智能无人系统控制实践

第一章 绪论

作者：戴训华　中南大学

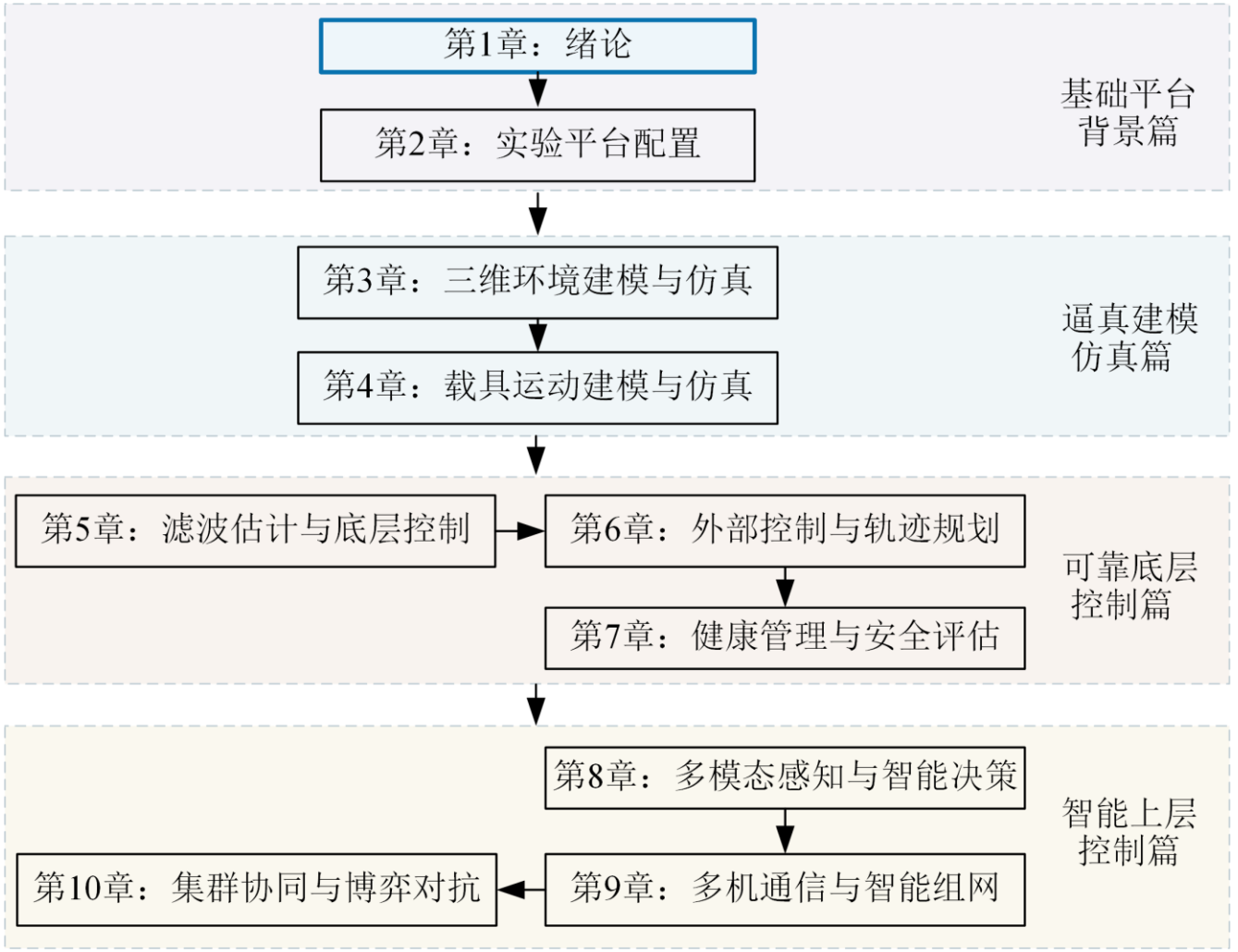
主页：https://faculty.csu.edu.cn/daixunhua

邮箱：dai.xh@csu.edu.cn

平台官网：http://rflysim.com

配套教材





教材：戴训华，全权，任雪峰. 智能无人系统控制实践[M]. 北京：电子工业出版社，2026.

本章学习目标

学完第一章能够完成什么

1. 能辨析核心概念、平台类型及无人系统的发展方向
2. 能解释系统架构、坐标关系与不同载具的控制原理
3. 能说明无人机装配、校准调试与分级验证的基本流程
4. 能利用RflySim工具链和配套例程规划后续学习与实验

学会解释任务、动手验证系统，才能把概念用于工程。

本章目录

第一章：概念、原理与实验实践

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

本节四个教学单元

1.1.1 智能无人系统概念

教材对应：第 1.1.1.1 节

1.1.2 智能无人系统分类方法

教材对应：第 1.1.1.2 节

1.1.3 详细分类与型号介绍

教材对应：第 1.1.1.3 节

1.1.4 无人集群系统应用

教材对应：第 1.1.1.4 节

1.1.1 智能无人系统概念：概念总览

本章的六个核心概念

说明：不同文献对相关概念的界定可能存在差异，以下定义用于明确这些术语在本课程中的含义。

- **无人系统：**泛指由机器代人执行任务、可遥控或自主运行的软硬件系统。
- **无人载具系统：**由无需机上驾驶员的载具与控制、通信等组成的系统。
- **具身智能：**通过身体的感知、行动与环境反馈实现的适应性智能。
- **离身智能：**不经身体参与物理任务闭环、主要依靠信息处理实现的智能。
- **智能无人系统：**以人工智能实现自主感知、推理、决策与执行的无人系统。
- **智能无人集群系统：**由多个智能无人单元协同完成任务的多智能体系统。

完全无人、自动作业是通用人工智能(AGI)的最终追求，带动技术的分化与融合

1.1.1 智能无人系统概念：无人载具系统

从运载工具到智能任务终端

说明：“完全无人”主要是指任务执行过程无需人类干预，实际上所有任务都应由人审核发布，而不是完全让机器自行决定，这会产生失控风险。

- **系统组成：**以能改变自身本体位置的载具为核心，配合感知、控制与通信系统。载荷可以是相机、武器、货物或乘员，“载具”并不专指载客工具。
- **三种控制方式：**遥控—由人给出操纵指令；自动控制—按给定目标与规则运行；智能控制—利用环境信息和任务要求，自主调整行动方案。
- **概念示例：**人工看画面远程操控绕障属于遥控；按预设航线飞行属于自动控制；识别新增障碍并自动重新规划路线，属于智能控制（环境感知与自主决策）。
- **模式组合：**同一平台可切换遥控与自主方式；机上无人不等于无需人参与。自主程度还要看谁监控环境、执行驾驶，以及谁在异常时接管或处置风险。

人的干预逐渐减少，智能控制的占比逐渐增加，最终目标是完全无人

1.1 概念分类与应用

1.1.1 智能无人系统概念：驾驶自动化分级

从应急辅助到完全自动驾驶

说明：驾驶自动化的人机任务分工可为其他无人系统研发提供思路；评价须结合任务与运行条件，安全保障与接管分工仍是关键。

依据《汽车驾驶自动化分级》：L0-L2为驾驶辅助，L3-L5为自动驾驶。

等级与名称	功能简述（系统启用时）
L0 应急辅助	预警或短时制动等应急干预，仍由人持续驾驶。
L1 部分驾驶辅助	持续辅助转向或加减速中的一项，如自适应巡航。
L2 组合驾驶辅助	同时辅助转向和加减速，驾驶员持续监控。
L3 有条件自动驾驶	在规定条件内自动驾驶，必要时请求人接管。
L4 高度自动驾驶	在规定条件内自主驾驶与处置风险，无需人接管。
L5 完全自动驾驶	在任何可行驶条件下自主驾驶与处置风险。

任务分工：L2由人监控环境；L3由系统驾驶，人须按请求接管。

标准原文：GB/T 40429-2021《汽车驾驶自动化分级》；SAE J3016

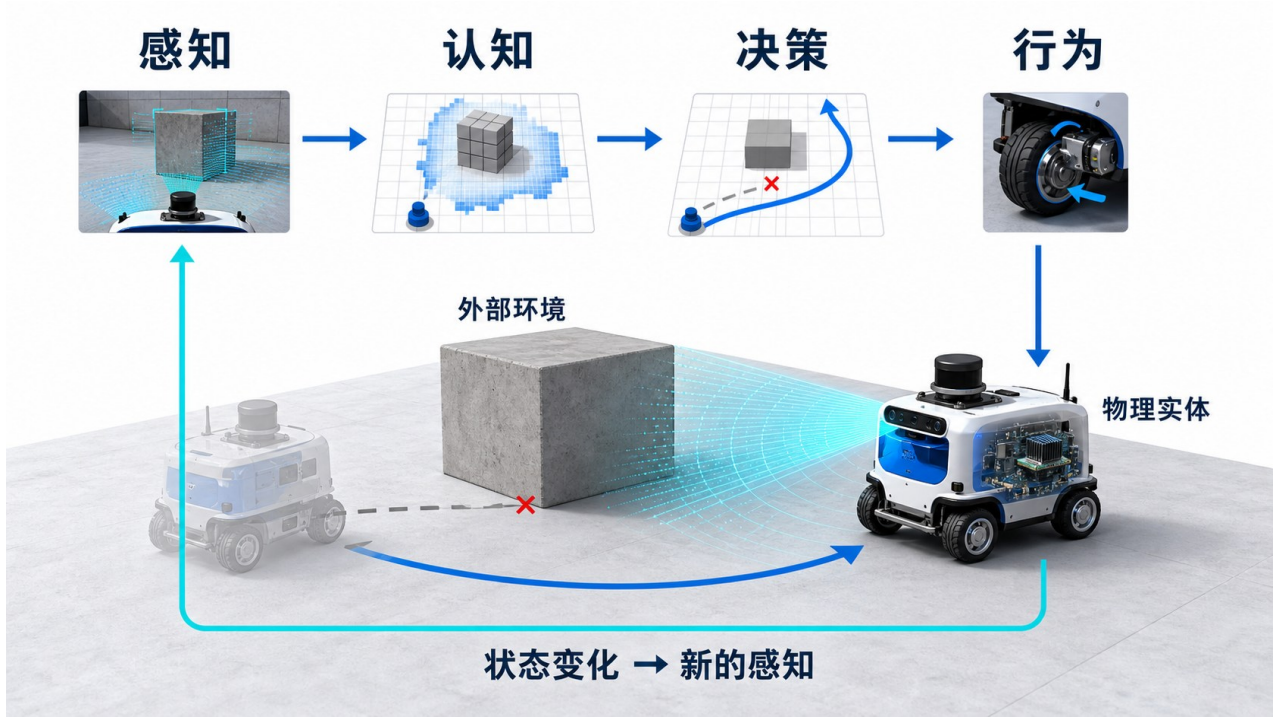
https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=4754CB1B7AD798F288C52D916BFECA34

