本章目录

本节沿三条路线理解能力演进

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 4 个教学单元

1.2.1 机器人发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.1 节

1.2.2 无人机发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.2 节

1.2.3 无人集群系统发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.3 节

1.2.4 汇合与辨析

教材对应：第 1.1.2 节导言

1.2 发展历程与趋势

1.2.1 机器人发展趋势简介：文化想象

机器人名称与替人劳动的早期想象

注：虽然目前机器人仍难以很好地完成家务等通用工作，但持续的探索产生了大量科技成果，这是科研之美。

机构回应任务需求，反馈改善控制，环境适应扩展任务范围。



《R.U.R.》剧照，1922 年纽约

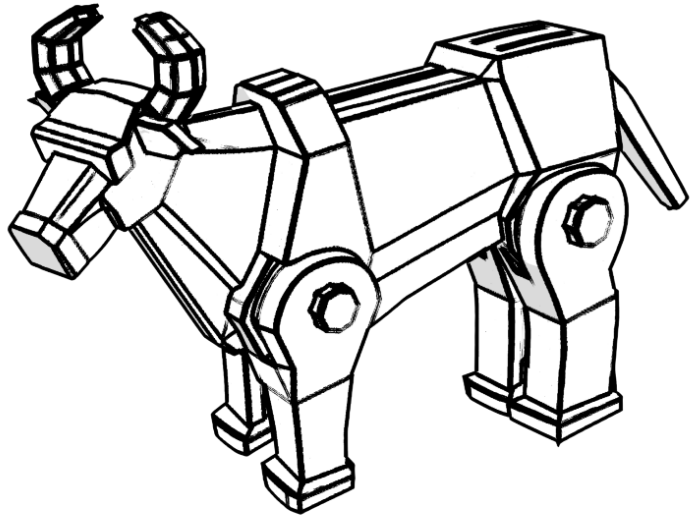
- **词源：** Robot 一词出自捷克作家恰佩克的剧本《罗梭的万能机器人》（R.U.R.），1921 年首演；该词源于捷克语 Robota，含劳作、苦役之意。
- **现实需求：** 重复、繁重与危险劳动促使人们寻找机械替代方案。运输、搬运和操作任务分别提出不同的机构与动力要求。
- **广义定义：** 为人服务的自动化机械，通常能自主执行任务，不必像剧中那样具有人形和自我意识。

机器替人劳动的愿望，推动了不同任务中的机构与控制探索。

1.2.1 机器人发展趋势简介：运输愿望

木牛流马：运输需求与机构设想

注：木牛流马的具体制造和控制方法已无从考证，但它的流传反映了中国古人对于借助机械减轻人工劳动的愿望。



(a) 木牛流马

图1.5(a) 木牛流马复原示意

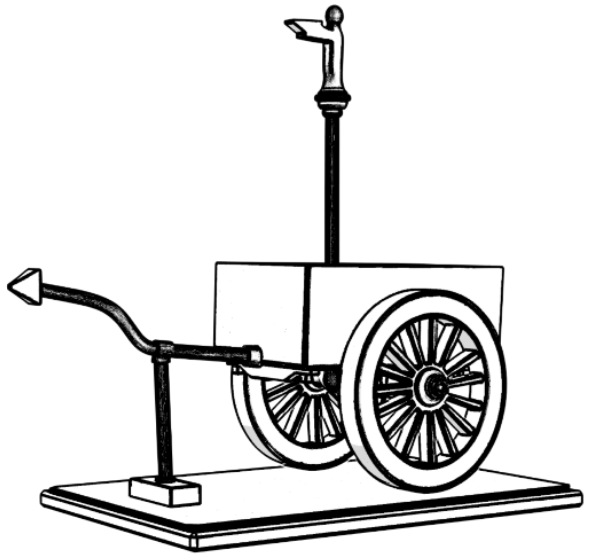
- **史料线索：**《三国志》记载诸葛亮“损益连弩，木牛流马，皆出其意”；建兴九年、十二年先后用于北伐运粮。
- **工程问题：**动力输入、载荷支承、传力方式和连续前进必须配合；道路、坡度、粮重与操作者数量影响可行性。
- **复原与延续：**图为后世复原示意，具体机构仍需论证；今天的负载机器狗延续了借助机械减轻运输劳动的愿望。

从木牛流马到负载机器狗，借助机械减轻运输劳动的愿望不断走向现实

1.2.1 机器人发展趋势简介：自动指向

指南车：机械约束怎样保持指向

注：人工智能（AI）让每个人更有机会将设想变为现实（技术平权），这既是机会，也是挑战！



(b) 司南车

图1.5(b) 指南车复原

- **历史语境：**西晋《古今注》记载指南车（司南车），传说黄帝或周公所创，三国魏国马钧改良。（具体构造仍待考证。）
- **常见复原：**车身转弯时左右轮路程不同，差动齿轮将轮差传给车顶木人，使其尽量保持初始指向。
- **自动化特点：**指向任务由固定传动关系实现，不依赖磁极；人的预先设定和机构运动共同决定输出。
- **误差来源：**初始摆位、轮子打滑和传动误差都可能使指向偏离，装置本身不能测出并纠正这些偏差。

