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 组成与架构

1.3.1 整机框架

无人系统统一框架

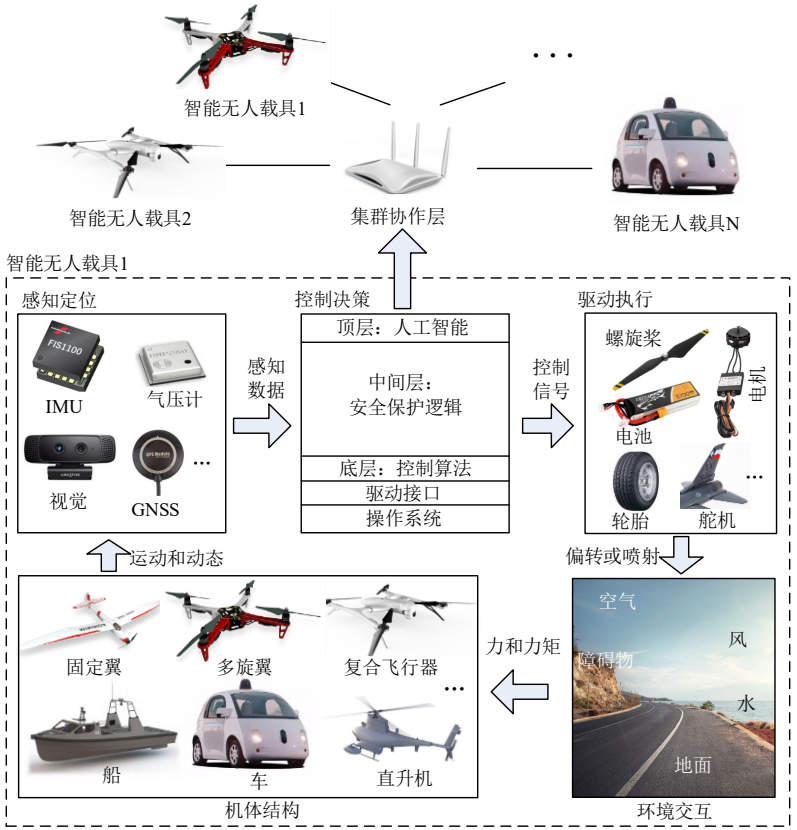


图1.6 无人系统统一框架

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 组成与架构

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。

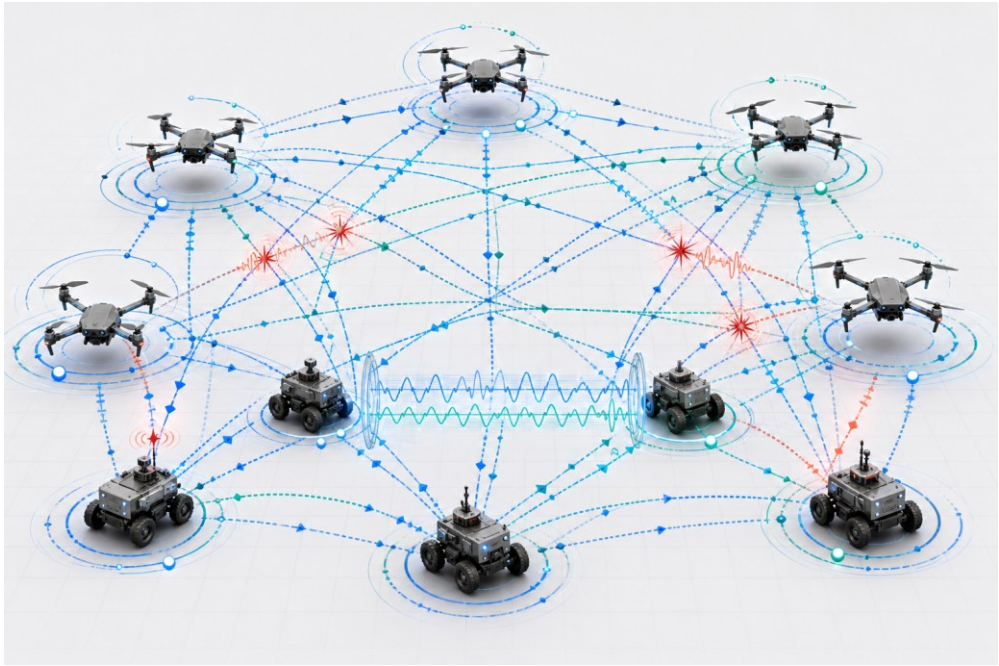


环境既改变实际运动，也改变传感器看到的结果。

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

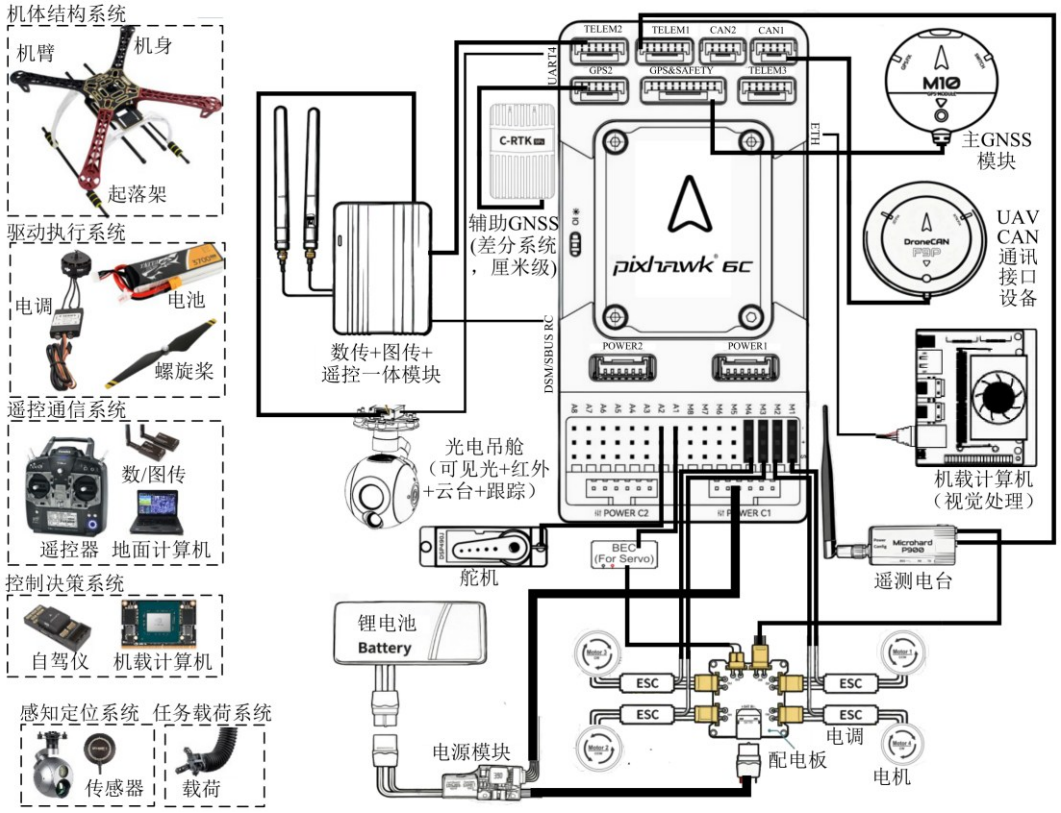


图1.13 多旋翼装配分解图

- **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能，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