无人载具要让机器替代驾驶员，而具身智能要让机器替代人类完成通用任务

1.1.1 智能无人系统概念：具身智能·架构分解

通过身体的感知、行动与环境反馈实现的适应性智能

- **感知与认知：**获取自身与环境信息，理解位置、障碍和任务要求。
- **决策与行为：**选择行动方案，由控制器与执行机构驱动身体运动。
- **环境反馈：**行动改变观察，新信息修正判断；身体限定可用动作。
- **区别联系：**道路驾驶侧重道路感知与车辆运动控制；多关节操作还需协调关节、末端与接触力。二者都可体现具身智能，关节数量不是判据。



具身智能把判断落实到身体行动，能力在与环境的交互中体现。

1.1.1 智能无人系统概念：具身智能·避障与抓取

绕障到达，再识别抓取：两轮闭环完成任务



图：绕障与抓取都经历感知、认知、决策和行为，反馈再带来新的感知

面对变化，机器既要会修正动作，也要能在必要时改变方案。

1.1.1 智能无人系统概念：具身智能·任务侧重点

无人载具重移动，具身操作重环境交互



- **移动任务：**巡航、搜索和运输侧重位置、轨迹与姿态；感知服务导航与避障。
- **接触操作：**抓取、装配与贴壁探测侧重末端位置、接触力和操作结果。
- **任务协调：**转场时先保证移动，接触时协调位置与力；自主导航同样可以体现具身智能。

典型侧重：在一些典型场景中，可以认为无人载具系统更关注“**运动＞感知＞操控**”，而具身智能则更关注“**操控＞感知＞运动**”。

移动重轨迹姿态，操作重关节协调、末端位置与接触力，重点由任务决定。

要点：具身智能并不局限于人形。日常作业中，人形更能适配人类改造的环境；而特种任务与行业场景则可根据需求灵活定制形态。

1.1.1 智能无人系统概念：具身智能·技术融合

无人载具与具身智能的融合

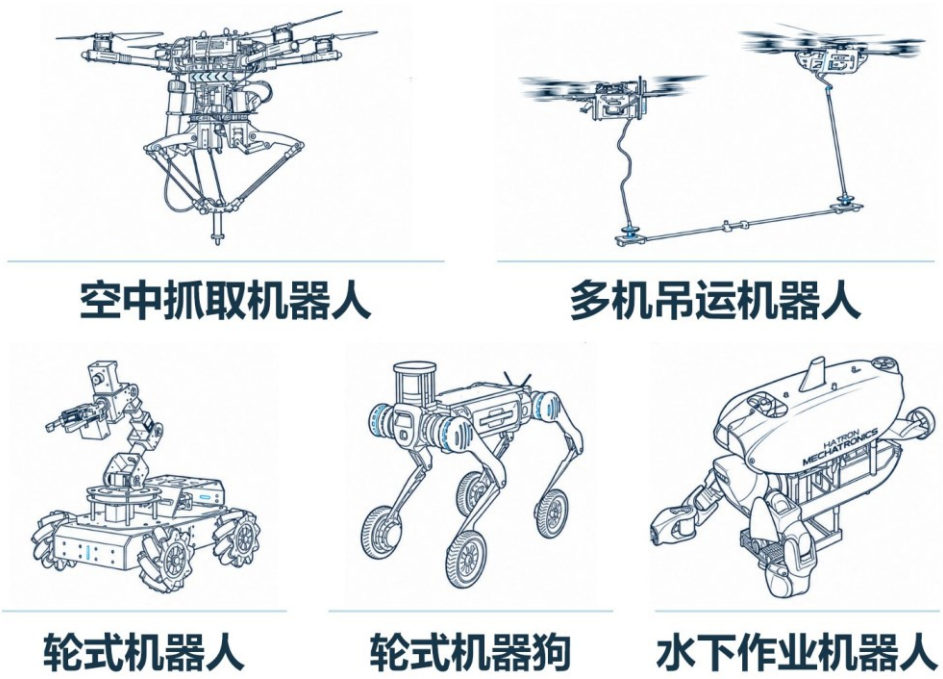


图 1.2 无人系统融合具身智能

无人载具系统和具身智能系统目前呈现相互融合的趋势，最终目标是兼具良好空间移动性和环境交互性的复合系统：

- **空中作业：**无人机加机械臂实现飞行与抓取，多机吊运需要协调载具与载荷运动，因此衍生出了空中具身智能的概念。
- **地面与水下：**轮式、轮足式及水下作业机器人，将移动能力与环境操作相结合。
- **共同机制：**感知理解环境，决策协调移动与操作，执行反馈修正后续动作。

移动与操作相结合，让机器从“到达现场”走向“完成现场工作”。

1.1.1 智能无人系统概念：具身智能·共同开发框架

统一框架支撑技术复用与经验共享

注：无人机、无人驾驶、机器人等领域从各自为政，转向协同共享，加速无人系统的进化。

- **统一功能分工：**不同载具都可按感知、理解、决策、控制与执行组织系统，用明确的数据和动作接口连接各模块。
- **共享方法与数据：**目标识别、地图表示、路径规划及仿真训练方法可以复用；任务相近、传感条件匹配时，数据与训练经验也可共享。
- **保留身体差异：**飞机、车辆和机械臂的动作空间、动力学与接触条件不同，执行接口和底层控制分别适配，减少上层功能的重复开发。
- **巡检迁移例子：**裂纹识别可服务无人机与地面机器人；接近同一检查点时，前者规划飞行航迹，后者规划可通行地面路线。

共享感知与决策经验，有望减少不同机器人之间的重复开发。

1.1.1 智能无人系统概念：离身智能·信息处理与任务组织

依据信息理解问题、组织任务

注：具身智能强调身体、认知与环境协同；离身智能侧重信息处理，二者可以相互融合。

- **定义与区别：**离身智能依据信息输入完成推理与生成，不通过身体（实体）参与物理任务闭环；具身智能则把身体行动及其环境反馈纳入过程。
- **模型能力：**语言模型处理文本与代码，多模态模型还可结合图像等信息。例如，用ChatGPT分析巡检照片并形成检查报告。
- **任务智能体：**智能体围绕目标调用模型与工具，根据工具结果继续处理任务。例如，用Codex阅读代码、修改程序并运行测试。
- **模型与执行：**模型提供能力，智能体组织任务，实体执行还需要控制与反馈。报告或软件测试结果属于信息输出，不直接等同于机器人行动。

信息智能帮助人理解问题，接入具身闭环后可进一步参与现场行动。

1.1.1 智能无人系统概念：具身与离身·任务对照

具身与离身：巡检信息分析与实体闭环

注：当前以各类大模型为代表的离身智能响应速度较慢，并不一定能满足具身领域的实时感知决策需求，需通过合理架构融合。

同一任务：发现设施缺陷并完成检查

比较项目	离身智能：分析巡检信息	具身智能：自主完成巡检
输入	照片、描述和已有记录	持续更新的观察与自身状态
输出	缺陷报告或检查方案	经规划与控制产生实际行动
反馈	检索或软件工具的结果	移动与操作改变后续观察
判断对象	独立信息助手或模型应用	身体、算法与环境交互整体

具身性由整个系统的物理交互方式决定，云端或机载是计算的部署位置。

让大模型从“给建议”走向“做事情”，需要把推理接入实体行动。

1.1.1 智能无人系统概念：具身与离身融合·模型接入

云端与机载模型接入同一实体任务闭环

云端或机载模型
理解任务与提出方案 → **规划与控制接口**
校验目标并执行 → **载具与环境**
传感器返回实际状态

实际状态与结果返回上层

- **云端调用：**可使用远端模型与集中算力，数据传输和响应时间受网络影响。
- **机载运行：**减少外网依赖，适合本地感知与交互，但受算力、内存和功耗限制。
- **上下层分工：**模型把“检查这面墙”解释为检查点等子目标；
  规划与控制把子目标变成可执行运动，传感反馈检验结果；
  接口限制动作范围并保留停止与接管。

从模型方案走向实体行动，关键是打通传感、执行和结果反馈。

1.1.1 智能无人系统概念：具身与离身融合·工具调用

从软件工具调用到物理设备操作

注：Claude Code/Codex/Workbuddy等桌面智能体已能完成大多软件任务的自动执行，趋势是过渡到物理世界的任务执行。

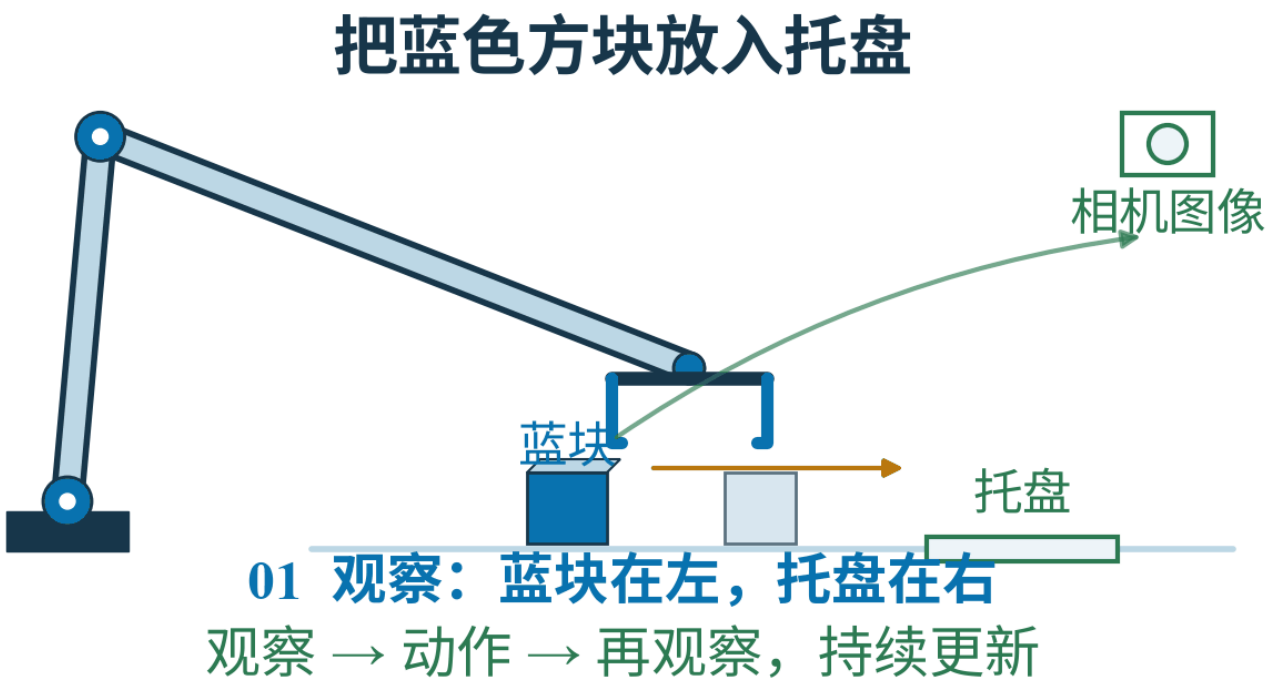
- **技术趋势：**大模型从问答与内容生成，扩展到调用工具、读取设备状态，组织实体操作，并根据真实反馈调整后续任务。
- **接口机制：**将设备能力、可读状态和可执行动作组织成统一接口；智能体安排任务，驱动与控制器把命令转换为实际动作。
- **应用例子：**Anthropic 提出的模型硬件标准（MHS）协议，支持连接移液器、机械臂与读板器，智能体协调多设备操作，再根据测量结果调整实验参数。
- **分层执行：**模型负责较慢的任务编排，快速动作由本地确定性程序完成；设备控制、权限限制与急停独立保留，保障操作的可控性。