木牛流马和指南车体现了古人的自动机械构想，是无人系统的早期萌芽

1.2 发展历程与趋势

1.2.1 机器人发展趋势简介：反馈控制

测量、比较与连续修正

注：反馈是诺伯特·维纳于1948年提出的控制论（Cybernetics）的核心理论，奠定现代自动化与控制工程的基础。



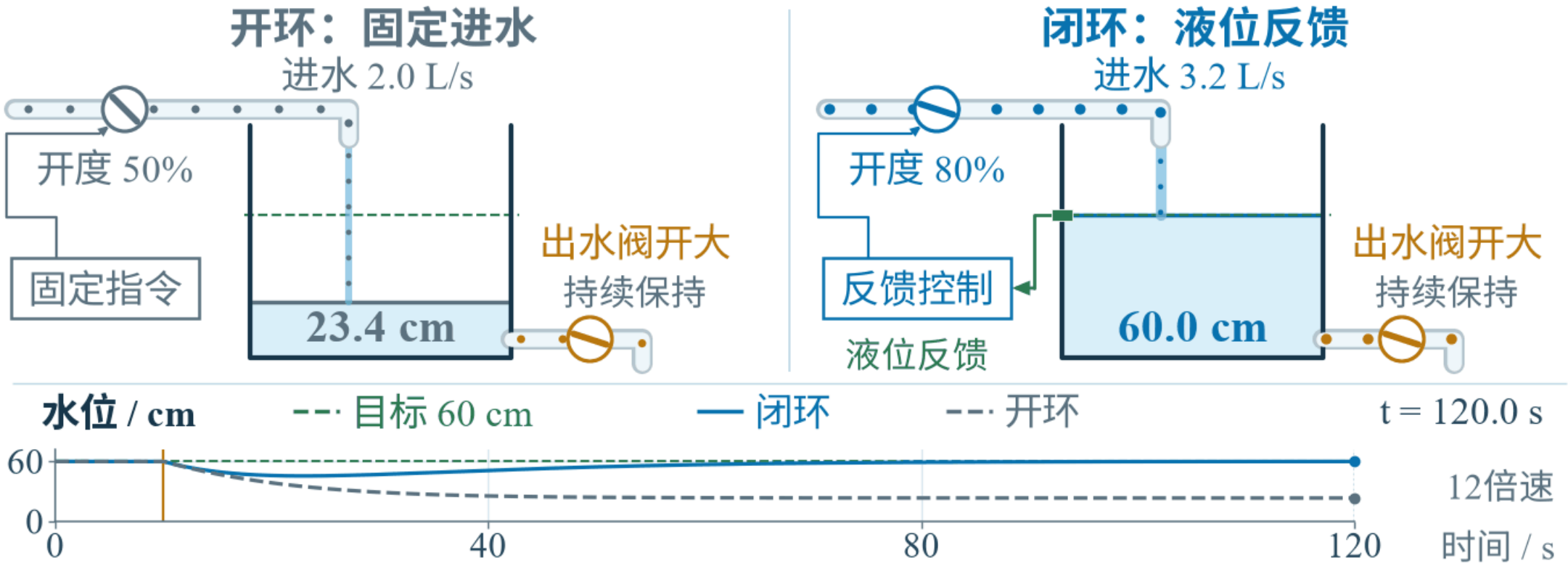
- **测量与比较：**编码器（测转角的传感器）持续测量实际位置，与目标相减得到误差，如目标 90°、实测 80°，误差为 10°。
- **控制与执行：**控制器按误差计算驱动指令，误差越大修正越强；电机力矩使关节转向目标，受扰偏离后，新测量会再次触发修正。
- **能力边界：**响应速度、测量误差和执行器限制都会影响跟踪效果；形成反馈闭环不等于能够自主选择任务。

注：Claude Code、Codex、Qoder等AI智能体可按目标分解任务、执行、验证（观测）并迭代（反馈），可类比任务级反馈控制。

反馈是自动控制的根基，可类比AI智能体的循环工程(Loop Engineering)

1.2.1 机器人发展趋势简介：反馈控制

用水增多，反馈怎样让水位恢复



图：相同出水阀变化下，固定进水与液位反馈控制的对照

1.2 发展历程与趋势

1.2.1 机器人发展趋势简介：工业机器人

执行、测量与控制怎样结合



六自由度工业机械臂在产线上作业

注：自1956年第一家机器人公司成立以来，工业机器人经历了长足的发展，其核心趋势体现在执行、测量与控制的深度结合上，用集成与维护投入换取了极高的精度和效率。

- **执行机构：**多关节机械臂通过伺服电机产生运动，关节配合使末端工具到达作业位置并完成操作。
- **测量与控制：**编码器反馈关节状态，控制器据此调整驱动指令；测量误差与驱动响应共同影响动作跟踪精度。
- **作业约束：**负载、速度与机构刚度影响精度和重复性；限位、异常检测与安全处置限定运行范围。

工业机器人常以专门配置服务重复作业，用集成与维护投入换取精度和效率。

1.2.1 机器人发展趋势简介：平台演进

四足与人形平台的动态平衡

注：2004年，波士顿动力（Boston Dynamics）推出了首款四足仿生机器人，让人们看到了机器人在运动能力上媲美真实生物的希望。



四足机器人



四足机器人



Atlas 液压版

- **四足负载：**面向负重与户外行走，通过足端接触与关节运动支承载荷，身体姿态随地形与受力变化而调整。
- **人形动作：**液压 Atlas 协调多关节运动，在迈步、腾空和落地时调整身体状态，衔接不同支撑阶段。
- **动态平衡：**在运动中不断测量姿态，调整落足与关节力矩，而非静止站稳；负载、能源与地形限制持续作业能力。

足式平台通过测量与多关节协调适应地形，持续作业还受负载和能源约束

1.2.1 机器人发展趋势简介：具身智能

从动态平衡到具身智能

2005 年前后
波士顿动力推出大狗，
随后有猎豹、Atlas

➡

2021 年
特斯拉公布擎天柱
（Optimus）项目

➡

近年
宇树、智元、天工等
国内品牌推动产业化

- **长期瓶颈：**让机器人稳定行走、跳跃和搬运载荷，难点集中在底层的感知与控制。
- **动态控制：**波士顿动力的机器人在平衡控制、动态跳跃和复杂翻转上取得突破；擎天柱与国内品牌继续推进人形机器人的运动控制与精细抓取。
- **具身智能：**身体与环境实时交互形成的智能（定义见 1.1）；自主控制逐步成熟、大模型快速演进，使其成为研究前沿与产业热点。
- **应用前景：**在特定任务中可接近甚至超过人类，有望用于高风险、复杂场景。