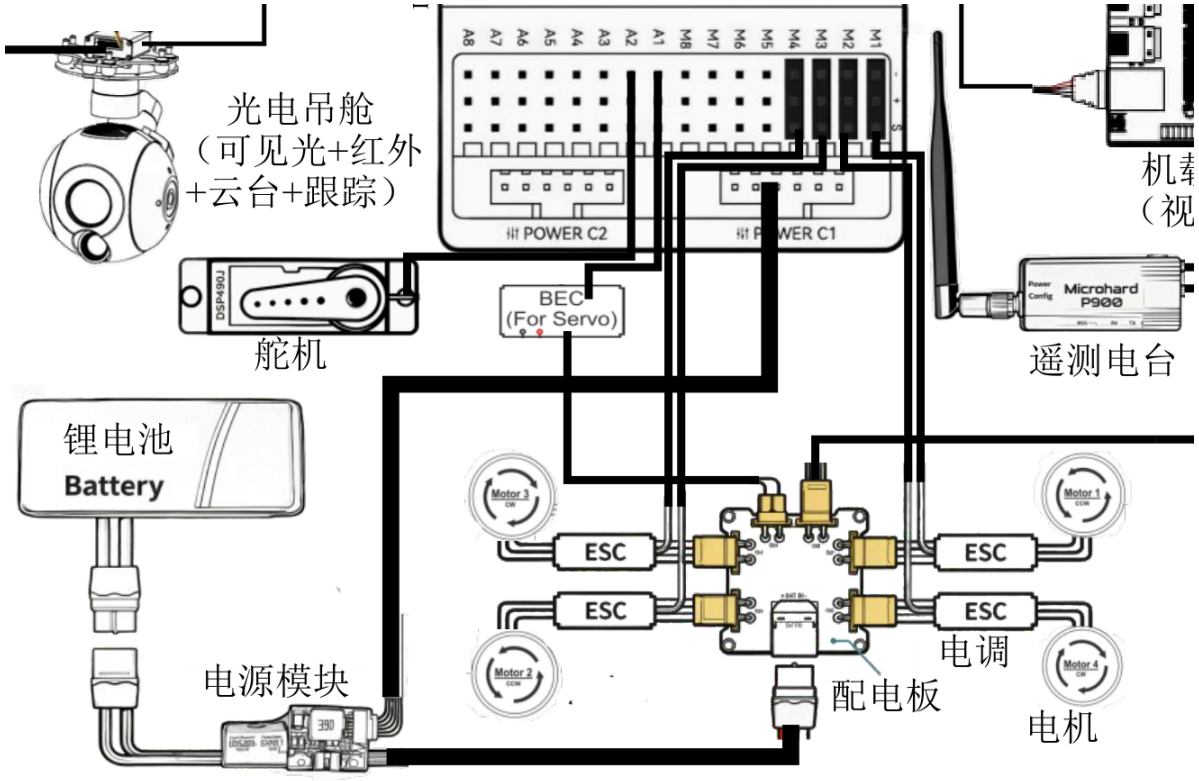


图1.13 局部：多旋翼动力与信号接线

- **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。

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。

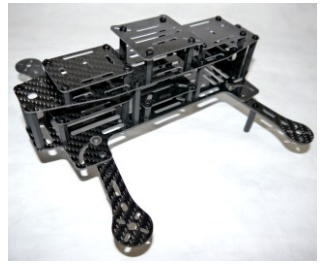


功能层与部件系统并非一一对应，一个部件可以参与多项系统功能。

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（I^2C）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。



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



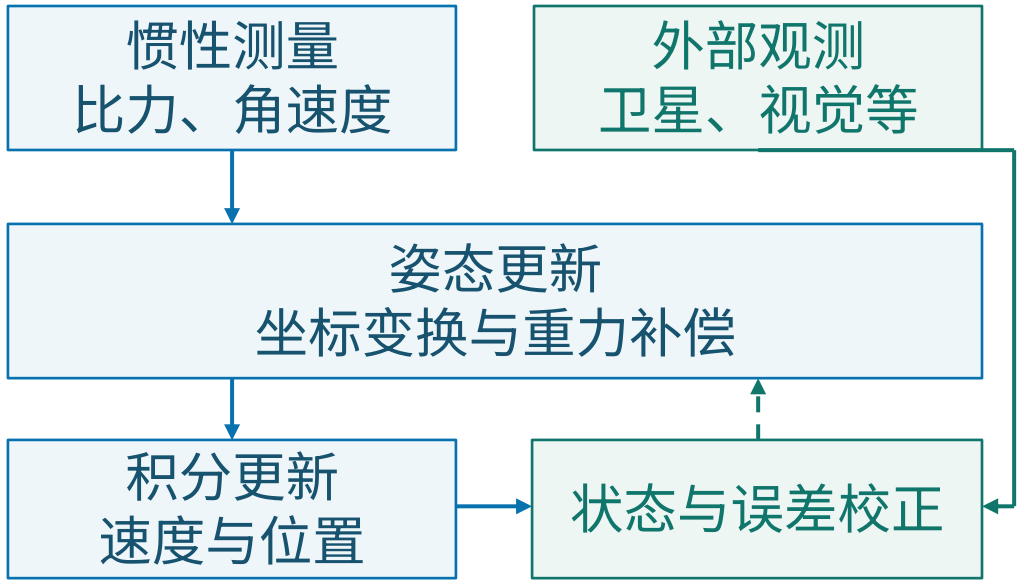
气压计
辅助高度估计

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。



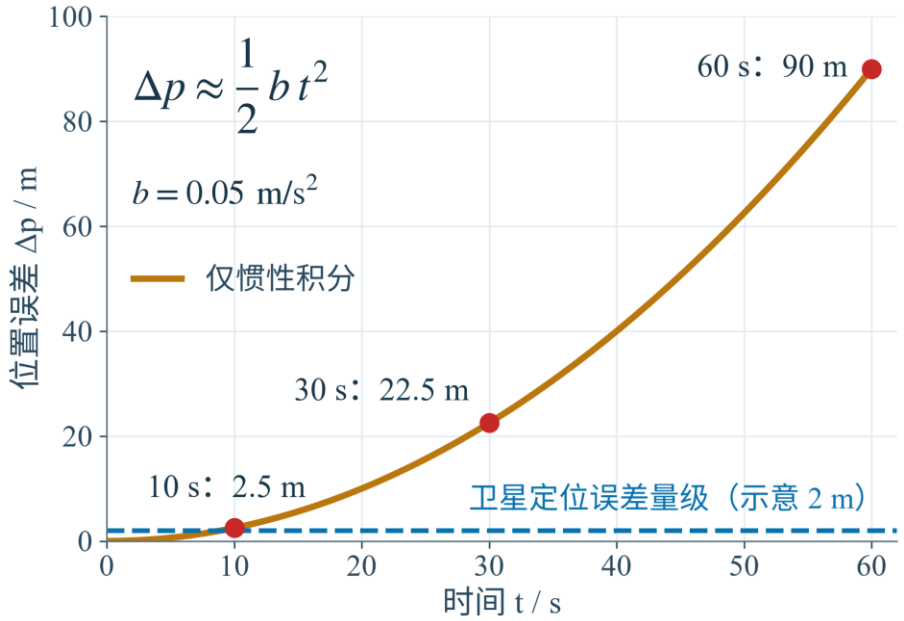
校正后的状态作为后续更新的起点

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：**$b = 0.05\ \mathrm{m/s^2}$（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。