MHS研究预览示例（2026-08）：https://www.modelhardwarestandard.com/

除了调用设备功能，模型还可以学习把人的要求转成动作。

1.1.1 智能无人系统概念：视觉-语言-动作（VLA）模型·动作闭环

从理解指令到生成动作：把模型接入感知与行动闭环



- **V 视觉：** 提供蓝块与托盘的位置。
- **L 语言：** 指定“把蓝块放入托盘”。
- **A 动作：** 输出位置与开合目标。
- **闭环：** 控制器执行短动作，再观察并更新后续动作。

VLA结构与动作序列（论文第III节）：https://arxiv.org/abs/2604.15483

听懂要求不等于会操作，机器人还要从操作经验中学习怎样完成任务。

1.1.1 智能无人系统概念：视觉-语言-动作（VLA）模型·训练与迁移

视觉语言知识与机器人示范共同训练动作策略

视觉语言模型 理解场景与任务 → **动作生成模块** 结合机器人状态 → **数值动作指令** 关节／末端／夹爪

- **训练机制：**预训练提供物体与语言的关联；机器人示范记录图像、指令和动作，调整模型参数，使其学会在相应观察下选择动作。
- **动作表示：**可将动作编码为离散符号再还原为数值，或用动作网络生成连续序列。控制器跟踪关节或末端目标，执行后的观察成为下一次输入。
- **优势与边界：**共享语义与操作经验，有助于复用到新物体或指令；跨机器人迁移仍受训练数据、动作接口与工作空间约束，必要时再训练适配。

VLA训练、动作编码与迁移：https://openvla.github.io/

学会怎样做之后，预判行动后果可进一步支持机器人自主决策。

1.1.1 智能无人系统概念：世界模型（World Model）·行动预测

根据当前状态与候选动作，预测后续变化

当前观察或状态
候选动作
→
世界模型
预测行动后果
→
后续状态或观察
供策略与规划使用

- **与VLA的区别：**VLA生成动作；世界模型表示环境变化规律，根据当前观察和候选动作预测后续状态，为规划器比较行动提供依据。
- **模型协作：**语言或多模态模型理解任务，世界模型支持空间与动态推演，规划器比较候选行动，控制器执行选定动作。
- **具身关系：**它是可选的预测模块，可用于离线推演或实体闭环；表示可为图像、状态或潜在特征，不限于显式三维场景。

世界模型原理与实验：https://worldmodels.github.io/

先在模型中推演，再到环境中检验，有望减少机器人试错的代价。

1.1.1 智能无人系统概念：世界模型（World Model）·巡检应用

比较候选路线，用实际观察校正预测

- **行动前比较：**巡检车接近遮挡区域时，预测不同路线的后续视野与碰撞风险，结合任务目标选出更合适的候选行动。
- **学习与测试：**在预测环境中尝试多种策略，减少直接在实物上探索的次数；再用独立仿真与真实数据检验策略能否适应目标环境。
- **预测误差：**漏掉障碍或错误预测接触，会使危险动作看起来可行；长时间连续推演还会累积误差，偏离实际状态。
- **执行时修正：**采用短时预测，随新观察更新状态；碰撞约束、急停与人工接管独立保留，避免把生成的画面当作真实测量。

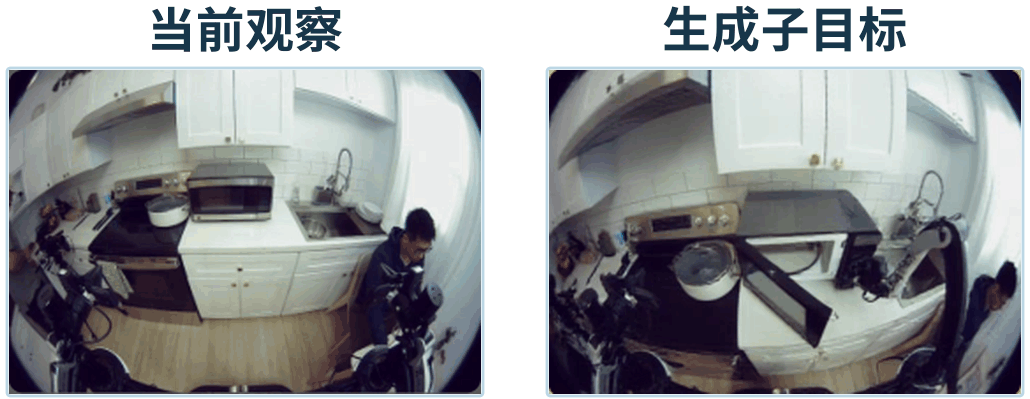
交互世界模型示例：https://deepmind.google/models/genie/

预测用于比较行动，真实反馈用于校正偏差，两者共同支持决策。

1.1.1 智能无人系统概念：VLA与世界模型协作

VLA生成动作，世界模型提供视觉子目标

按键打开微波炉



图：PI论文图3裁选译注，CC BY 4.0

π0.7任务演示与研究说明：https://www.pi.website/blog/pi07

- **已有能力：** π0.7（2026-04）在论文测试中完成叠衣、制作咖啡等任务，展示了跨任务复用能力。
- **图中机制：** 世界模型生成期望的近期画面，提示VLA生成动作；目标图不保证实际执行结果。
- **迁移条件：** 叠衣实验未用目标UR5e的叠衣数据，但使用了其他机器人数据及相关经验。

单智能体趋势：VLA生成动作，世界模型提供目标图像，两者可在实体闭环中协作。

1.1.1 智能无人系统概念：智能集群·从单体到集群

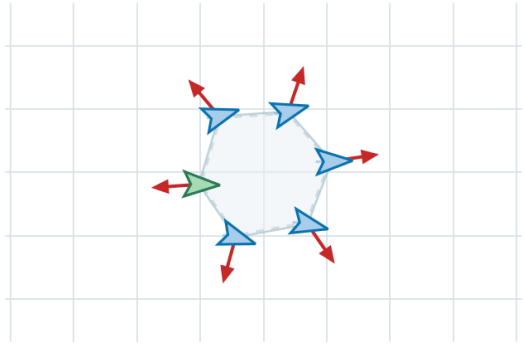
单体能力有限，多机分工扩大任务覆盖

- **视角扩展：**前面的例子以单个机器人与环境交互为主。巡检区域扩大、目标增多或任务并行时，视角转向多个智能体之间的协同。
- **任务收益：**多机分区巡检可扩大同时覆盖范围，空地协作可结合空中视野与近距离检查能力，具备余量时还能接替退出节点的任务。
- **协同代价：**同时运行带来重复覆盖、争用通道和碰撞风险；交换状态、分配任务与协调运动还会消耗通信、计算和保障资源。
- **形成协同：**共同目标需要明确分工与冲突处理。是否值得采用多机，取决于任务收益能否抵消组织开销，而不是只看设备数量。

多机协作的价值，在于完成单机难以承担的任务。

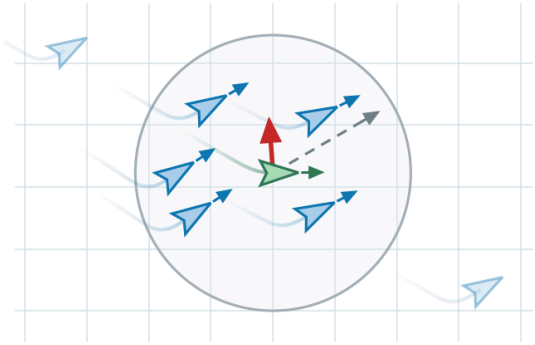
1.1.1 智能无人系统概念：智能集群·群体智能基础

局部交互如何形成整体行为



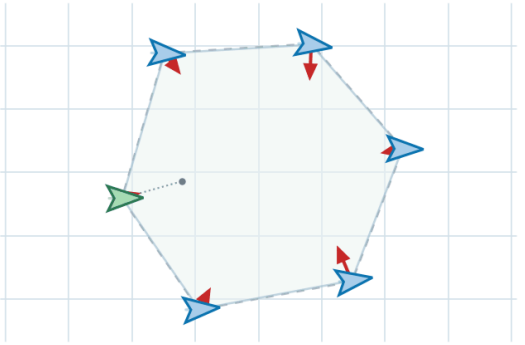
分离

避免与近邻过度接近



对齐

参考近邻的运动方向



聚合

趋向近邻的聚集位置

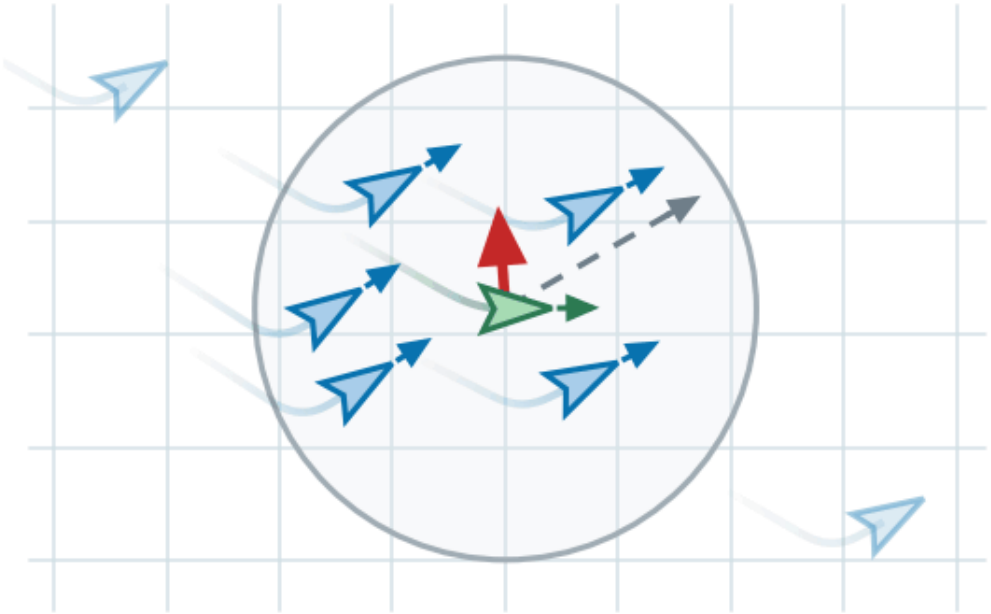
群体智能研究多个个体通过局部交互和自组织形成的集体行为。Boids以三条局部规则模拟群体运动，为协同控制提供启发。**联想**：蜂群、蚁群和狼群的分工协作。