运动控制突破与大模型演进相结合，推动机器人向具身智能发展

本章目录

本节沿三条路线理解能力演进

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 4 个教学单元

1.2.1 机器人发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.1 节

1.2.2 无人机发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.2 节

1.2.3 无人集群系统发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.3 节

1.2.4 汇合与辨析

教材对应：第 1.1.2 节导言

1.2.2 无人机发展趋势简介：能力演进

需求推动能力扩展，平台路线长期并存



图：任务路线并行；底部阶梯为技术积累，非任务等级

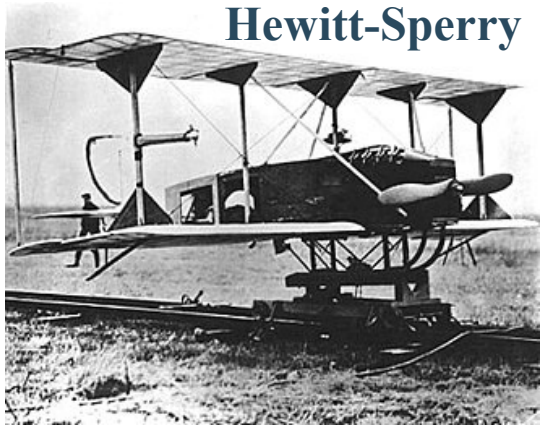
- **远程执行：**预设控制解决既定航向与航程，靶机为训练和试验提供可重复目标。
- **任务分支：**持续覆盖推动高空长航时；现场部署推动小型化，两条路线并行。
- **使用扩展：**易用性与成本改善带动民用作业；环境感知与方案更新支持任务自主。

1.2.2 无人机发展趋势简介：预设飞行

一战时期的两条预设飞行路线

- **海军项目：** Hewitt-Sperry 自动飞机属于美国海军路线，1917 年立项，1918 年 3 月 6 日完成无驾驶员稳定飞行试验。
- **陆军项目：** Kettering Bug 属于美国陆军航空服务队，1918 年 10 月 2 日首次飞行测试，停战前未参加实战。
- **共同思路：** 两者都是“航空炸弹”（Aerial Torpedo），携带炸药按预设航向与航程飞行，由机上装置执行。
- **发展边界：** 航程按发动机转数等预设量估算，途中测不到风的影响也无法修正，落点精度和可靠性有限。

Hewitt-Sperry



Kettering Bug



早期无人飞行以预设控制执行任务，控制精度与可靠性限制了实用化

1.2.2 无人机发展趋势简介：侦察起点

从靶标训练到侦察信息获取



BQM-34F Firebee II
靶机（1968年）



AQM-34“闪电虫”侦察改型（1962年）

- **靶标训练：** 20 世纪 50 年代推出的火蜂（Firebee）为打靶和武器系统鉴定提供空中目标，关注稳定飞行与可重复性。
- **侦察扩展：** 20 世纪 60 年代发展出侦察改型“闪电虫”（Lightning Bug），搭载照相设备进入任务区域获取情报并带回。
- **系统变化：** 任务变化带动载荷、能源、回收和数据链配置调整；信息可随载体回收，也可通过通信传回。

从靶机到侦察改型，任务由提供空中目标扩展为获取和带回可用信息

1.2.2 无人机发展趋势简介：侦察改型

AQM-34L：侦察、回收与重复使用



AQM-34L Firebee（1969年）

- **母机投放：**DC-130 将侦察机送入任务空域，释放后执行相应侦察航线。
- **任务载荷：**航线与拍摄时机影响侦察覆盖，影像质量决定目标信息能否被有效判读。
- **空中回收：**直升机捕获降落伞，回收机体和任务信息，为检查与再次使用创造条件。

无人侦察的价值不只在飞到目标上空，还在信息能否及时送达。

1.2.2 无人机发展趋势简介：持续监视

持续覆盖路线：高空、长航时与信息链



RQ-4 全球鹰高空长航时无人侦察机

- **高空长航时：** 1998 年 2 月首飞；飞得高则视野广，航时长则驻留久。
- **平台能力：** RQ-4B 升限约18.3千米，航时超过34小时，支持广域监视。
- **任务载荷：** 雷达、光电与红外等；具体配置随批次（Block）变化。
- **持续监视：** 数据链传回信息，地面处理与运行保障支撑连续任务。

全球鹰把高空长航时与任务载荷结合，持续监视依赖可靠的信息获取与传输

1.2.2 无人机发展趋势简介：小型化路线

现场部署路线：Scout与小型化取舍

- **历史节点：**侦察兵（Scout）由以色列航空工业（IAI）研制，1979 年进入以色列空军服役，代表小型现场侦察平台的发展路线。
- **发展动因：**1973 年赎罪日战争后，以色列发展猛犬（Mastiff，塔迪兰公司）和侦察兵等小型无人机，在 1982 年黎巴嫩战争中显示出战略价值。
- **现场部署：**平台将传感器带到任务现场，地面站承担监控与信息处理；起降场地、运输准备和通信条件共同影响部署效率。
- **能力取舍：**较小机体有利于运输与部署，但承载设备和能源的空间受限；大型长航时平台更侧重持续覆盖，同时需要相应的起降与保障条件。

小型平台侧重现场部署，长航时平台侧重持续覆盖，载荷与保障决定适用任务

1.2.2 无人机发展趋势简介：信息链路

侦察平台在信息链路中的职责



IAI Scout 侦察兵无人机（前景）
2008 年展陈照片

- **感知获取：**机载载荷从任务现场获取图像等信息，平台位置、观察范围与传感条件影响信息质量。
- **传输与判断：**数据链将信息送回地面，人员或系统进行分析判断；通信质量和信息时效直接影响可用性。
- **任务执行：**后续行动还依赖决策与执行条件。任一环节中断，获得图像也未必转化为有效任务结果。

侦察平台把“眼睛”送到远处，信息及时传回并用于决策，感知优势才有任务价值

1.2.2 无人机发展趋势简介：国内进展

中国无人机的两条并行研制路线



翼龙-2（2017年）



彩虹-4（2011年）



彩虹-5（2015年）

- **两条路线：**翼龙系列由航空工业集团成都所研制，首型 2007 年首飞，是我国首款察打一体无人机；彩虹系列由航天科技集团十一院研制。
- **察打一体：**同一架无人机先用光电载荷发现并跟踪目标，再用机载武器打击，缩短从发现到行动的时间；这类长航时无人机还承担远程监视与电子战。