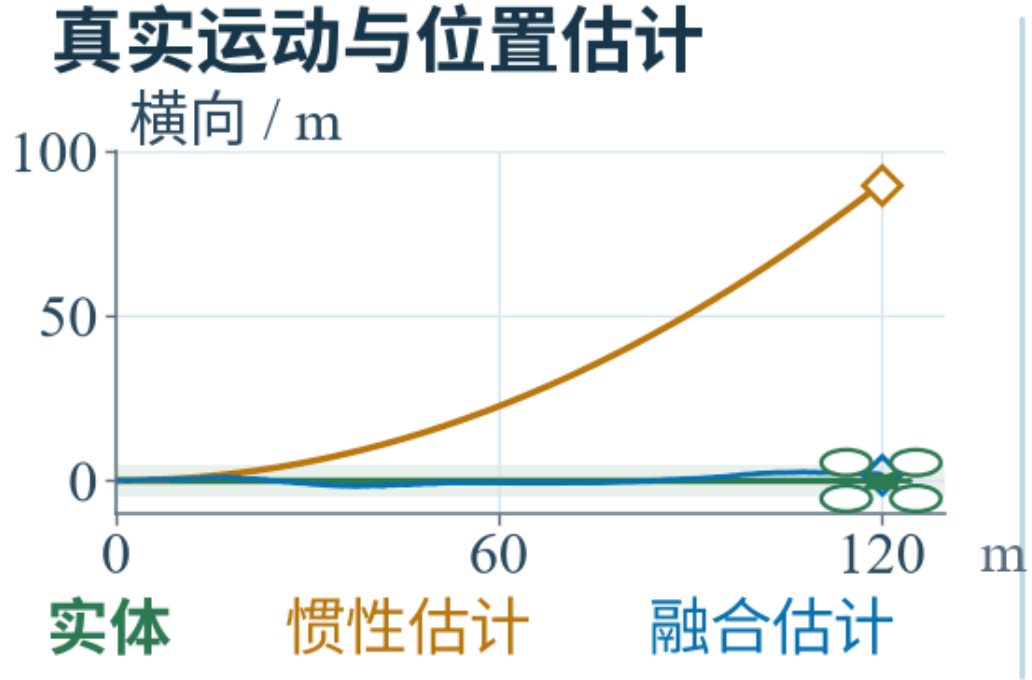


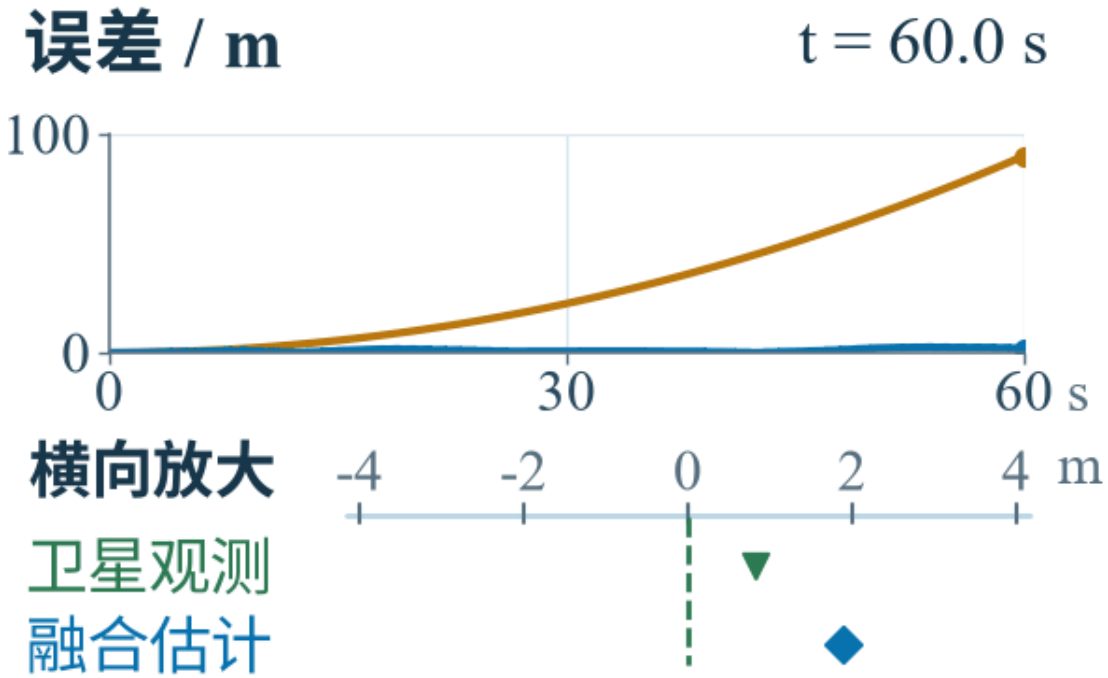
图：惯性积分的位置误差曲线

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





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。



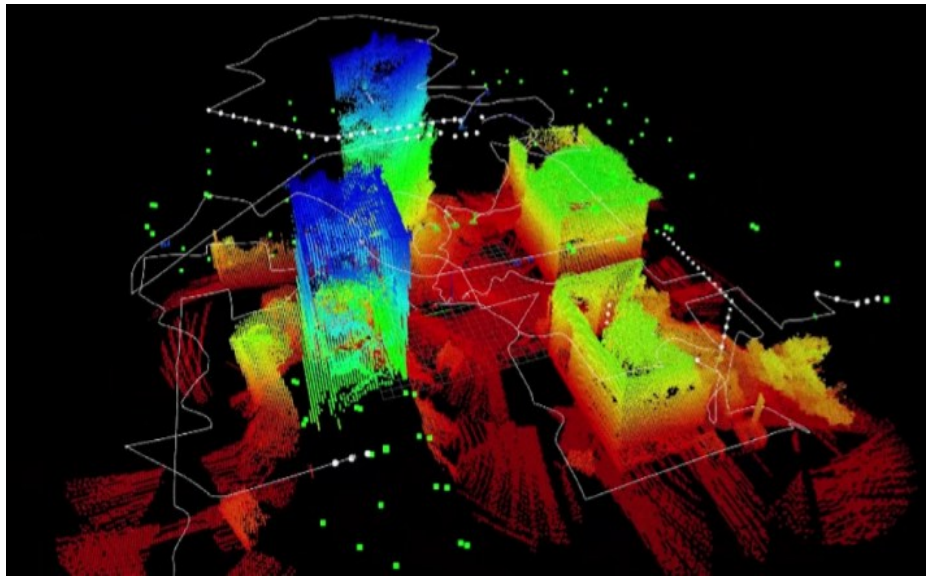
GNSS定位：传播时间乘光速得伪距，含接收机钟差；用四颗以上卫星联合解算三维位置与钟差。