Boids原始模型与演示：https://www.red3d.com/cwr/boids/

局部规则与相互作用可以形成群体行为，工程协同还需任务与约束。

1.1.1 智能无人系统概念：智能集群·Boids规则

从邻居速度到个体转向



邻域内速度求平均

灰虚线：平均速度方向

红箭头：转向加速度

航向差：29.3度

圆外个体不参与平均

图：对齐规则中邻域速度平均与关注个体转向（教学仿真）

局部对齐让个体形成共同方向，是群体协调的一种基础机制。

1.1.1 智能无人系统概念：智能集群·系统组成

共同任务、信息交换与协同决策

- **智能单元：**各节点能够感知自身和环境，在给定任务范围内作出局部判断并执行行动，承担集群分配给自己的工作。
- **通信与协同：**节点交换状态和任务信息，通过协同算法分配目标、调整路线，使局部行动支持共同任务，减少重复工作与冲突。
- **巡检例子：**无人机发现可疑点并共享位置，地面机器人接近复查；复查结果更新任务清单，其他节点再调整后续分工。
- **组织方式：**自组织集群强调分布式控制，不依赖单一中心节点；工程多机也可采用集中或混合调度，视任务、通信与节点能力而定。

智能无人集群通过信息交换和行动协调完成共同任务，协同不等于同时运行。

1.1.1 智能无人系统概念：智能集群·能力支撑

智能、自主与重新分工支撑集群适应变化

- **智能性：**识别任务对象、理解环境状态并选择行动；例如结合共享图像筛选需要复查的设施，而不是无差别重复扫描。
- **自主性：**各节点在给定任务范围内完成导航与局部决策，不依赖人工持续操纵；超出能力范围时上报并进入预定处置。
- **灵活性：**新目标出现或节点退出时重新分工，让有余量的成员接续；接续能力取决于可用资源、连通性及重分配机制。
- **异构互补：**无人机负责广域观察，地面或水下机器人负责近距离作业；统一信息接口和任务分工把不同能力组合成整体。

集群自主性提高，有望让人从逐台操纵转向整体任务管理。

1.1.1 智能无人系统概念：智能集群·运行与监督

集群持续运行需要协调、保障与人工监督

- **分布控制与协作：**节点依据本地及邻近信息控制运动，共同目标约束任务分配，通过更新状态和意图减少冲突、协调执行时序。
- **可靠性：**任务分配考虑电量和故障状态，节点退出后由可用成员接续，以维持规定条件下的任务执行。
- **安全与安保：**避碰、限速和急停降低人员与设备伤害风险；身份认证、权限控制和消息校验防止未经授权的访问与操纵。
- **服务于人与监督：**人设定任务目标、更新优先级并查看运行状态；出现异常时，可停止、重分配任务或接管控制，保留清楚的责任与操作入口。

人通过任务下达、目标更新和紧急干预监督集群，必要时接管控制。

1.1.1 智能无人系统概念：关系回顾

概念关系：身体交互、信息处理与群体协同

目标：通用人工智能(AGI)
（具身、集群、无人化：不同维度）

- **身体交互：**无人载具与机器人融合，协调移动与环境操作。
- **信息处理：**离身模型提供理解与推理，接入反馈后参与实体任务。
- **协同扩展：**多个单元协同构成集群；椭圆表示联系，并非严格包含。

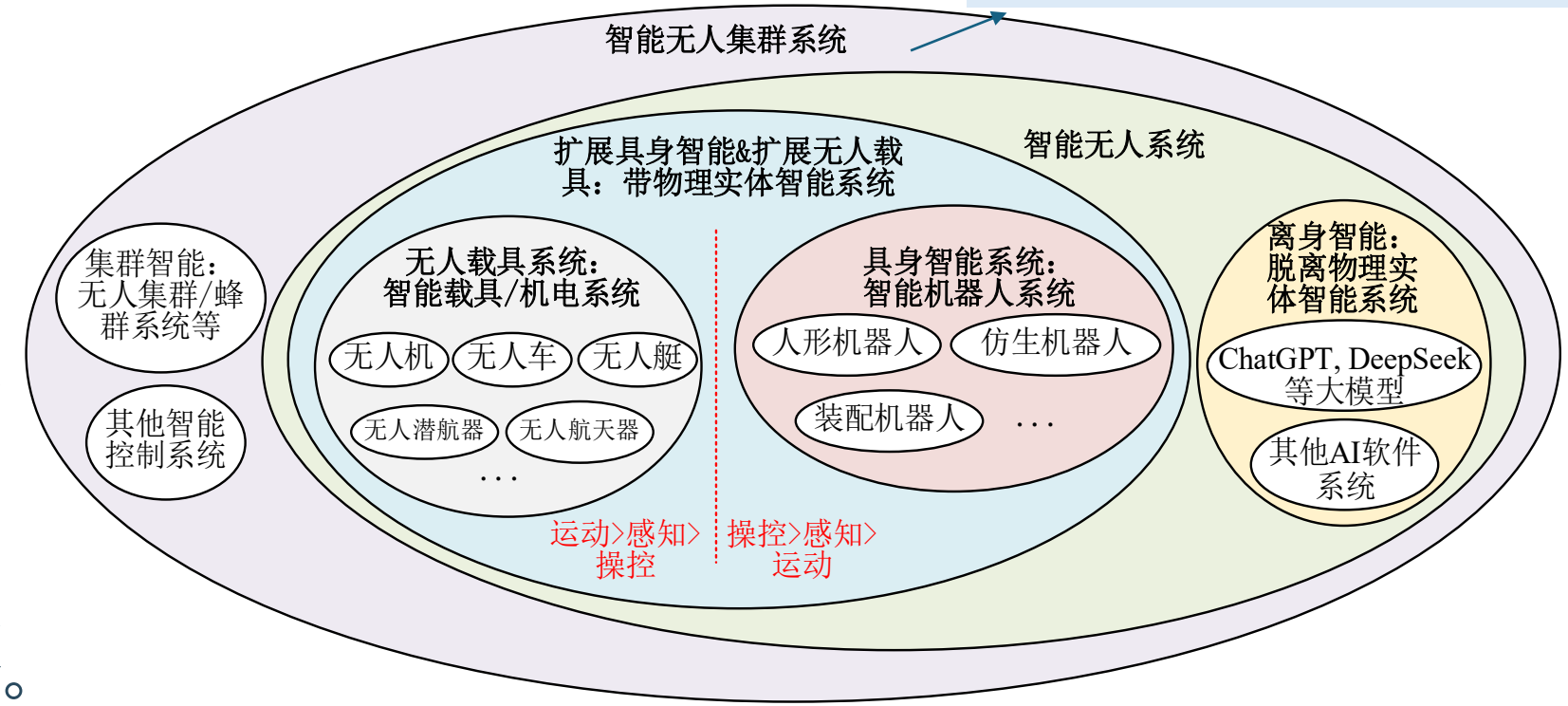


图1.1 智能无人系统概念

无人化、身体交互与群体协同相互融合，拓展机器代人作业的方式。

本章目录

第一章：概念、原理与实验实践

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

本节四个教学单元

1.1.1 智能无人系统概念

教材对应：第 1.1.1.1 节

1.1.2 智能无人系统分类方法

教材对应：第 1.1.1.2 节

1.1.3 详细分类与型号介绍

教材对应：第 1.1.1.3 节

1.1.4 无人集群系统应用

教材对应：第 1.1.1.4 节

1.1.2 智能无人系统分类方法：工作环境与载具类型

运行环境与平台构型是两条分类线索



图 1.3 无人载具按运行环境分类

- **运行环境：**回答在哪里工作。水下、陆地与空中等环境，分别约束感知、通信和运动。
- **平台构型：**回答怎样运动。固定翼依靠前飞，旋翼可悬停，飞艇利用浮力支承。
- **任务匹配：**环境和构型一起限定可达范围；再按载荷、作业方式与部署条件选择。

分类不是给机器贴标签，而是帮助我们按任务寻找合适的平台。

1.1.2 智能无人系统分类方法：工作环境（域）·常见环境

水下、水面、陆地与空中的环境约束

- **水下：**卫星定位信号难以直接使用，光学视距受水质限制；
  导航常结合惯性与声学信息，通信可采用缆线或声学链路。
- **水面：**风浪使姿态与航迹持续变化，盐雾侵蚀设备；
  船体、姿态控制与密封防腐共同决定可工作的海况。
- **陆地：**通道宽度、坡度和台阶限定可达区域；
  轮、履带或腿的接触方式影响通过性，感知支持路线选择。
- **空中：**重力要求持续支承，风扰使姿态与位置偏离目标；
  气动布局、能源与反馈控制共同支持飞行和任务载荷工作。

同一任务换个环境，感知、通信与运动的主要难题也会改变。

1.1.2 智能无人系统分类方法：工作环境（域）·特殊环境

近空间、太空与地外任务的特殊条件

- **近空间（距地面约20–100km）：**空气稀薄使气动支承和推进条件变化；
  长时间驻留还要协调昼夜能源与温度变化，浮空器和太阳能飞机路线不同。
- **太空：**轨道运行主要受引力与惯性支配，不靠机翼提供持续升力；
  真空中的散热、辐射防护和能源管理成为重要设计任务。
- **地外：**着陆后面对目标天体的重力、地形与光照；
  远距离通信有时延，巡视器需要在本地完成部分导航与避障。
- **分类交叉：**“地外”描述任务所在地，不限定运动方式。
  同一次行星探测可以包含空间飞行、着陆与地表巡视。

环境名称可交叉使用，具体介质、能源与通信条件才决定设计约束。

1.1.2 智能无人系统分类方法：载具类型（平台）

支承方式与驱动机构决定怎样运动

- **机翼与旋翼：**固定翼需要相对气流产生升力，适合持续前飞；
  旋翼主动驱动空气，可悬停，但悬停需要持续输入动力。
- **浮力支承：**飞艇利用空气浮力，船艇利用水的浮力；
  支承主要由排开介质产生，定点保持仍需抵抗风或水流。
- **轮、履带与腿：**轮式适合连续滚动，履带扩大接地面积；
  腿能选择离散落足点，但增加平衡、接触控制与机构复杂度。
- **水中推进：**推进器产生推力，舵面利用相对水流改变运动；
  潜航器还需控制深度与姿态，浮力和推进布局影响机动方式。

理解平台怎样运动，才能判断它能替人完成哪类工作。

1.1.2 智能无人系统分类方法：分类方法的应用

跨海输电巡检：先分任务，再分运行环境

任务对象	运行环境与关键条件	候选平台与限制
架空导线、塔顶	空中观察；既要覆盖线路， 也要接近局部缺陷	固定翼巡查范围大； 多旋翼适合悬停细查
海缆与水下基础	水下观察；水质与水流 影响视距、定位和作业	自主潜航器适合测线巡查； 遥控潜水器适合近距复查
岸站与地面通道	陆地移动；路面、台阶 和狭窄空间影响通行	轮式、履带或足式； 随路线和操作需求选择

