载软件：操作系统与中间件

- **操作系统：** Ubuntu等Linux系统管理计算、内存、存储与网络，驱动把相机、雷达数据交给程序。
- **ROS 2：** 机器人软件框架，可经中间件接口（RMW）使用DDS等通信实现；Linux是运行环境之一。
- **通信底层：** DDS提供节点间的数据分发；MQTT是一种发布/订阅消息协议。
- **话题与服务：** 话题由发布者持续发送，订阅者按需接收，如图像、位姿；服务是一问一答，用于查询或设置。

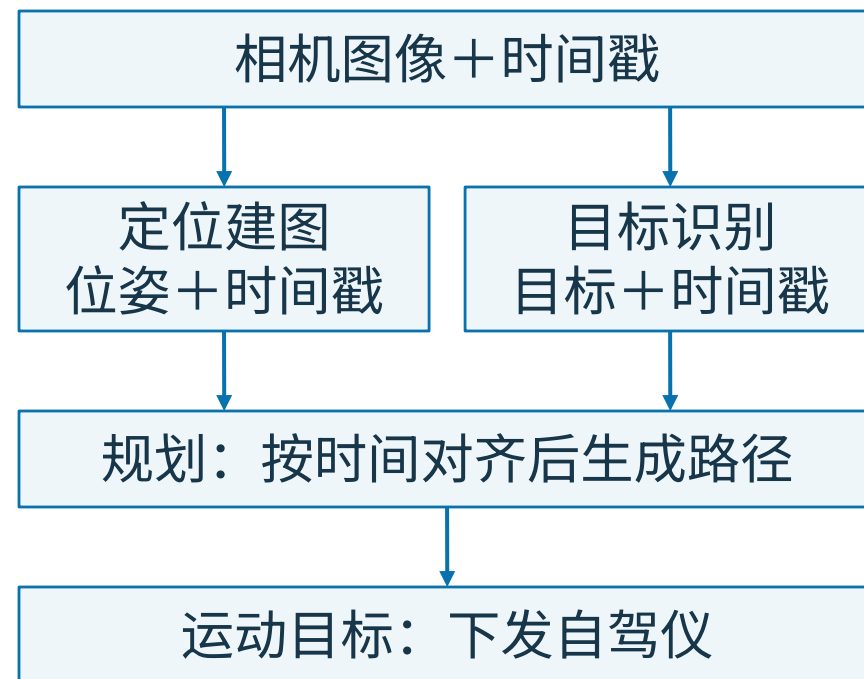


操作系统管理硬件资源，中间件在模块间传递数据，二者支撑应用算法运行。

1.3.3 智能控制架构：上层控制系统

机载软件：应用算法、数据对齐与上层通信

- **应用算法：**SLAM联合估计位姿与地图，识别提取环境目标，规划生成可执行路径。
- **数据协作：**时间戳与坐标变换对齐观测，消息排队和处理耗时累积成端到端延迟。
- **上层通信系统：**经自组网数据链、4G/5G或Wi-Fi连接其他载具、地面与云端，交换任务与感知结果。



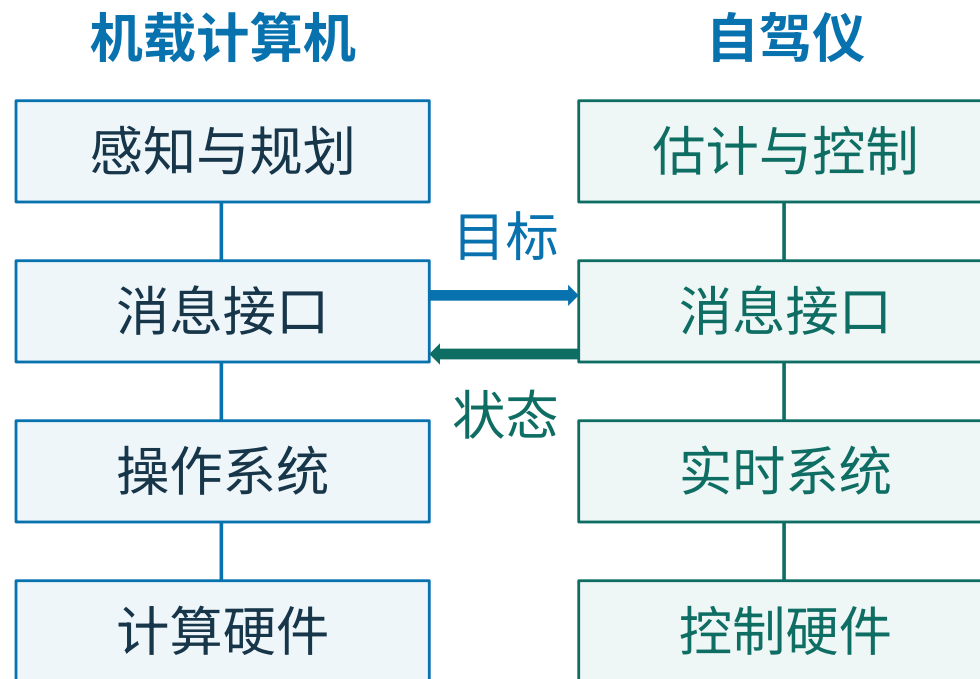
图：机载视觉数据的并行处理示意

基础软件提供资源与通信，自主能力还需要定位、识别和规划算法实现。

1.3.3 智能控制架构：分层协作

机载计算机与自驾仪双向通信

- **目标下发：**上层给出位置或速度目标，自驾仪按指定坐标参照持续跟踪。
- **状态回传：**位姿、模式与健康状态回传，上层据偏差继续接近或重新规划。
- **接口约定：**坐标系与单位说明目标含义；时间戳、更新周期与超时规则约束时效。
- **完成判断：**收到消息说明通信到达；位置误差、速度与停留时间决定是否到位。