1.2.2 无人机发展趋势简介：低空应用

消费级无人机：成本与易用性的变化



Parrot AR.Drone 消费级无人机

- **产品整合：**2010 年前后，消费级产品把自稳（即增稳，自动保持姿态）、图传（画面实时传到手机）与手机操控整合。
- **应用扩展：**成本与学习门槛下降，使航拍、环境监测和科研更易开展；任务载荷决定能够获取的信息。
- **运行条件：**续航、载荷与可靠性限定作业范围；设备易用性的提高并未消除空域与安全约束。

自稳、图传与移动操控的整合降低使用门槛，推动无人机走向大众应用

1.2.2 无人机发展趋势简介：低空应用

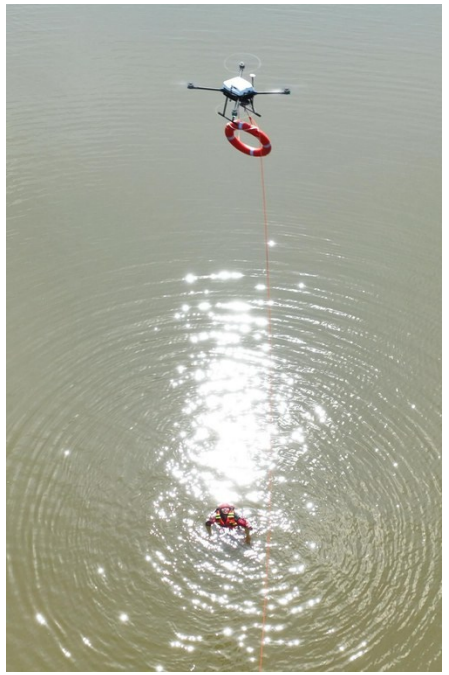
行业无人机：任务驱动载荷与系统配置



植保：喷量与航迹配合



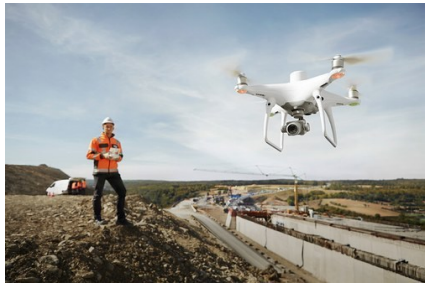
物流：载荷影响航时







巡检：成像受距离影响



测绘：影像结合定位

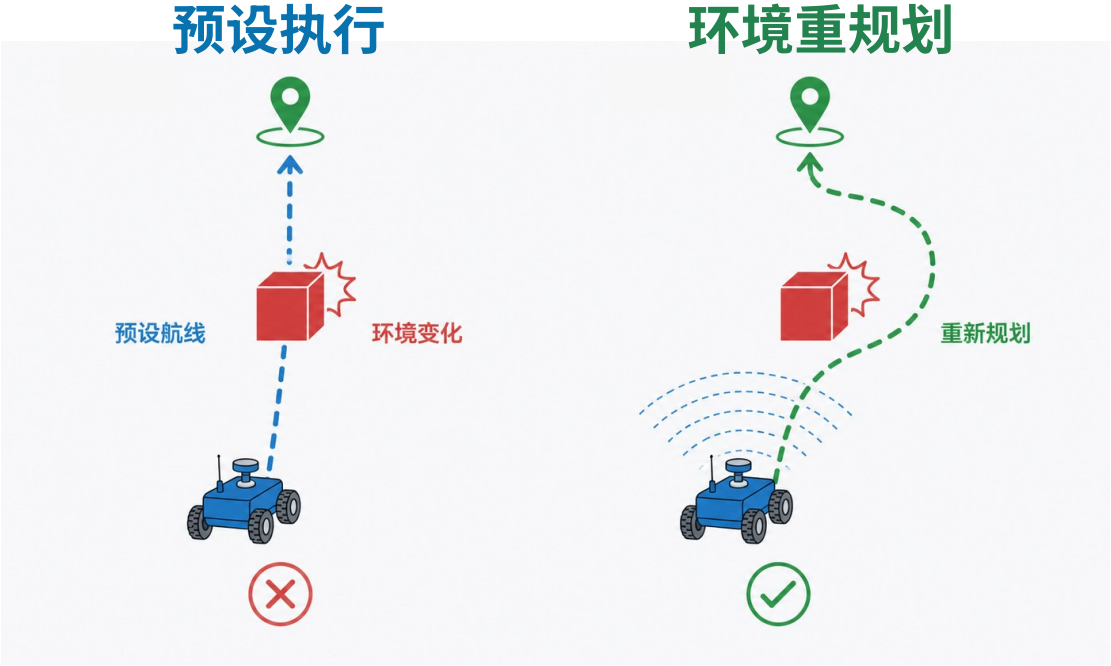
救援：定位引导投送

消防：地面保障空中作业

行业作业能力由飞行平台、任务载荷与地面保障共同形成

1.2.2 无人机发展趋势简介：任务扩展

预设航线与自主重规划的任务差别



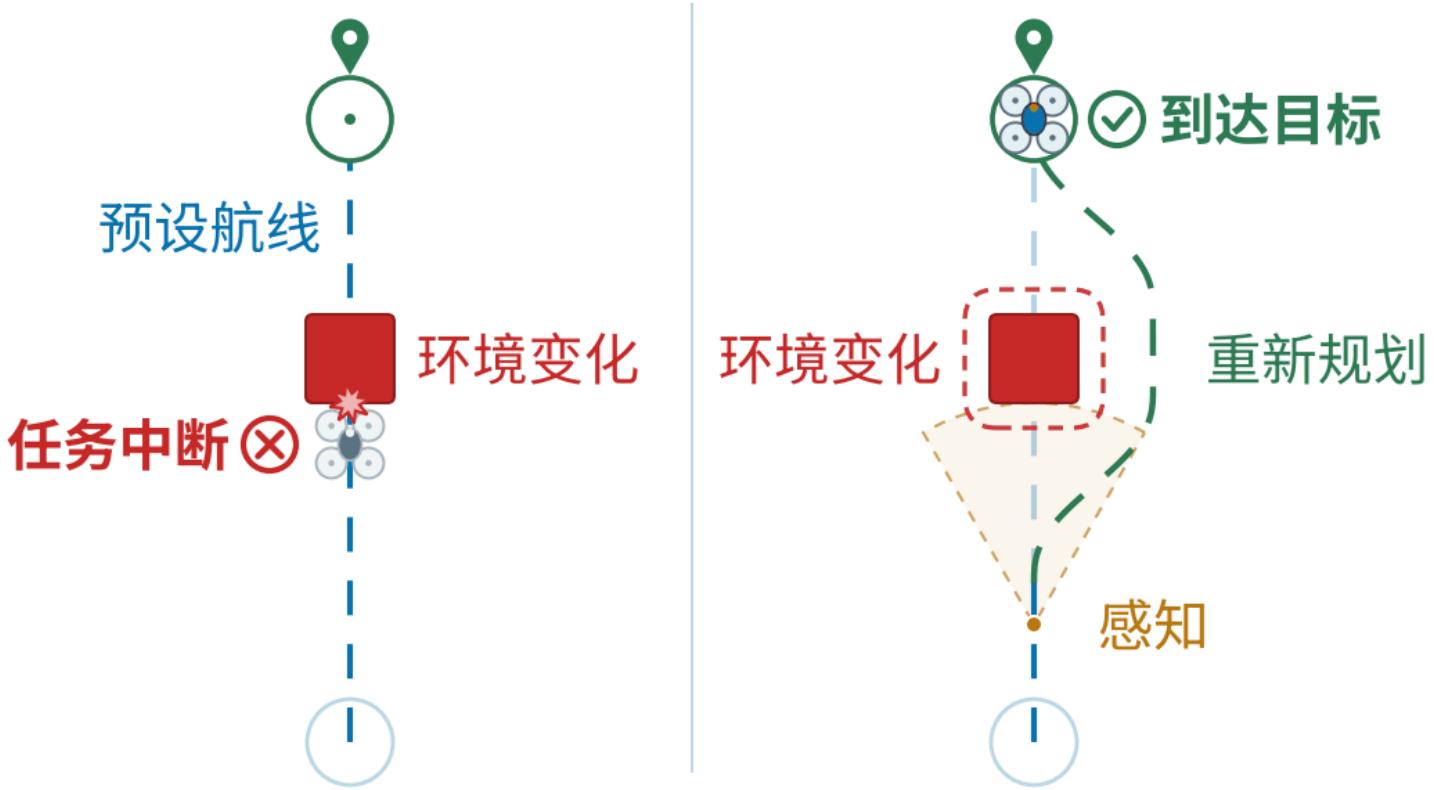
图：预设执行与环境重规划

- **预设执行：** 系统沿既定路线运动，若未配置新的障碍处置机制，环境变化可能使任务中断。
- **环境重规划：** 系统获取障碍信息后重新选择路径，并在运动约束和安全条件内继续接近任务目标。
- **自主范围：** 感知、方案更新和执行中的人工参与决定自主程度；超出处理能力时停止或交由人接管。