教学设例：同一输电工程包含架空段、海缆段与岸站。

同一工程任务可跨越多个运行域，各段的可达性与作业要求决定候选构型。

本章目录

第一章：概念、原理与实验实践

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

本节四个教学单元

1.1.1 智能无人系统概念

教材对应：第 1.1.1.1 节

1.1.2 智能无人系统分类方法

教材对应：第 1.1.1.2 节

1.1.3 详细分类与型号介绍

教材对应：第 1.1.1.3 节

1.1.4 无人集群系统应用

教材对应：第 1.1.1.4 节

1.1.3 详细分类与型号介绍：载具类型总览

五类载具平台：典型形态与任务约束

类别	典型平台	典型任务与主要约束
无人飞行器系统	固定翼、多旋翼、垂起固定翼 直升机、飞艇、微型旋翼与扑翼	航拍、测绘与巡检 受航时与起降条件约束
无人地面系统	轮式、履带式、多足机器人 人形机器人	运输、巡检与操作 受地形与通行条件约束
无人水面载具	无人艇、无人船 机动推进或风帆推进	水面巡逻与测绘 受风浪与续航条件约束
无人水下航行器	遥控潜水器、自主水下航行器 混合平台、大型无人潜艇	水下探测与近距作业 受耐压与通信条件约束
无人空间系统	卫星、无人航天器、深空探测器 相关运载平台：可回收火箭	通信、观测与探测 受能源与通信时延约束

本小节将依次介绍各种载具特点和优势，并展示代表性的型号

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统

飞行平台、地面站与链路各负其责

- **系统与平台：**无人飞行器系统（UAS）包括无人飞行器（UAV）、地面站和数据链路；飞行器是其中承载任务设备并实际飞行的部分。
- **自驾仪与飞控：**本书用“自驾仪”描述通用控制装置；在无人机上俗称“飞控”，根据传感信息估计状态，并连续调节飞行控制量。
- **地面站与链路：**地面站规划任务、监控状态并提供接管入口；数据链传递指令、状态与载荷数据，把地面和机载部分连接起来。
- **运行分工：**地面负责规划与监督，机载系统持续控制飞行；失联后按机载能力与预设策略返航、继续任务或进入其他保护状态。

无人飞行依靠整套系统支持，飞行构型还要适应具体任务。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·空中构型对照

四类空中构型的升力与悬停方式

垂直起降固定翼包含复合翼、尾座和倾转等布局。

构型	升力来源	悬停能力	代价
常规固定翼	机翼与前飞气流	不能悬停	必须持续前飞
多旋翼	旋翼向下推空气	可原地悬停	持续功耗较高
垂直起降固定翼	按布局切换升力方式	垂直模式下悬停	过渡控制更复杂
无人直升机	主旋翼产生气动力	可悬停	传动维护较复杂

悬停和远航回应不同需求，也解释了多种飞行构型为何长期并存。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·常规固定翼无人机

长航时从何而来：动力与载荷共同影响留空



彩虹-4



翼龙-2

- **动力路线：**彩虹-4用活塞动力，翼龙-2用涡桨动力，是中国最具代表性的两款“察打一体”（侦察打击一体）无人机，重量等级、载荷与定制开发有区别。
- **留空机理：**固定翼需要持续前飞，让气流流过机翼产生升力，巡航效率支持长距离运行；燃油储备增加可用能源，任务载荷也会增加重量与阻力。
- **任务选择：**大范围测绘和持续观察看重航程与留空；固定翼本身无法悬停观察目标，但是可以在目标区域上方盘旋，并配合光电吊舱调整视角，来实现持续观测和锁定。

固定翼以巡航效率支持长航时，任务载荷与燃油分配共同影响留空时间。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·常规固定翼无人机

高空覆盖与中空多用途的任务取舍



RQ-4 全球鹰



MQ-9 死神

- **高空覆盖：** RQ-4与无侦-7重广域观察；
  高空扩大视野，传感器决定观测细节。
- **中空任务：** MQ-9采用涡桨动力；
  载荷类型与重量影响航程和任务能力。
- **比较依据：** 覆盖范围和识别精度影响选择；
  机体运送传感器，链路传回观测结果。



无侦-7(中国)

高空侦察重广域覆盖，中空多用途重任务与载荷平衡。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·多旋翼无人机

系统集成：把悬停能力变成可用工具



DJI Mavic 4 Pro



AR.Drone

- **集成功能：** AR.Drone与Mavic 4 Pro展示不同阶段的消费级平台；增稳、图传与便捷操控，使操作者能更多关注拍摄和观察任务。
- **巡检价值：** 可悬停和低速机动，便于保持观察角度、反复查看局部；图像稳定与操作便利是构型能力转化为工作效率的关键。
- **开发取舍：** 使用现成功能重视易用性与成像质量；改控制器或加传感器还取决于开放接口、供电和载荷余量，下一类平台更强调可修改。

高度集成降低使用门槛，科研改造更看重接口开放与可修改性。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·多旋翼无人机

开放软硬件：支持控制修改与协同实验



Crazyflie 2.1：护桨



Crazyflie 2.1：裸机



尺寸参照

- **可修改性：** Crazyflie 2.1开放固件与硬件资料；开发者可修改控制程序、读取状态，并通过扩展模块研究定位与多机协同。
- **重复实验：** 图中护桨、裸机与手持参照说明结构和尺度；小型平台便于在受控室内重复试验，观察改动前后的运动差异。
- **实验配置：** 新增模块同时占用重量、能源与接口资源；选择平台时，把算法要访问的量、需要的传感器和停机方式列清楚。

微型开源平台便于修改和重复试验，是研究控制与协同的入口。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·垂直起降固定翼

复合翼与尾座布局的升力转换



卓翼 ZV15E



V-BAT

- **复合翼：**ZV15E在固定翼上增加起降旋翼，起降阶段主要依靠旋翼，巡航阶段主要依靠机翼，不工作的旋翼仍带来重量和阻力。
- **尾座布局：**V-BAT起降时整机竖直，巡航时转为水平，机身、任务载荷和控制系统需要适应两种姿态及其过渡过程。
- **控制取舍：**减少倾转机构可简化相应机械结构，升力转换和载荷方向变化仍构成控制与任务保障约束。

摆脱跑道依赖、保留巡航效率，推动了多种垂直起降路线的探索。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·垂直起降固定翼

倾转旋翼的飞行机理与过渡约束



Bell Eagle Eye

- **动力传递：** Bell Eagle Eye的发动机位于机身中段，经传动轴驱动两侧旋翼，发动机本身不随短舱倾转。
- **升力转换：** 悬停时主要依靠旋翼，前倾后机翼分担升力、旋翼更多承担推进，过渡中须协调速度、姿态和短舱角度。
- **机构与气动：** 倾转和传动增加机械复杂度；悬停时旋翼向下吹的气流（下洗流）打在机翼上产生向下的力，旋翼要额外出力抵消。

倾转布局兼顾悬停与巡航，关键难点是升力分工改变的过渡过程。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·无人直升机

主旋翼支承，尾桨平衡反扭矩



AR500C

- **主旋翼：**改变桨叶安装角（桨距）调节总拉力；桨盘倾斜使拉力偏向，带动机体前后左右运动。
- **尾桨：**抵消主旋翼驱动的反扭矩，调节后改变机头方向。
- **结构取舍：**较大旋翼与传动系统支持任务，也增加收纳、检查与维护要求。

直升机用主旋翼支持悬停与前飞，尾桨与传动系统影响控制和维护。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·无人直升机

舰载运行需要协调起降、收纳与维护



MQ-8C 火力侦察兵

- **系统对象：** MQ-8C的主旋翼和尾桨提供基本飞行能力，但舰载任务还依赖甲板引导、收纳维护与海上保障。
- **甲板环境：** 风浪与舰体摇摆使甲板持续运动，接近、起降与回收受到飞行器和甲板间相对运动及环境变化的共同约束。
- **保障条件：** 旋翼折叠便于收纳，展开与维护属于再次飞行的准备环节。通信、天气、海况与保障能力限制实际任务。

舰载化难在运动甲板上的可靠起降，还要兼顾收纳与维护保障。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·飞艇与浮空器

浮力支承、驻留方式与环境约束



S4000浮空风力发电系统



HiSentinel 系列

- **浮力机理：**轻于空气平台利用囊体浮力驻留，
  与机翼或旋翼产生气动力的方式不同，空气稀薄程度会影响所需体积。
- **系留与航行：**S4000由缆绳约束位置，系留还依赖承力与地面保障；
  飞艇利用自身推进系统航行，定点驻留受抗风和能源条件限制。
- **任务取舍：**HiSentinel等高空平台面向持续覆盖，
  囊体体积、抗风、转场与地面保障需求共同限制部署。

浮力支持驻留，系留方式、体积、抗风与保障条件决定适用任务。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·高空伪卫星