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。



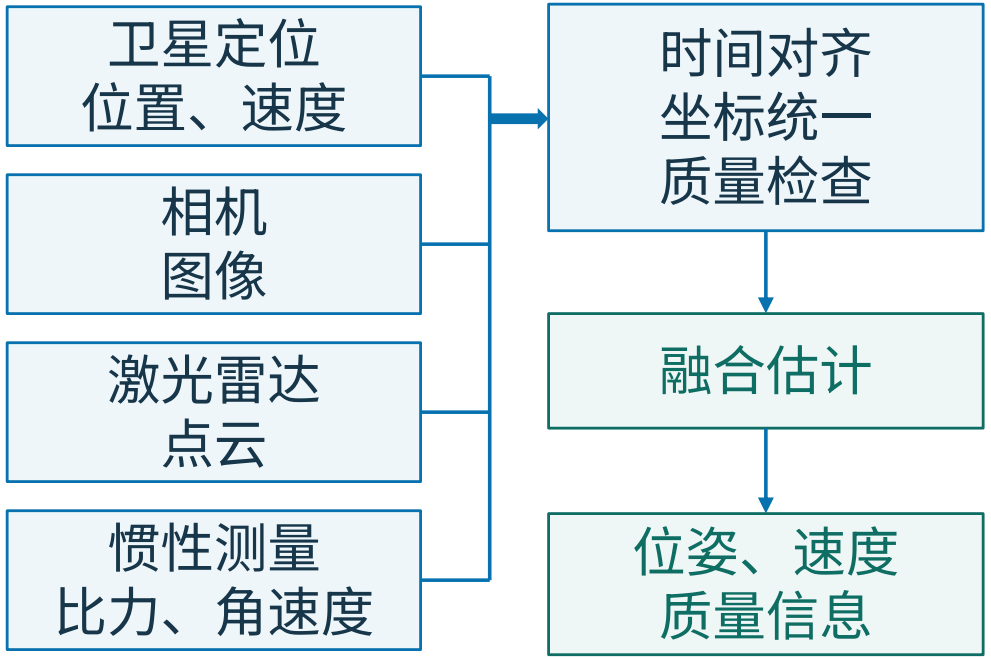
同步定位与建图（SLAM）：用相机或激光雷达同时估计自身位姿、构建地图。

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。

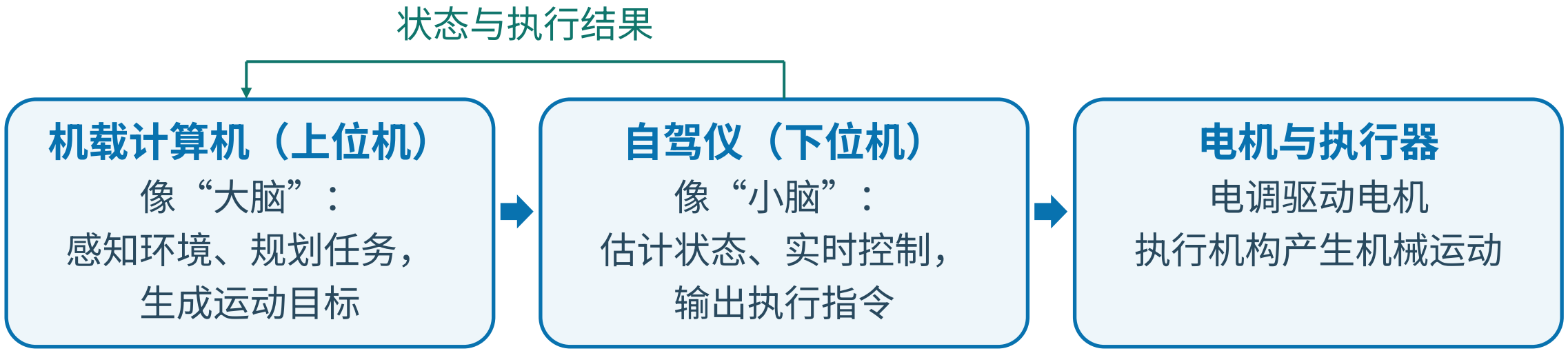
电机 / 动力线 ⟷ 距离 ⟷ 外置磁力计

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。

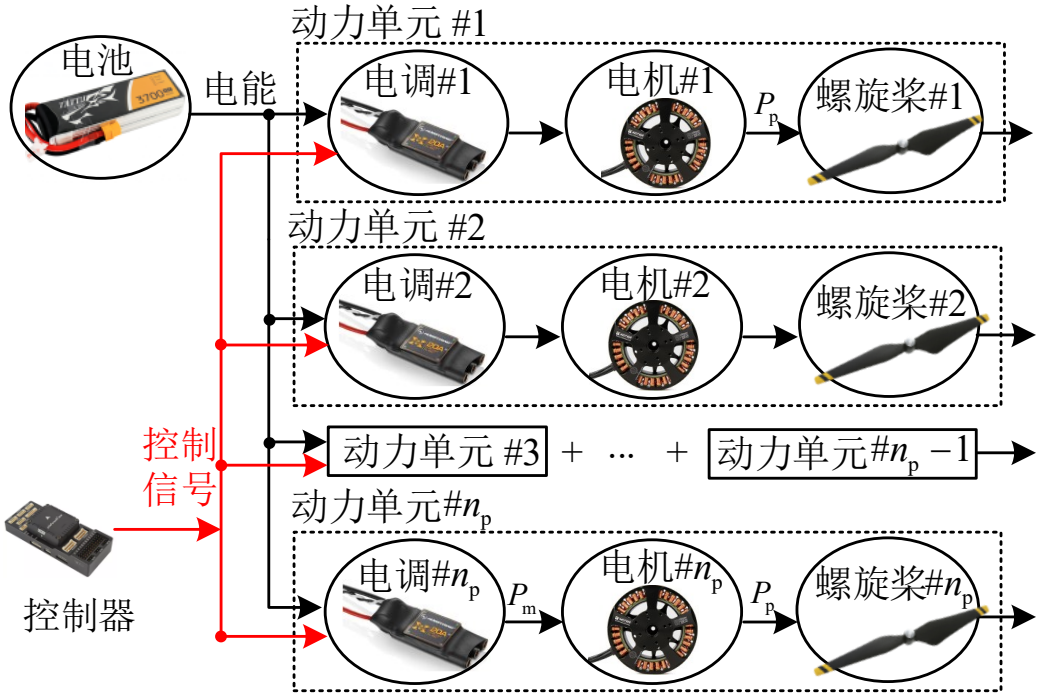
部件	硬件构成	运行内容
自驾仪	微控制单元（MCU，集成处理器、存储与输入输出的芯片）、板载传感器与接口	实时调度、状态估计、运动控制与保护
机载计算机	Orin NX、RK3588、树莓派等计算平台	操作系统、感知、规划；按接口与自驾仪协作