环境感知与方案更新使系统适应变化，异常处置保障任务在授权范围内执行

1.2.2 无人机发展趋势简介：任务扩展

环境变化后：预设执行与重新规划



图：同一航线遇新障碍时的两种任务结果（原理示意）

本章目录

本节沿三条路线理解能力演进

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 4 个教学单元

1.2.1 机器人发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.1 节

1.2.2 无人机发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.2 节

1.2.3 无人集群系统发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.3 节

1.2.4 汇合与辨析

教材对应：第 1.1.2 节导言

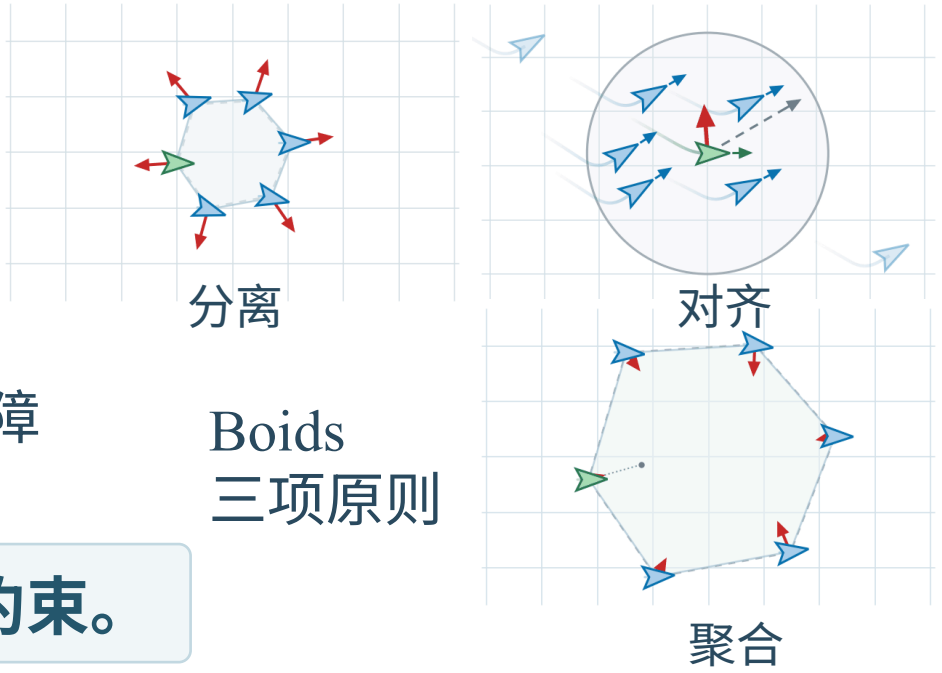


1.2.3 无人集群系统发展趋势简介：协同行为

Boids 模型：局部规则与群体运动

- **模型起点：**Reynolds于1987年提出Boids（类鸟群）模型，通过邻近个体的局部交互模拟有组织的群体运动。
- **分离：**避免与距离过近的同伴相撞，根据邻域关系调整运动，重点是局部碰撞回避。
- **对齐：**匹配邻近同伴的速度矢量，既包括运动方向，也包括速率，不能只理解成朝向一致。
- **聚合：**趋近邻近同伴的群体位置，使个体保持联系；行为依赖局部邻域，不要求每个个体掌握全局。
- **工程边界：**规模化协同还需状态估计、任务分配与故障接续，并受通信、动力学和避碰约束。