白天发电，同时储备夜间能源



Zephyr（AALTO）



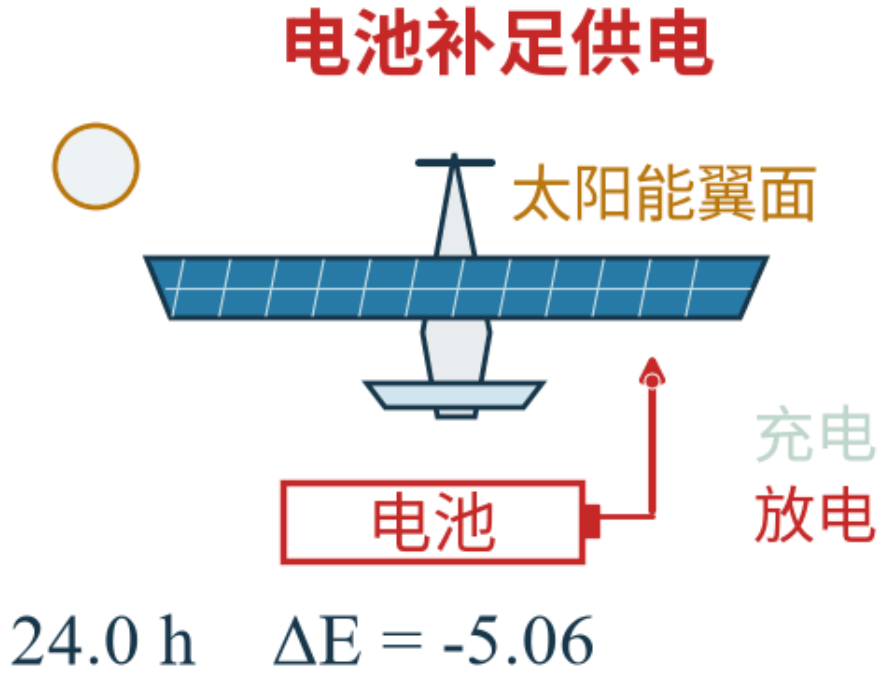
PHASA-35

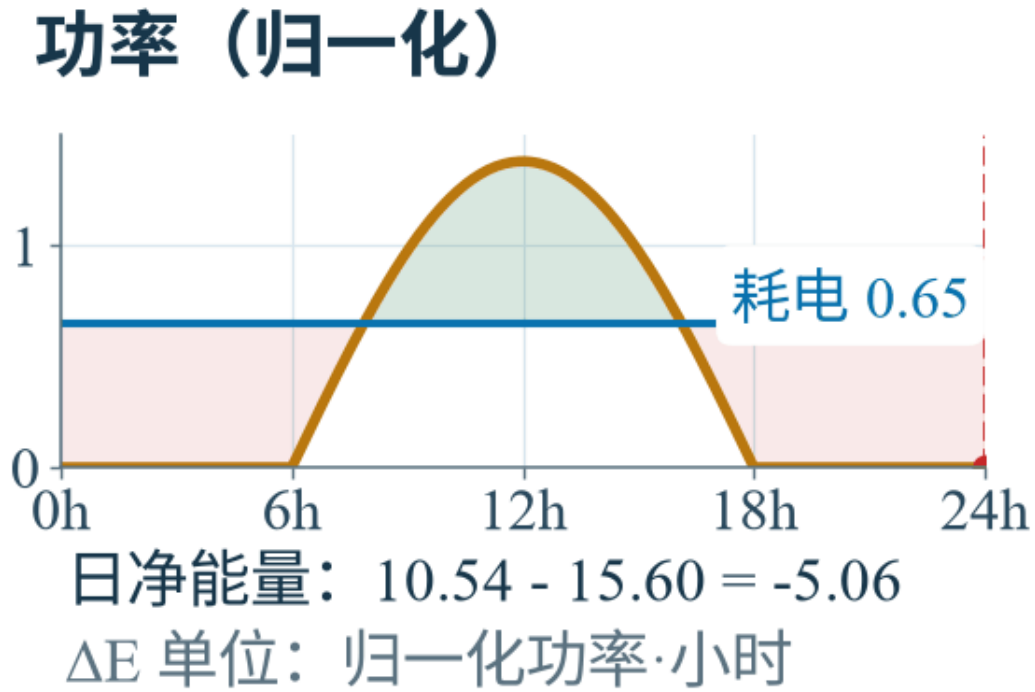
- **平台路线：**高空伪卫星是在平流层长期飞行、提供类似卫星覆盖的大气内平台；Zephyr与PHASA-35采用轻量化太阳能固定翼。
- **昼夜平衡：**白天发电同时支持飞行、载荷工作和充电；夜间改用储能，电池重量又增加飞行能耗，形成耦合取舍。
- **持续覆盖：**风场会影响定区保持所需速度与功耗，载荷也占用能源；长期任务要求一昼夜内的获取、储存与消耗能够接续。

长期覆盖首先依赖昼夜能源平衡，同时受到载荷和环境约束。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·太阳能飞行

一昼夜能源收支：何时充、何时放





图：昼夜充放电区间；本参数下日净亏电（简化模型）

持续飞行要算整日能源收支，白天能充电还不够。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·微型无人机

微型旋翼与扑翼的机理和任务取舍



黑蜂 Nano



BionicSwift 雨燕

- **微型旋翼：**黑蜂等平台采用旋翼提供升力，便于在狭小空间悬停观察，但续航、载荷余量和抗风裕度受尺度限制。
- **仿生扑翼：**BionicSwift的翼面在拍动中同时产生升力与推进力，飞行能力体现为任务工况下的续航、承载与抗风表现。
- **尺度取舍：**微型平台的能源和载荷余量有限，风扰、传感误差与制造偏差共同影响飞行控制和任务表现。

微型化便于进入狭小空间，也压缩了续航、载荷和抗风余量。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·微型无人机

无尾扑翼的动力学与控制问题



DelFly Nimble

- **控制机理：** DelFly Nimble左右翼扑动频率差产生滚转；舵机调节上反角使翼面前后移动产生俯仰，调节翼根产生偏航；翼面同时参与升力与推进。
- **尺度与试验：** 重约29g、翼展33cm、约17Hz扑动；悬停超过5分钟、载荷约4g，两项指标来自不同试验条件。
- **动力学特点：** 雷诺数是惯性力与黏性力之比；微型扑翼雷诺数低，黏性影响相对更大，翼动与机体响应强耦合。

扑翼同时参与升力、推进与姿态控制，关键难点是协调耦合运动。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人飞行器系统·四类构型选型

悬停与远航需求怎样影响构型选择

悬停、航程与起降场地的需求不同，适用构型与保障条件也不同。

构型	航时与效率	典型任务	主要限制
常规固定翼	巡航效率通常较高	侦察、测绘、监视	无法定点悬停
多旋翼	常受能源与载荷限制	近距拍摄、巡检	航时与覆盖范围受限
垂直起降固定翼	兼顾航时与场地	无跑道中远程测绘	结构与过渡控制成本
无人直升机	取决于尺寸与动力	复杂地形、舰载起降	传动与维护成本

近距作业重悬停，大范围任务重巡航效率，兼顾两者涉及结构与控制取舍。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人地面系统·平台类型

地面选型：道路、地形与操作需求

- **连续路面：**轮式靠滚动实现高效移动，适合道路运输；通行能力受到轮径、附着、坡度和转弯空间限制。
- **松软与破碎地形：**履带扩大接地面积，可降低平均接地压力；转向中的滑动、能耗和履带磨损带来新的代价。
- **离散落足：**多足机器人选择落足点、调整姿态跨越部分障碍；通过性提升依赖接触感知、平衡控制与关节驱动。
- **面向人的环境：**人形机器人兼顾双足移动与手部操作，便于使用人的通道和工具，同时增加平衡、负载与人机安全要求。

轮、履带还是腿，取决于通行效率、越障能力和操作需求的取舍。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人地面系统·轮式无人地面载具

滚动效率与地形限制决定适用场景



Tesla Cybercab



Rys Pro

- **轮式特点：**轮式平台适合道路、园区和厂区等较规整环境，速度与运动效率有优势，软土、深泥和高台阶会形成限制。
- **城市任务：**Cybercab所代表的城市出行依赖感知与决策，运行环节包括道路规则处理、异常降级和远程运营。
- **场景区别：**Rys Pro用于战场监视与支援，更关注链路、载荷和环境适应。同为轮式底盘，评价标准仍会随任务与环境改变。

轮式在规整环境中效率较高，开放道路还需应对规则与异常情况。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人地面系统·履带式无人地面载具

底盘决定可达性，上装与通信支撑任务



锐爪 1



Uran-9

- **履带机理：**较大的接地面积有利于部分泥泞、碎石地形的通过，代价包括速度、能耗和维护要求。
- **平台差别：**锐爪1与Uran-9的重量和任务上装不同，载荷配置、保障需求与实际用途也有差别。
- **系统约束：**通信质量与环境干扰影响遥控和数据回传，自主能力影响平台对实时人工介入的依赖。

底盘影响可达性，上装决定任务功能，通信与自主能力限制持续使用。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人地面系统·多足仿生机器人·电驱四足

协调落足与姿态，匹配接口与部署条件



宇树 Go2



ANYmal

- **接触与控制：**四足需协调落足、接触与身体姿态。ANYmal关节的串联弹簧可缓冲落地冲击，并参与扭矩控制。
- **开发条件：**Go2的EDU版开放底层接口；工业平台的防护配置影响现场适用范围，接口权限限定开发范围。
- **适用边界：**坡度、载荷与续航限定任务范围，雨尘防护和跌倒恢复影响持续作业；足式的越障价值取决于地形。

四足用落足选择适应复杂地形，稳定接触与身体协调决定通过能力。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人地面系统·多足仿生机器人·液压四足

重载与动态运动背后的能源和维护代价



四足机器人

- **液压与力控：**以液压四足方案为例，可由两级伺服阀调节液压缸，关节力可闭环控制，以支持重载和动态运动研究。
- **扰动恢复：**受侧向扰动或打滑时，平台通过重选落足点、调整接触和整体姿态恢复平衡，而不只是依靠更大力量。
- **系统代价：**噪声、能耗与维护负担限制日常部署。负重、爬坡和涉水能力对应特定工况，持续作业还受补能、故障恢复与维护时间约束。

液压支持重载与动态运动，日常部署难在噪声、能耗和维护负担。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人地面系统·人形机器人

适应人的环境，还要满足操作与开发要求



宇树 G1



Tesla Optimus

- **环境兼容：**楼梯、门把手、货架和工具通常按人的尺寸设计，人形便于利用这些设施，实际操作还依赖平衡、动作控制和负载能力。
- **开发条件：**宇树G1与Optimus面向不同开发和任务需求，可开发功能受具体型号、代际与接口开放范围限制。
- **任务指标：**搬运关注负载，精细操作关注动作精度；持续运行由连续工作时间、重复任务完成情况和受扰后的恢复能力共同衡量。

适应人类已有的工作环境，是人形设计的重要价值。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人地面系统·人形机器人

从动作演示走向工位持续作业









波士顿动力
电驱Atlas

Figure 01–03

- **平台路线：** Atlas与Figure系列包含不同代际，驱动方式、构型和能力随具体版本而异。
- **工位配合：** 感知识别作业对象，抓取与移动完成操作，各环节按工位节拍配合，共同影响任务的连续、重复执行。
- **运行保障：** 人机共域中的停机保护和跌倒恢复影响异常处置，补能与维护影响停机时间，这些环节共同影响工位任务的持续运行。

人形机器人走进生产线，要把一次演示变成日复一日的稳定作业。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人水面载具·推进与任务配置

推进、载荷与海况共同影响续航



JARI-USV-A



Sea Hunter

- **水面运行：**无人水面载具可承担测绘、监测、巡逻和运输辅助任务，风浪、盐雾、碰撞与回收保障都会限制任务。
- **任务配置：**JARI-USV-A虎鲸与Sea Hunter采用不同的能源和任务配置，推进与任务设备共同消耗能源，载荷重量和功耗影响持续在位时间。
- **性能取舍：**航速、续航、载荷和耐海况共同描述任务能力，快速抵达侧重航速，长期监测侧重在位时间，两者受能源储备约束。

无人艇需权衡响应速度与在位时间，载荷和海况也会影响续航。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人水面载具·风帆推进

风力推进与设备供电怎样分工



Saildrone 系列示意图

- **能源分工：**风力用于推进，
光伏支持传感、导航和通信等设备，
因此适合低功耗设备的长期海洋观测。
- **翼帆与环境：**硬翼帆通过尾翼配平片调节攻角，
特殊风暴任务需更短、更坚固的翼帆，
在推进能力与环境适应之间取舍。
- **任务记录：**Explorer曾在特定观测任务中
连续运行370天；实际在位时间受风况、
航线、载荷功耗和维护条件共同影响。