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。

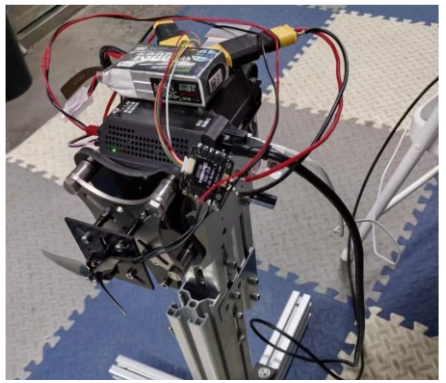
1.3.2 组成与设计原理：驱动执行系统

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

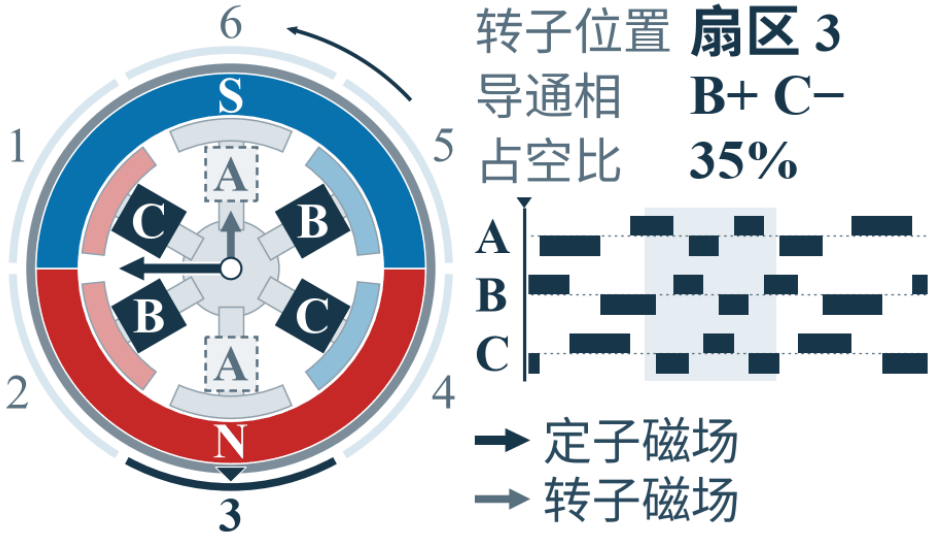
同一桨轴，方向相反

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。



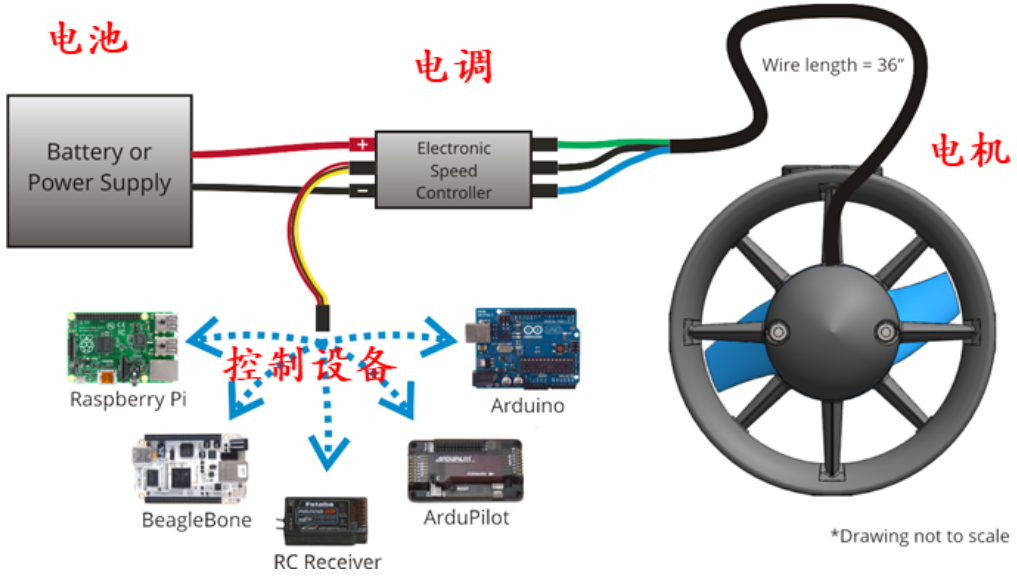
原理：无刷电机通过电子换相器按照转子位置依次控制定子绕组通电，形成旋转磁场并驱动永磁转子持续转动。