局部规则可形成群体运动，真实集群还需工程约束。

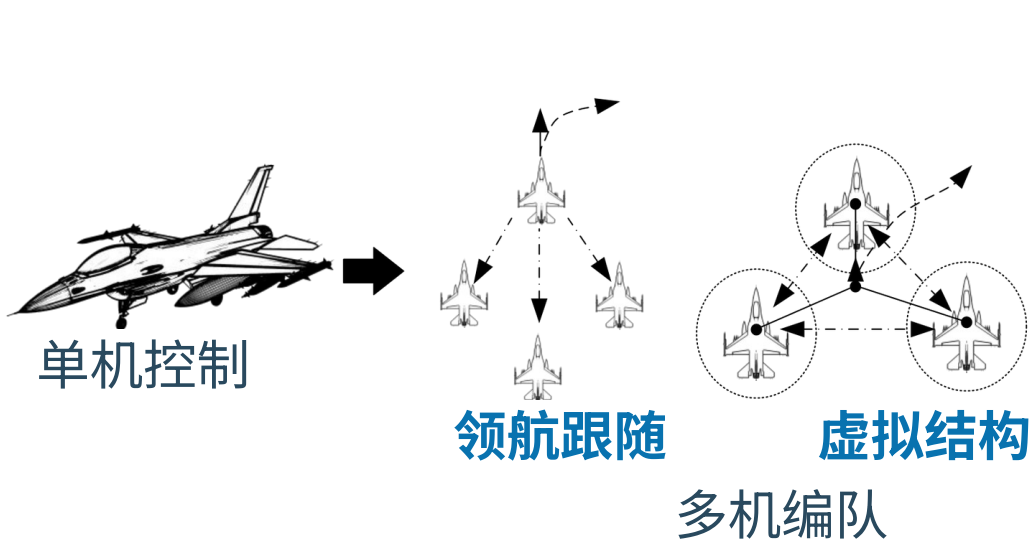


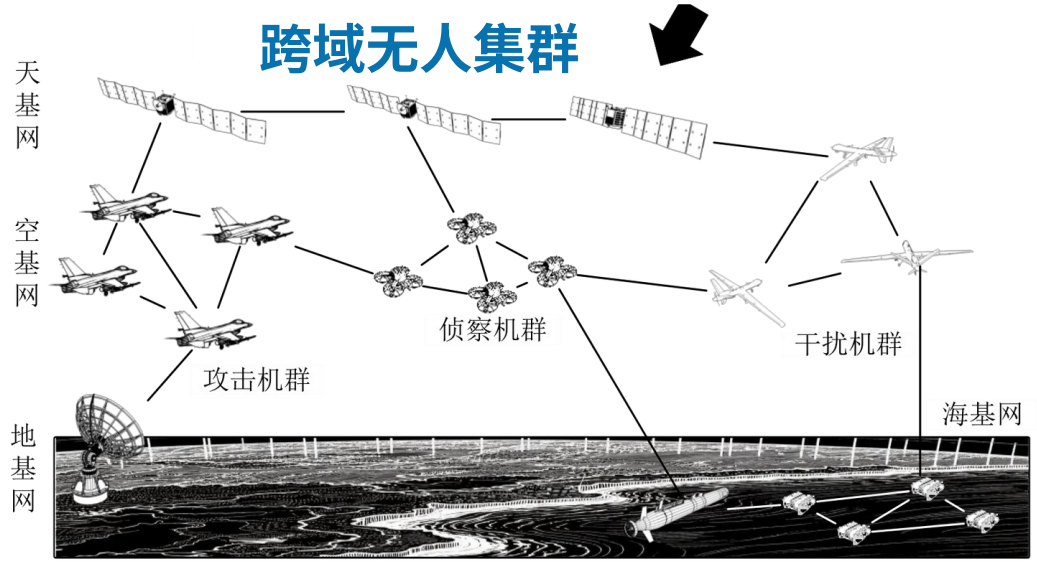
Boids
三项原则

1.2.3 无人集群系统发展趋势简介：组织关系

协同能力扩展：队形约束到跨域分工

图1.4 无人系统从单体到集群





- **单机到编队：**单机先能跟踪目标，编队再约束成员之间的相对位置。
- **队形方法：**领航跟随以领航机为基准，虚拟结构让各机跟踪整体队形中的指定点。
- **任务扩展：**侦察、攻击、干扰机群经天、空、地、海基网络跨域分工、交接信息。

1.2.3 无人集群系统发展趋势简介：规模化协作

Perdix（山鹑）无人机试验：规模与协同行为

- **试验条件：**据美国国防部公开材料，2016 年 10 月，103 架 Perdix 微型无人机由 3 架 F/A-18 投放。
- **集体决策：**多个节点依据共享信息形成协调行为，重点是个体行动怎样与群体任务相配合，而不只是同时飞行。
- **自适应与自愈：**公开展示涉及自适应编队和自愈行为，可用于理解组织调整与节点变化后的任务接续。
- **能力边界：**试验展示了特定条件下的协同行为；通信质量、环境和节点失效情况共同影响实际任务效能。