风力推进与光伏供电支持长期采样，任务时间仍受环境和载荷约束。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人水下航行器·ROV与AUV

水下选型：缆控作业与自主巡查

比较项	遥控潜水器（ROV）	自主水下航行器（AUV）
信息与控制	人员经缆线接收观测、下发操纵或作业指令	机载系统执行任务；水下通信条件限制实时干预
能源与活动	可用机载电池或缆供电；活动受缆系与收放约束	通常自带能源；活动范围受能源、导航与回收限制
典型任务	近距离观察、检查与操作；人可及时参与细节判断	沿测线测绘、巡查与采样；机载系统承担航行判断

缆线延伸人的水下操作，自主航行把更多现场判断交给机器。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人水下航行器·遥控潜水器

缆系连接控制与通信，供电按任务配置



BlueROV2



Jason

- **通信与能源：**水面人员通过缆线传递指令和视频；ROV可采用机载电池或缆供电，通信与供电属于不同配置。
- **观察级配置：**BlueROV2默认机载电池供电；标准六推可控制除俯仰外的五个自由度，八推补上俯仰，三向平移、三轴转动都可控。
- **作业级保障：**Jason通过中继隔离母船升沉影响，并结合供电与收放执行任务，持续驻底能力依赖载具、缆和母船的配合。

ROV支持远程水下作业，持续运行取决于供电、缆系和回收保障。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人水下航行器·全海深ROV

万米作业：耐压、缆系与布放回收



KAIKO ROV

- **系统结构：**KAIKO先由母船经主缆把发射器（中继平台）放到深处，再由二次缆放出载体，1995年曾下潜至10,911m。
- **深海约束：**约1.1万米处水压约为110MPa；耐压结构、缆线重量与阻力、接头可靠性及收放能力共同限制可达深度和作业条件。
- **失效教训：**2003年丢失载体的案例涉及250m二次缆，而非12,000m主缆，说明局部连接可靠性会影响整套系统。

万米作业既要耐高压，也要靠缆系与母船把设备送下去、带回来。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人水下航行器·深海AUV

无缆航行依靠机载能源与自主导航



潜龙三号



Autosub Long Range

- **自主航行：**潜龙三号和Autosub Long Range携带自身能源，按任务自主航行，活动范围不受脐带缆长度直接限制。
- **导航条件：**水下位置估计融合惯性、速度、深度或声学信息，航行中的误差积累与定位校正条件共同影响长距离导航精度。
- **任务约束：**无缆航行依靠机载能源及有限的水下通信，返航能源、失联处置和回收条件共同限制任务范围与持续时间。

无缆扩展活动范围，也把能源、定位和回收责任更多交给机载系统。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人水下航行器·混合AUV/ROV

混合水下平台：自主巡查与人工介入相结合



Sabertooth 混合AUV/ROV

- **自主段：**按任务自主航行与巡查，减少持续人工操纵。
- **介入段：**可经光纤缆或水下光通信接受人工操作，完成接近与干预。
- **驻留配置：**对接站可充电、交换数据；导航、对接和能源共同支持接续。

模式与配置：https://www.saab.com/products/sabertooth

运行模式按任务阶段切换，自主航行与实时作业可以在同一平台中组合。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人水下航行器·便携AUV

便于部署，也要权衡载荷与保障



REMUS 100

- **便携路线：**REMUS 100的小型艇体便于运输、下水和回收，支持浅水任务中的快速部署与重复出动。
- **空间约束：**较小艇径限制电池、推进器和传感器的容纳空间，能源储备与载荷能力随之受限，影响航程和任务时间。
- **模块匹配：**换装载荷可能改变重量、浮力分布和功耗，接口兼容性、定位精度及回收条件共同影响配置的适用范围。

便携平台便于快速出动，长时或重载任务则需要更多能源与空间。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人水下航行器·大型无人潜艇

更大空间增加任务容量，也提高部署要求



HSU-001

- **空间收益：**较大艇体容纳更多能源与载荷，为不同任务配置提供空间。
- **部署代价：**重量和尺寸增加运输、起吊与收放需求，保障设施必须匹配。
- **持续任务：**能源支撑运行，导航误差、通信条件和回收计划共同限制范围。

大型平台增加任务容量，模块化让同一艇体服务不同任务。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人水下航行器·超大型无人潜艇

模块化配置复用艇体，换装仍需系统适配



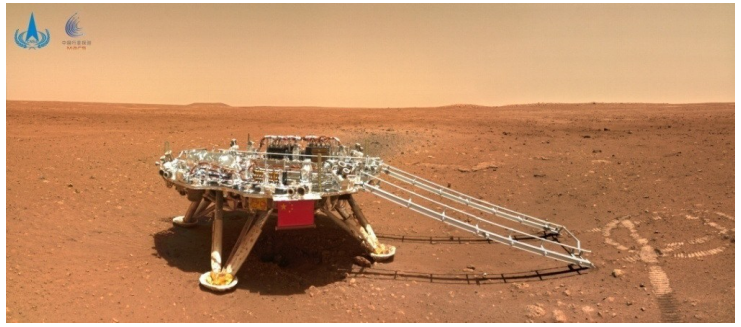
XLUUV（Orca）

- **任务模块：** Orca采用可更换任务模块的路线，
  通过复用基础平台适应不同任务，模块变化同时影响载荷与能源需求。
- **系统匹配：** 模块换装可能改变重量、重心和浮力配置，功耗与接口影响供电及控制；
  能源储备、导航校正和回收保障共同限制任务范围。
- **尺度取舍：** 便携平台便于运输和部署，大型平台容纳更多能源与载荷；
  任务覆盖范围的扩大，通常伴随更高的布放、回收和维护负担。

模块化让任务设备按需更换，也让成熟平台的研制投入得到复用。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人空间系统·空间探测与运载

空间探测与复用运载的不同评价对象



天问一号探测器



猎鹰9
Falcon 9

- **行星探测：**天问一号开展火星探测，进入、下降、着陆和巡视等环节相互依赖，各阶段的成功衔接共同支持探测任务完成。
- **运载与复用：**猎鹰9承担运载任务并实现部分部件复用，可回收部件范围、复飞次数与发射间的整备工作共同影响重复运输能力。
- **指标区别：**行星探测侧重任务链完成及探测成果，复用运载侧重有效运输、部件重复使用和整备周转。

探测重在完成多阶段任务，复用运载重在形成重复运输能力。

1.1.3 详细分类与型号介绍：无人空间系统·运载回收与复用

回收部件、回收方式与复飞整备

星舰 Starship



长征十号乙





- **回收对象：**可回收一级、上面级或其他部件，具体范围取决于系统设计。
- **回收方式：**垂直着陆、机械捕获和网系回收描述怎样回收，与回收部件是不同维度；中间下图为长征十号乙的网系回收。
- **重复运输：**回收后检查、维修并再次飞行；维护投入和整备时间影响运输成本与周转。

回收后能反复飞行并高效整备，才可能通过复用降低运输成本。

1.1.3 详细分类与型号介绍：平台选择综合应用

跨海巡检选型：让不同平台各承担合适的任务

任务段	选择依据	平台承担的工作
线路普查与细查	大范围效率与近距悬停要求不同	固定翼或垂起平台普查；多旋翼接近疑点细查
海缆巡查与复核	测线航行与实时精查要求不同	AUV巡查测线；ROV复核水下疑点
岸站与现场保障	路面、台阶、操作工具以及收放条件不同	地面平台巡检岸站；船舶或岸站提供保障

共同输出：带位置、时间与质量说明的异常记录，交给复核环节。

选对平台解决各段任务，协同配合才能完成整项工作。

本章目录

第一章：概念、原理与实验实践

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

本节四个教学单元

1.1.1 智能无人系统概念

教材对应：第 1.1.1.1 节

1.1.2 智能无人系统分类方法

教材对应：第 1.1.1.2 节

1.1.3 详细分类与型号介绍

教材对应：第 1.1.1.3 节

1.1.4 无人集群系统应用

教材对应：第 1.1.1.4 节

1.1.4 无人集群系统应用：任务分解

跨平台巡检：共同目标怎样变成分项任务

- **共同目标：**完成线路、海缆与岸站的规定覆盖，并对疑点形成复核记录；平台各自飞过或航行过，不等于整个任务已经完成。
- **能力互补：**空中平台提供视野，水下平台接近海缆，地面平台进入岸站；任务分配同时考虑可达性、传感器、能源与部署位置。
- **任务衔接：**普查给出疑点与位置，复查接收任务并返回证据；结果更新同一任务清单，减少漏查与重复作业。
- **共享状态：**成员报告进度、位置与可用资源；节点退出时，其他成员只有具备相应能力和余量才能接续。