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。

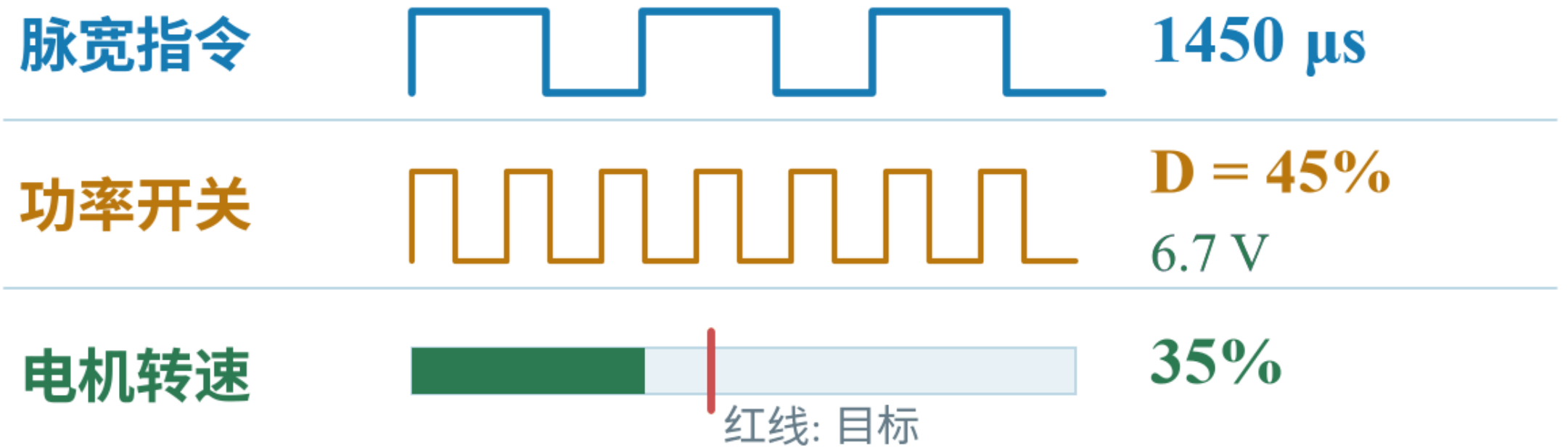


原理：电调依据转子位置安排三相导通顺序，并用PWM调节输出电压，完成换相与功率控制。

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



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。

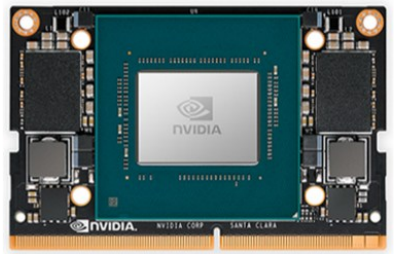
1.3.2 组成与设计原理：驱动执行系统

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。

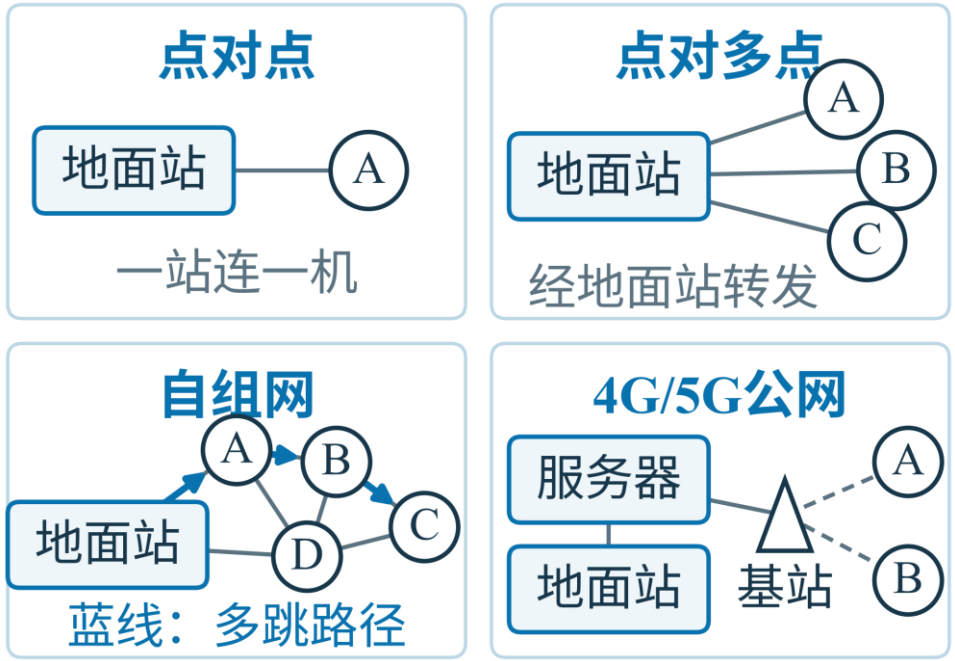
链路	常见频段示例	传输取舍
遥控通信	2.4 GHz 等	连续更新操纵量 时延与抖动影响响应
数传通信	433 MHz 或 915 MHz	状态按需更新 任务下发需要确认
图传通信	5.8 GHz 等	提高画质占用更多带宽 压缩与缓存影响延迟

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

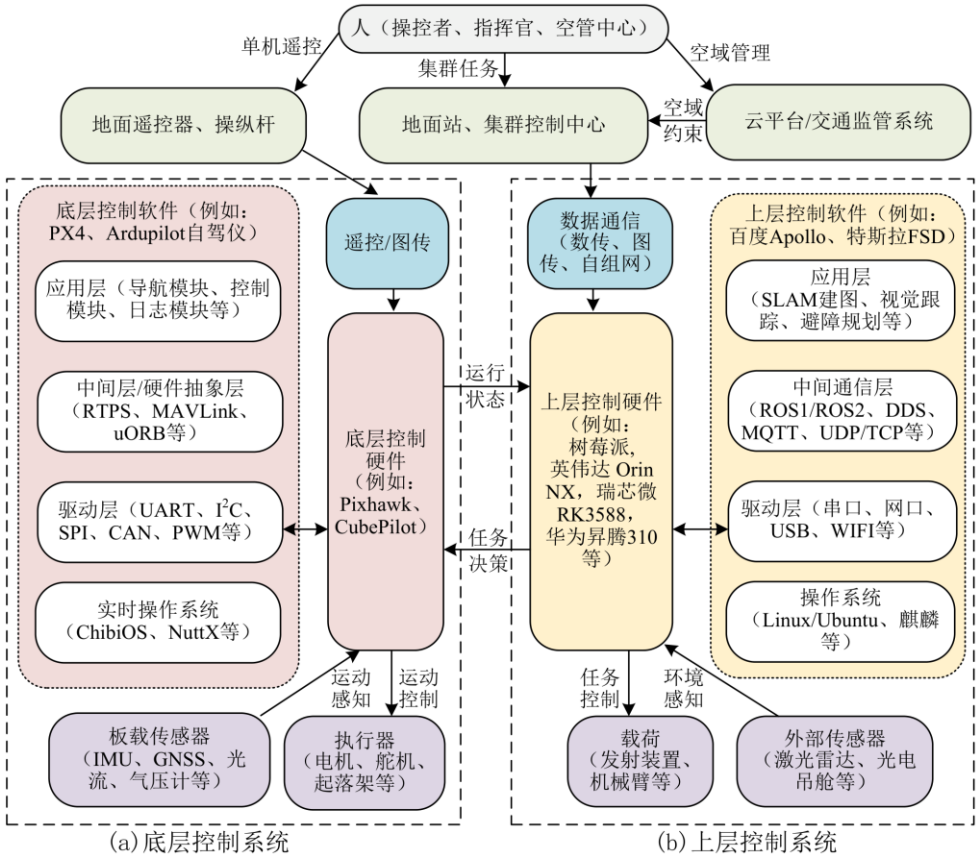
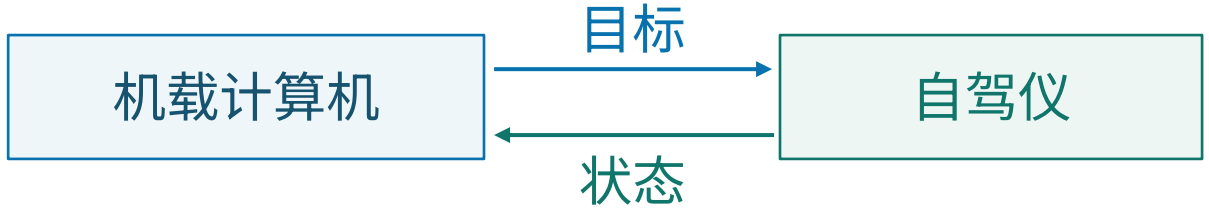