测试中的山鹑无人机

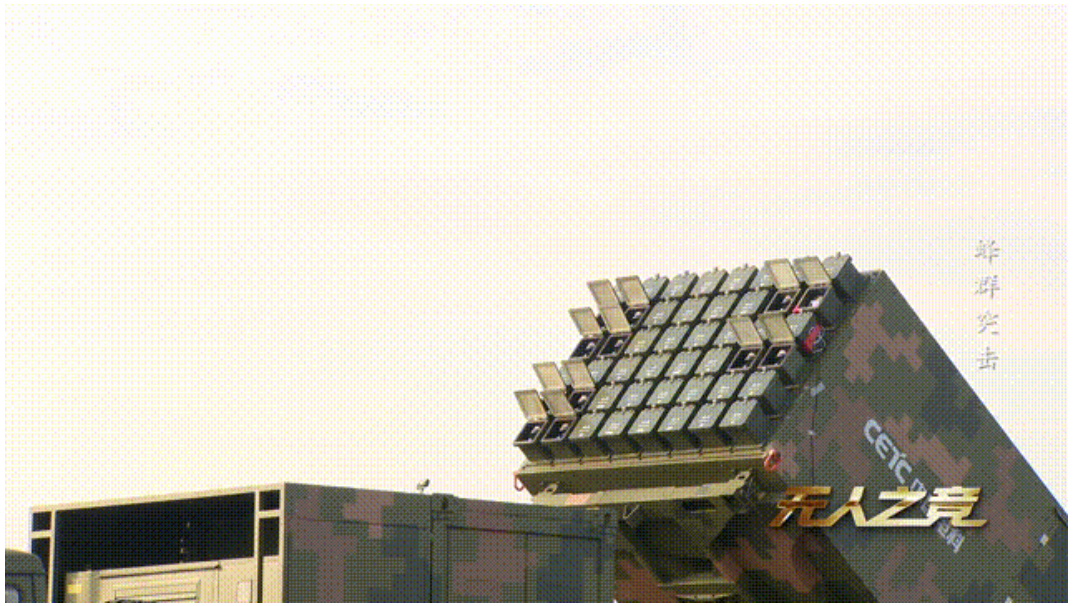


Perdix展示了共同决策与组织调整，实用化仍需通信、避碰与任务接续

1.2.3 无人集群系统发展趋势简介：规模化协作

国内无人集群试验：“阿特拉斯”无人机蜂群作战系统



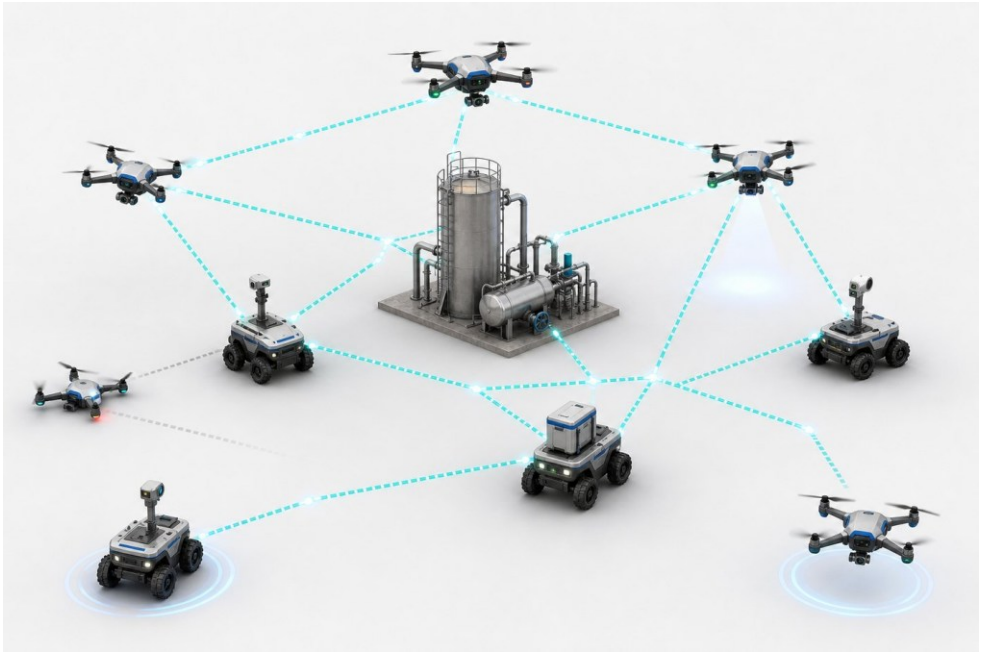


图：中国电科无人机集群发射车与发射装置（2024）

- **发射平台：**每辆发射车装载 48 架无人机，两车可在短时间内连续发射 96 架。
- **指控与保障：**指控车分配任务、监督集群，保障车维持运行，各机共享信息协同。

1.2.3 无人集群系统发展趋势简介：去中心化

规模扩大后，为什么要分担决策



图：多节点网状互联，没有唯一指挥中心

- **规模压力：**节点增多时，集中收集状态和下发动作加重中心计算与通信负担；中心失效：新指令中断（单点故障）。
- **局部协作：**各节点根据本地与邻近信息参与决策，把部分计算分散到现场。
- **新增代价：**不同节点的信息不完全一致，延迟和丢包可能导致重复分配，需要协调规则。