多种机器各展所长，还要把各自成果接成一项完整工作。

1.1.4 无人集群系统应用：组织关系

编队约束运动，集群组织共同任务

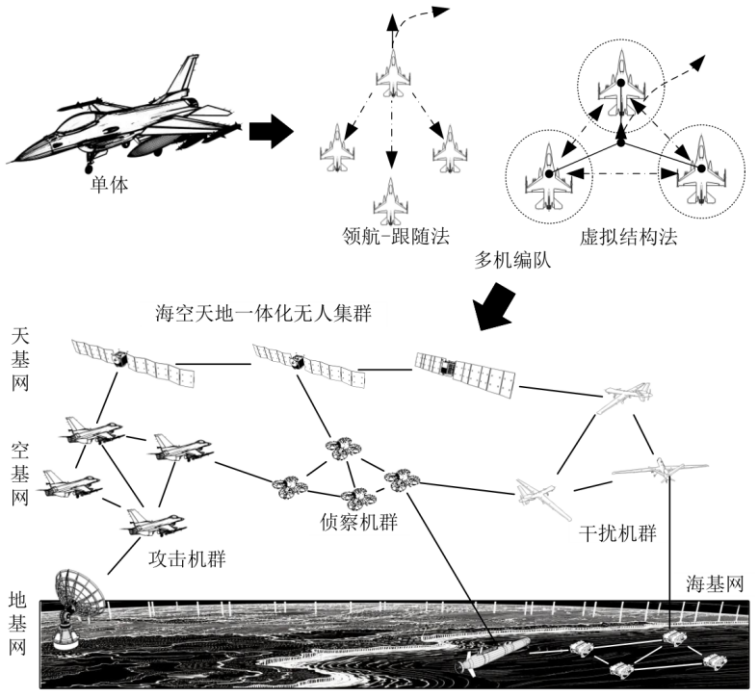


图1.4 无人系统从单体到集群

- **编队（上图）：** 重在保持队形，规模通常不超过数十个节点。
  领航跟随法让成员保持与领航者的相对位置；
  虚拟结构法让成员跟踪虚拟刚体上的点位。

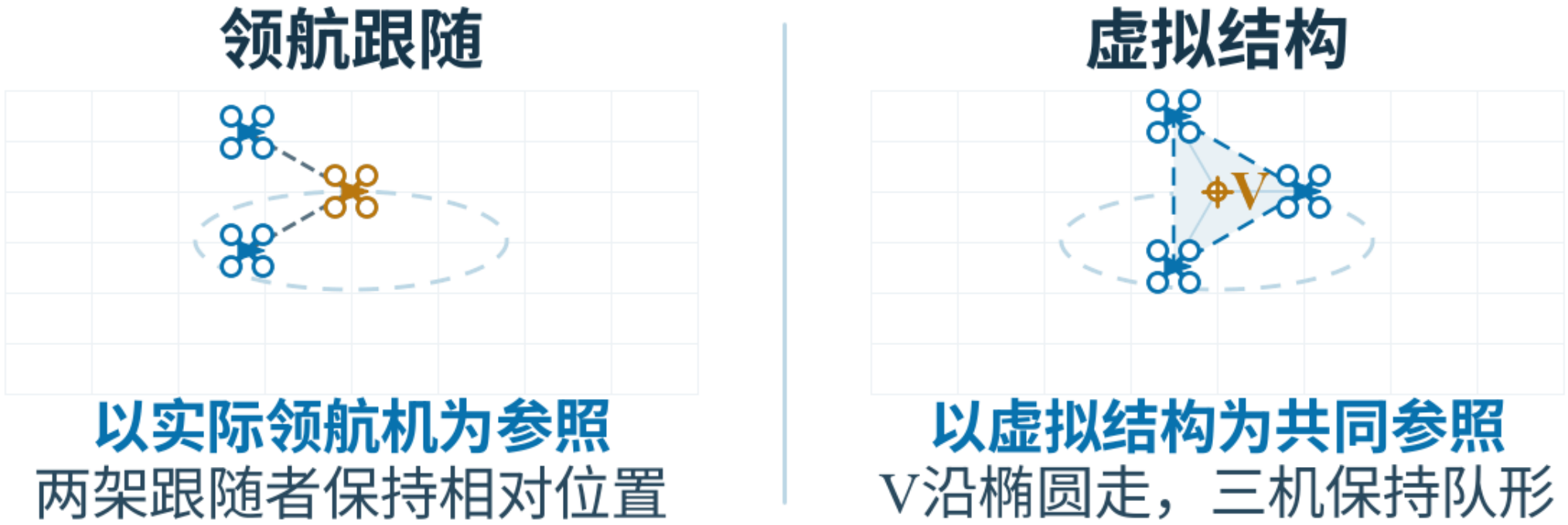
- **集群（下图）：** 海空天地平台按功能分工，完成共同任务，规模可达数百至数千个单元。

- **巡检应用：** 分区普查、共享疑点和安排复查不需要固定队形，同样需要协同。

编队强调运动配合，集群强调任务组织，数量不能代替组织关系。

1.1.4 无人集群系统应用：编队方法

领航跟随与虚拟结构：队形跟着谁走



图：领航跟随与虚拟结构的点位参照（教学简化运动学示意）

编队控制把各自运动的个体，组织成具有约定空间关系的整体。

1.1.4 无人集群系统应用：信息与决策

集中、分布式与混合组织怎样分配决策

组织方式	信息与任务决策	跨海巡检中的作用与代价
集中式	成员上报状态，中心统一分配复查任务	便于全局安排；中心与上报链路成为重要依赖
分布式	节点依据本地及共享信息协商或调整分工	能局部响应；信息不完整时需处理重复与分配冲突
混合式	中心给区域和优先级，局部节点协调执行	兼顾整体安排与局部响应；需要明确权限和交接规则

组织方式决定谁掌握信息、谁分配任务；每个平台仍需执行本地控制。

1.1.4 无人集群系统应用：信息与任务流程

疑点发现、任务派发与复查结果形成闭环

- **发现并标记：**普查节点提交疑点记录，包含位置、时间、观测证据与质量说明；位置统一，复查平台才能找到同一对象。
- **分配并确认：**调度中心或协同节点根据能力、距离与余量选择执行者；执行者确认接收，避免同一疑点无人处理或重复派发。
- **复查并回传：**执行者接近目标获取更细证据，报告完成、失败或待续；不同疑点可并行处理，同一疑点须先定位再复查。
- **更新后续任务：**结果写回共同清单；新证据决定关闭、再次检查或转人工，使下一步分工依据最新任务状态，而不只是最新位置。

协同把一台机器的发现，变成另一台机器能够接续的工作。

1.1.4 无人集群系统应用：接口与重构

开放接口让任务能被不同平台接续

- **共享信息语义：**不同成员用一致的坐标、时间、对象编号与任务状态；只有字段名称相同，却使用不同单位或参考系，仍会误解任务。
- **描述可用能力：**节点报告传感器、可达范围、剩余能源及运行状态；任务分配根据能力匹配，不能把任意节点当作可相互替换。
- **接续任务状态：**退出节点释放未完成任务，接替者继承位置、已有证据与完成进度；重新分配减少中断后的重复扫描和遗漏。
- **模块化组织：**开放接口把不同功能组合起来；马赛克战等军事组织概念也强调模块化与网络重构，实际能力仍依赖接口和资源。

任务状态能够交接，集群才有条件在成员更替中继续工作。

1.1.4 无人集群系统应用：异常与接续

通信或节点失效后，任务怎样继续

- **信息延迟：**观测与状态过期后，按时间标记降低其可信度；
暂停依赖实时信息的协同，保留本地避障与预设保护动作。
- **节点退出：**清单将未完成工作重新置为待分配；
具备载荷、可达性和能源余量的成员再接续，而非平均摊派。
- **能源不足：**提前回收或返航并释放后续任务；
补能和接替计划要留有余量，避免节点到极限才中断。
- **资源不够：**缩小覆盖范围、降低任务频次或转人工处理，并记录未完成项；
仿真与实测用延迟、退出和能源变化检查这些处置是否有效。

集群的可靠性，也体现在成员退出后能否重新组织剩余资源。

1.1.4 无人集群系统应用：军事应用

平台角色变化与任务组织

> 俄乌冲突中的小型无人机体现多种角色；角色多样不等于已形成集群。

作战环节	无人机承担的工作	对作战方式的影响
战场侦察	分区观察兵力与装备	减少侦察平台抵近
目标引导	锁定目标，校正射击	侦察打击分工
火力打击	直接执行打击	侦察打击角色切换

小型平台跨越侦察、引导与打击环节，推动任务角色和分工方式变化。

1.1.4 无人集群系统应用：民用应用·低空空域管理

无人机交通管理(UTM)的职责与边界

- **管理对象：**UTM即无人机交通管理，关注飞行意图、空域资源和运行冲突的协调，不直接替代单架无人机的飞行控制。
- **计划与空域：**航线、时段和任务性质构成飞行意图信息；可用空域变化影响运行安排，运行权限受适用管理制度约束。
- **冲突协调：**根据航线与飞行意图识别潜在运行冲突，对可能的越界或冲突提供预警，为运行调整和人为介入提供依据。
- **单机执行：**机载感知识别局部障碍，飞行控制落实运动指令；运行管理负责空域协调，人员在必要时介入，三者共同支持运行。

无人机规模化运行，既要单机飞得稳，也要共享空域管得好。

1.1.4 无人集群系统应用：应用与挑战

集群走向实用还要突破的四项关键技术

- **通信自组网：**节点移动使网络连接不断变化，网络要能自动重组，并在链路时断时续时仍把状态与任务消息低延迟送达。
- **协同控制算法：**分布式节点主要依据局部信息，算法要让局部决策既能随现场变化调整，又始终服务于整体任务目标。
- **虚实结合仿真训练：**高逼真仿真复现通信中断、节点退出和复杂环境，反复训练与测试策略，再迁移到真机检验。
- **博弈与对抗：**存在干扰、欺骗或对手时，集群要预判对方行为、保护自身节点，在对抗条件下仍完成任务。

集群能否走向实用，关键在于成员和链路变化时能否继续协作。

课堂练习：完整任务分析

跨海巡检练习：分类、选型与协同证据

- **已知任务：**巡查架空线路、海缆与岸站，发现疑点后需要更细的观测；船舶和岸站可提供保障，环境与续航按实际条件限制。
- **分类与选型：**分别确定运行环境、接近对象的方式和候选构型；说明为何普查与复查可能需要不同平台，不必指定型号。
- **自主与协同：**说明哪些决策由人作出、哪些由机载系统完成；写出普查结果怎样触发复查，以及双方需要共享什么信息。
- **异常与评价：**假设一台复查设备退出，说明任务如何接续；用覆盖、复核质量、时间和资源比较原方案与调整后的方案。

有实体不等于会决策，多机同飞不等于分布式，无人在场不等于自主。

练习参考：分类与能力判断

先选平台，再判断自主与交互能力

- **平台选择：**空中平台观察架空设施，水下平台接近海缆，地面平台巡查岸站；各段再按覆盖效率、悬停、通行和实时操作要求选择构型。
- **人的参与：**人可以设定区域、审阅疑点和远程接管；机载系统可在限定条件下完成稳定、导航与局部避障。
- **交互判断：**仅分析已拍照片的是信息处理环节；自主接近疑点并根据新观察调整行动的整体系统，体现持续的身体与环境交互。
- **能力边界：**ROV有缆并不排除自动定深；无人机有机械臂也不保证自主；判断依据是当前任务中感知、决策、动作与反馈的实际分工。

人的参与方式和实体交互方式是独立判据，同一系统可以兼具多项特征。

练习参考：组织与评价

用任务衔接与实际结果评价协同

- **协同证据：**普查结果触发复查分配，执行状态与复核证据返回共同清单；信息改变后续行动，才形成可观察的任务衔接。
- **效果指标：**在相同区域与质量要求下，比较覆盖完整度、疑点复核质量、完成时间和能源人力投入；增加节点可能同时增加组织成本。
- **异常接续：**退出节点留下未完成项，余下成员按能力和资源重新分工；记录新增耗时、未完成范围与人工介入，评价持续运行能力。
- **方法迁移：**海洋观测、仓储物流等也可按任务、能力、信息、分工和结果分析；任务不同，具体指标与失效后果随之改变。

自主看能独立做什么，协同看怎样共同完成，任务决定能力的价值。

课堂讨论

条件变化后，平台与组织方案怎样调整

讨论依据：改变一个任务条件，说明选型、分工与评价为什么随之改变。

1 地面变化｜道路变成碎石台阶

轮、履带与足式怎样重新选择？
增加的驱动与控制代价是什么？

2 任务变化｜普查改为精细复核

空中与水下各选什么构型？
观察距离和人工参与如何变化？

3 资源变化｜两百节点失联三成

哪些能力仍在，哪些任务要缩减？
根据连通、载荷与余量给出判断。

4 对象变化｜运输载荷改成乘员

哪些保护、舒适和保障要求增加？
载客与无人驾驶分别描述什么？

人对机器代劳的期待，推动无人系统持续演进。