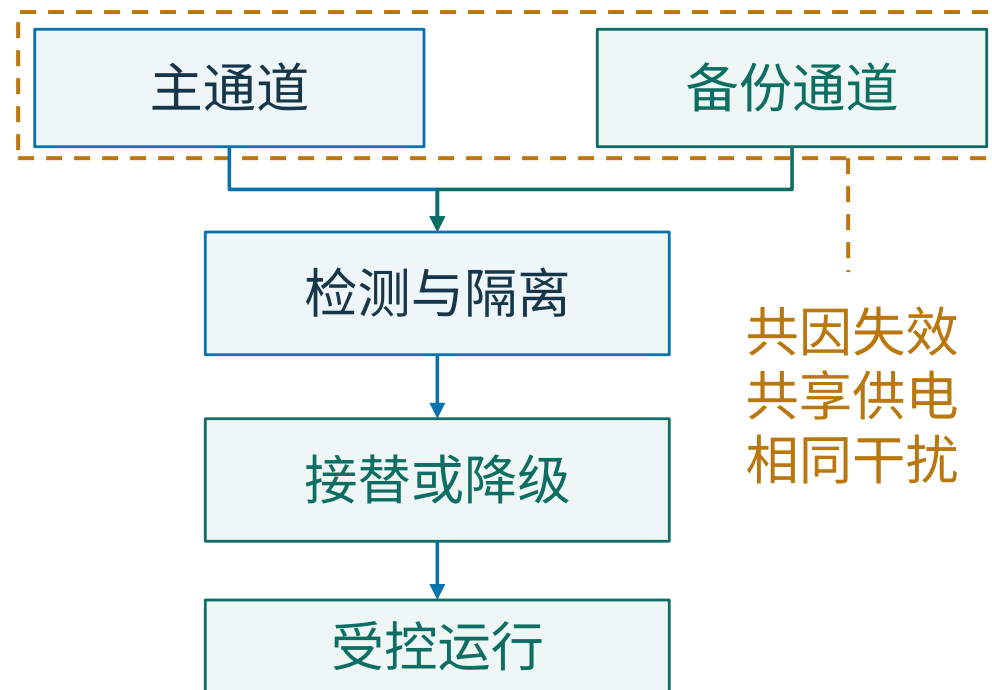
图：软件分层与双向接口示意图。

消息送达不等于任务到位，后续动作还要依据状态反馈。

1.3.3 智能控制架构：分层协作

冗余与降级：故障之后怎样保持受控

- **冗余含义：**为关键观测、计算或供电配置备份，降低单点故障的影响。
- **故障处置：**先检测异常并隔离故障源，再切换备份或重新分配可用控制能力。
- **上层失效：**能否继续任务、由人工接管或返航，取决于定位、控制模式、通信及预设策略。
- **共因失效：**主备共用电源或受同一干扰，可能同时失效，应独立供电、分开布线。



图：故障检测与冗余切换示意图。

冗余的价值在于故障后仍能接续必要功能，关键是识别故障并可靠接替。

课堂讨论

巡检架构练习：沿目标追踪整机运行

讨论题

- **任务追踪：**从“接近检查点并成像”出发，指出观测、计算、目标和执行输出。
- **接口判断：**相机、机载计算机、自驾仪之间传什么？动力与数据线路如何区分？
- **异常分析：**巡检图像停更（定位仍有效）或磁场受扰时，哪个判断先受影响？还能做什么？
- **迁移取舍：**换成无人车后，哪些处理可保留，哪些执行机构和约束需要改变？

答题线索：本节三条主线

- **六层框架：**沿感知、决策、执行及环境作用分析单机闭环，再看多机协作。
- **六个子系统：**把功能落实到组件，核对安装、供电、通信及任务能力。
- **两级控制：**按计算负载和控制时序分工，用目标、状态与执行结果连接上下层。

用具体部件、接口和失效场景，解释系统划分是否合理。

课堂讨论

巡检架构练习：参考要点

- **任务追踪：**相机与定位给观测，机载计算机定接近目标，自驾仪跟踪目标，电调电机产生运动。
- **接口判断：**相机→机载计算机传图像；机载计算机↔自驾仪传目标与状态；动力线与信号线分开。
- **异常分析：**巡检图像停更先影响识别和目标更新，须由上层检查时效；目标或保活流中断超时才触发对应保护；磁场干扰先影响航向估计。
- **迁移取舍：**感知与规划可保留；螺旋桨推进换成车轮驱动、转向与制动，并考虑附着与停车保护。

沿一次任务指出部件、数据与异常影响，才算真正理解架构。