图1.14 无人系统控制结构框架

- **底层闭环：** 自驾仪读取传感器，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

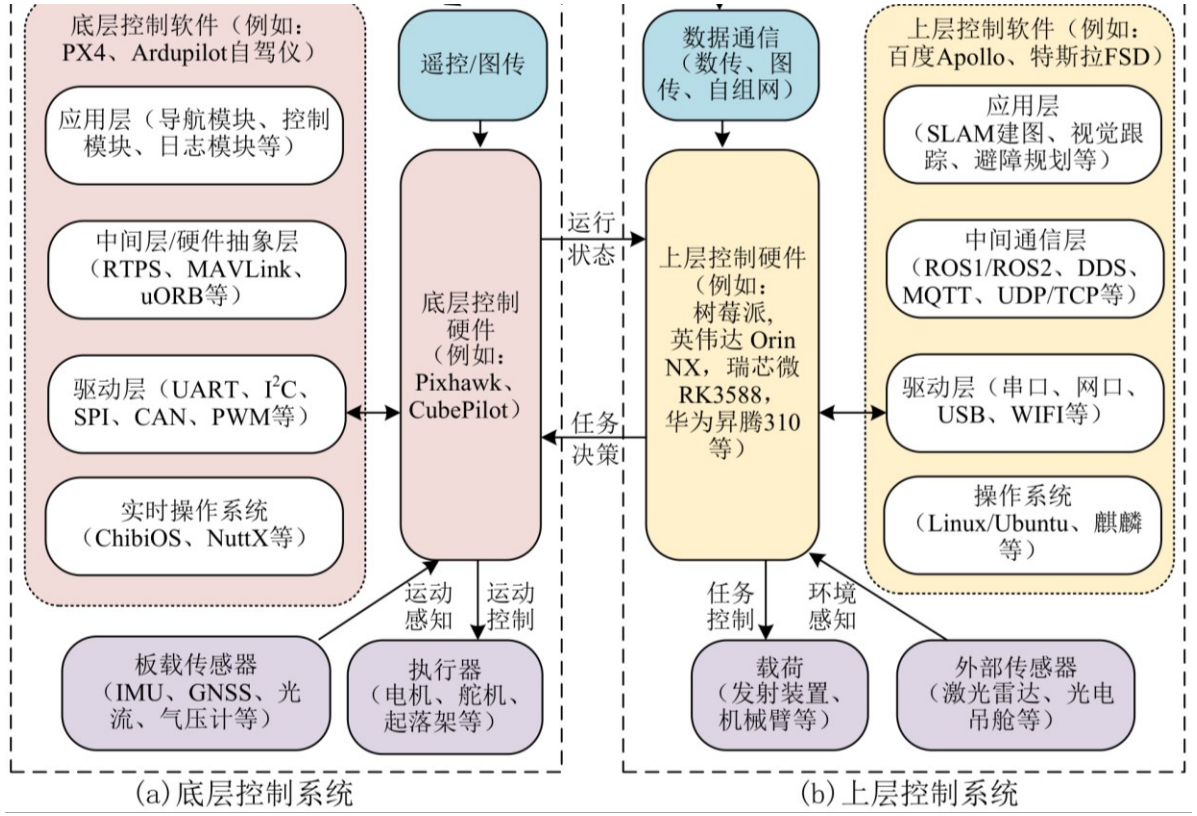


图1.14 局部：底层与上层的运行支路

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。

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

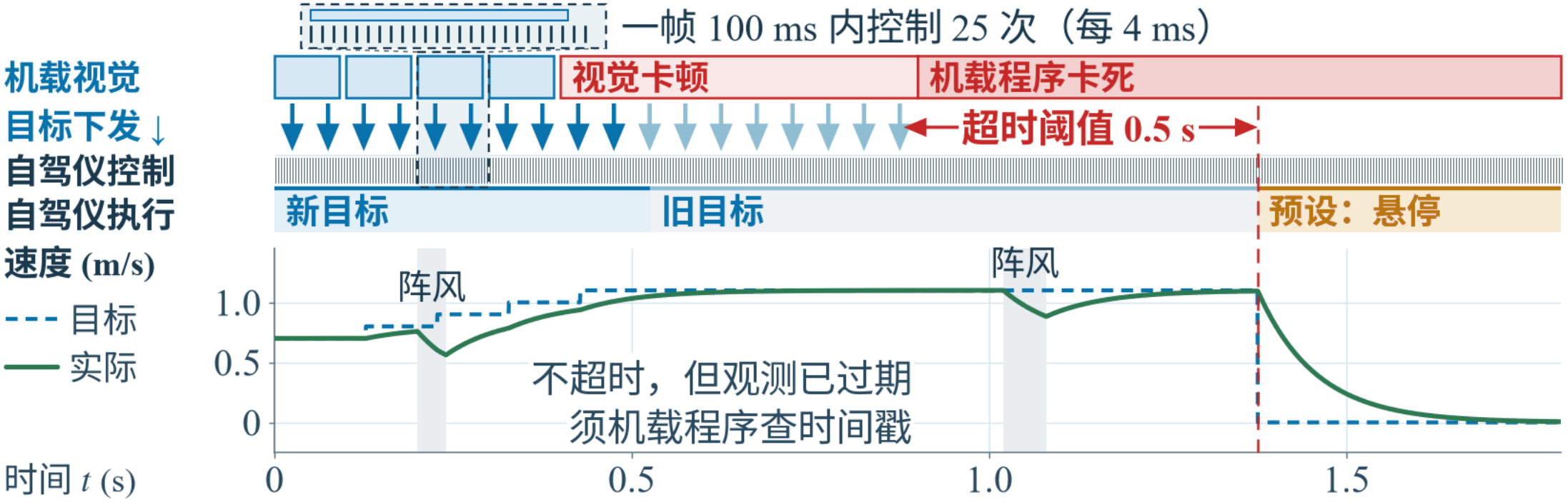
> 图像处理期间，姿态控制仍须持续更新；上层输出的是可跟踪目标。

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



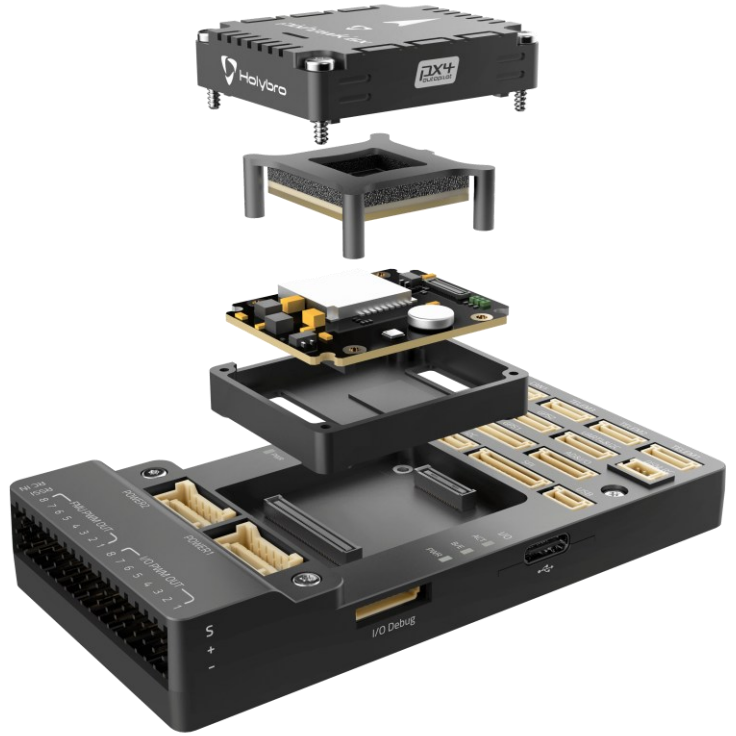
图：分层控制的更新时间、通信时延与超时降级（原理示意）

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

PX4 autopilot
自驾仪软件

THE AUTOWARE FOUNDATION
自动驾驶全栈示例

ARDUPILOT
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。

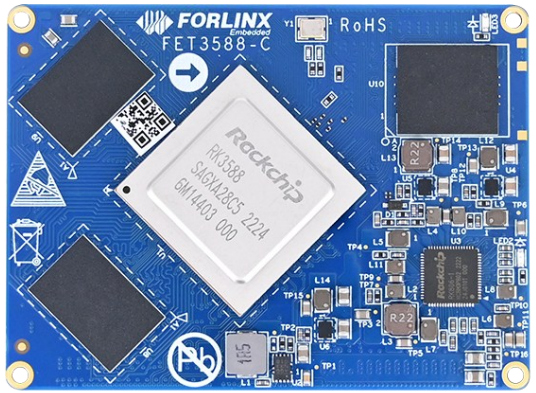
1.3.3 智能控制架构：上层控制系统

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，建图定位维护位姿与地图，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。

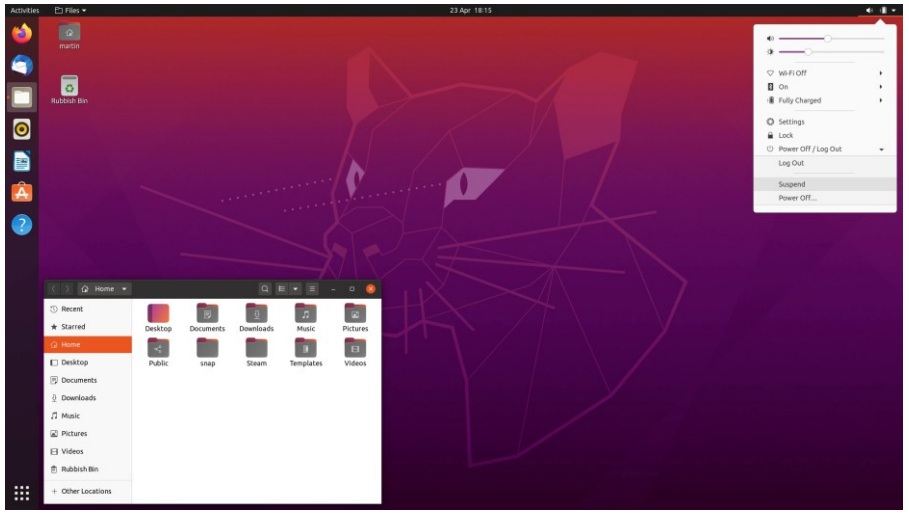
1.3.3 智能控制架构：上层控制系统

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。

ROS

ubuntu

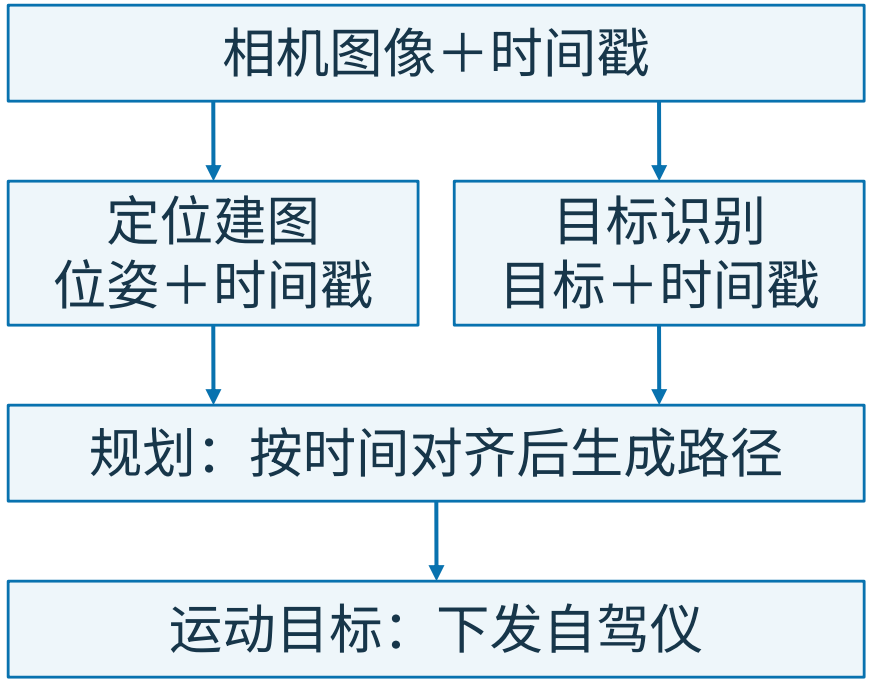


操作系统管理硬件资源，中间件在模块间传递数据，二者支撑应用算法运行。

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。



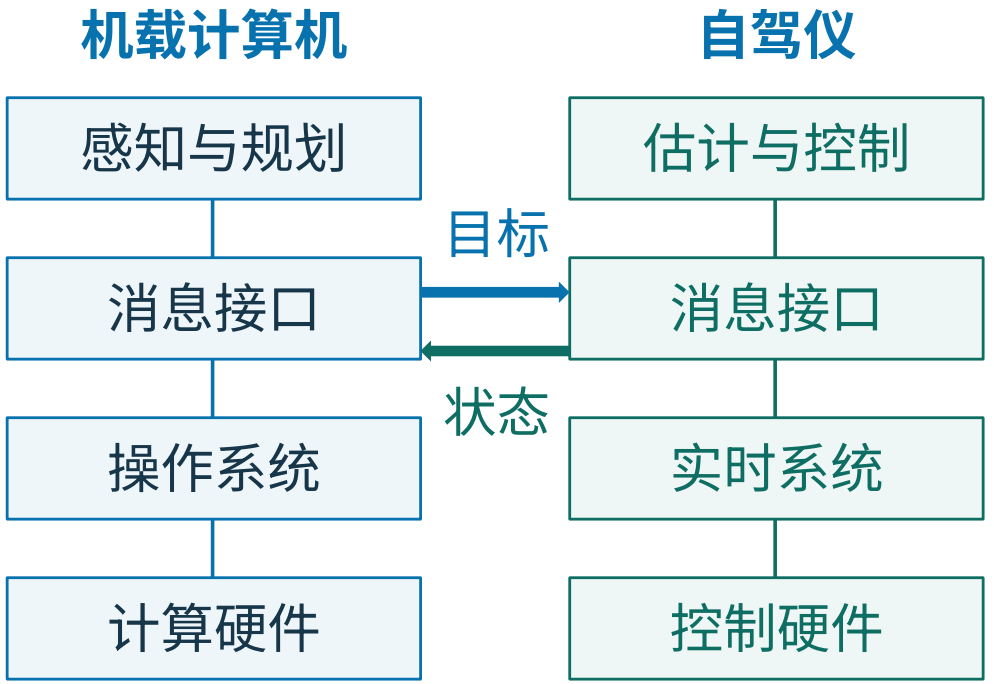
图：机载视觉数据的并行处理示意

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。



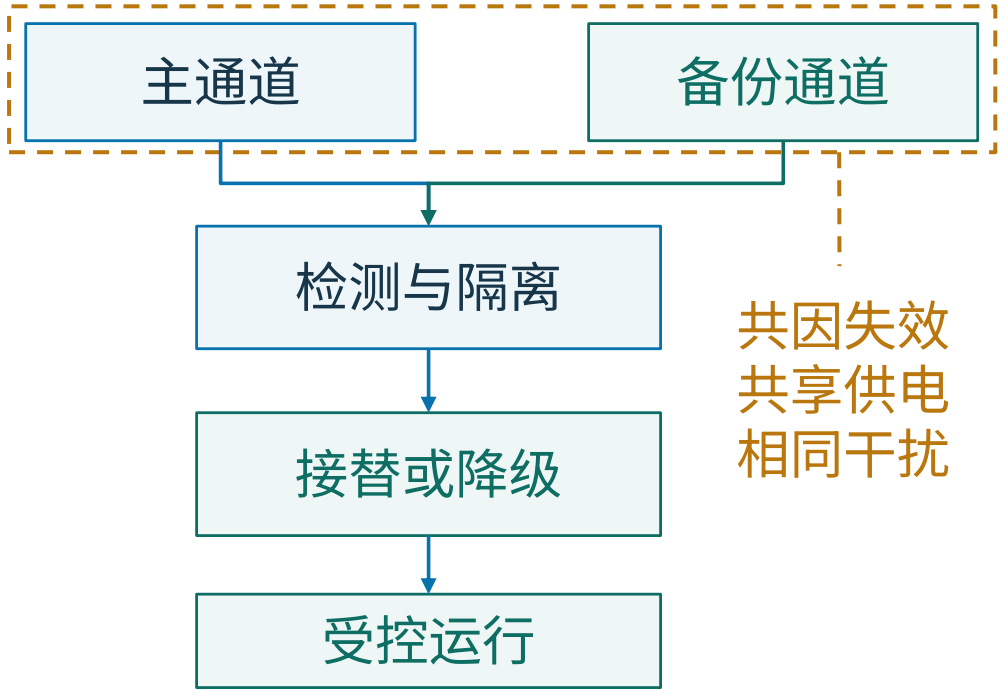
图：软件分层与双向接口示意图。

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。