去中心化通过局部协作分担决策，一致性维护带来通信与协调代价

1.2.3 无人集群系统发展趋势简介：去中心化

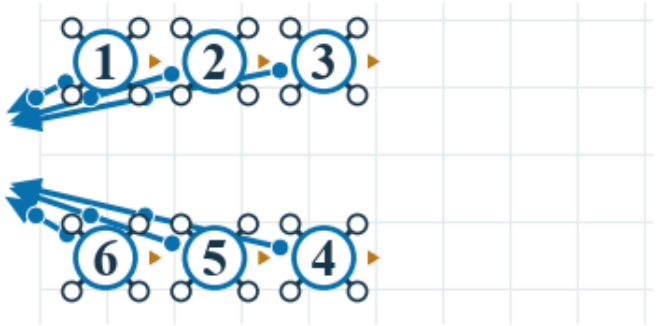
集中决策与分布协同的代价

集中式：中心计算

同一任务：保持队形向右飞行

地面/中心

全队状态
统一求解



1 全队上报状态

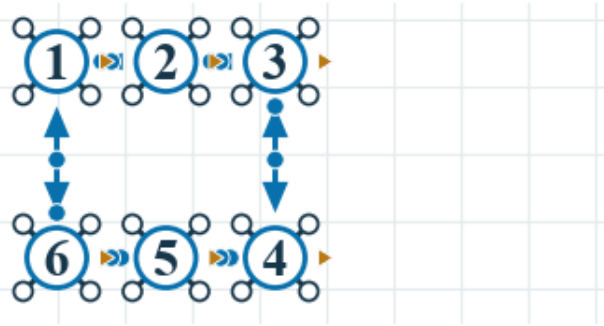
全队信息 → 中心 → 各机指令

分布式：各机计算

同一任务：保持队形向右飞行

近邻信息

各机计算



1 获取近邻相对位置

近邻信息 → 本机 → 本机指令

蓝：状态信息　绿：计算 / 指令　赭色：飞行轨迹与方向

图：相同编队飞行任务，不同的信息来源与指令计算位置（数值算例）

1.2.3 无人集群系统发展趋势简介：失效重构

从协同演示到任务连续性



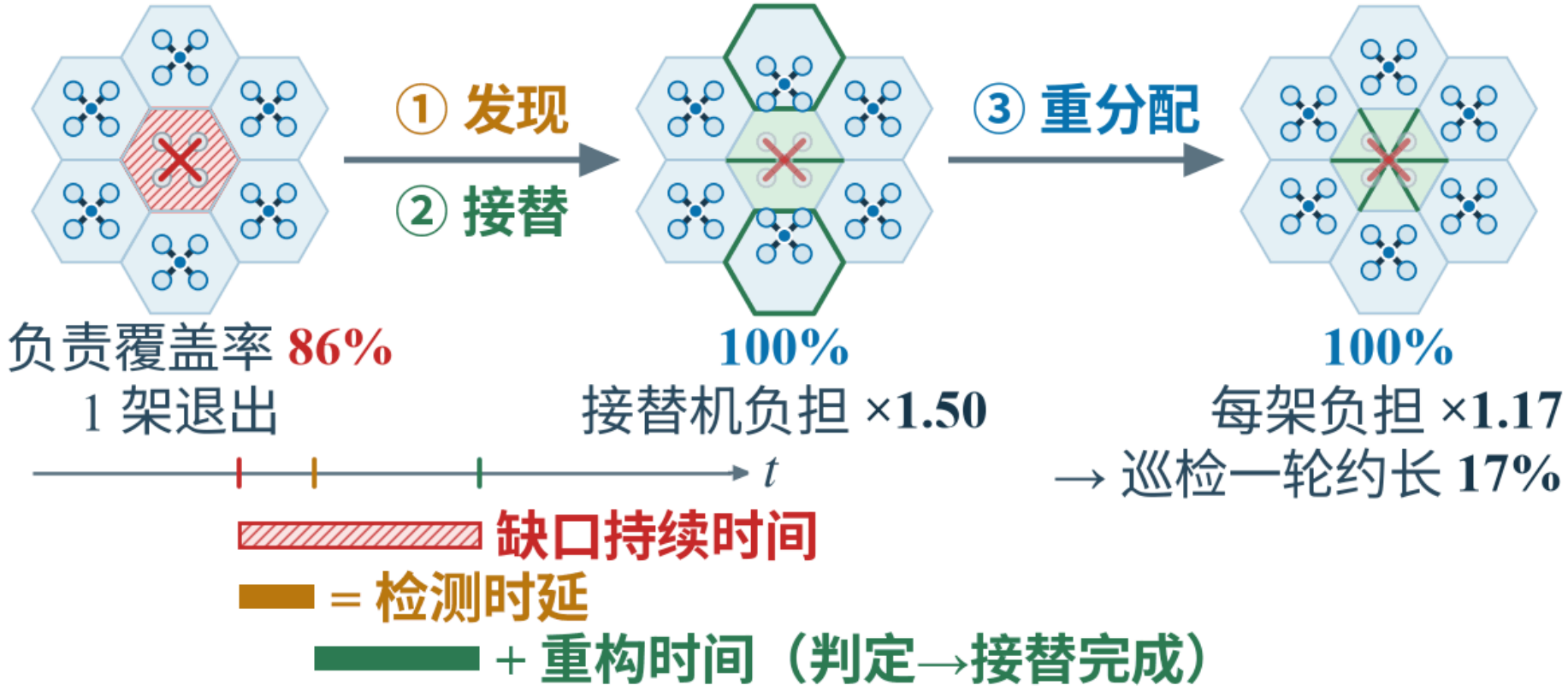
图：节点退出后的发现、接替与重新分配（示意）

- **发现变化：**节点或监测端依据状态更新识别异常，通信延迟可能被误判为退出，检测滞后会推迟接续。
- **接替任务：**剩余节点按能力与可用资源承担空缺任务，额外负担也会挤占原有任务的执行资源。
- **重分配：**队形与覆盖随分工调整，重构越慢，覆盖缺口持续越久，剩余资源限制可恢复的任务范围。

集群增加了通信与分工，节点失效后的任务接续是可靠协同的难点

1.2.3 无人集群系统发展趋势简介：失效重构

节点退出后：发现、接替、重分配



图：节点退出与任务重分配的过程（原理示意）

本章目录

本节沿三条路线理解能力演进

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 4 个教学单元

1.2.1 机器人发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.1 节

1.2.2 无人机发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.2 节

1.2.3 无人集群系统发展趋势简介

教材对应：第 1.1.2.3 节

1.2.4 汇合与辨析

教材对应：第 1.1.2 节导言

1.2.4 汇合与辨析：发展趋势

三条发展路线如何汇合为系统能力

- **载具基础：**机器人路线提升运动控制与环境交互能力，
  无人机路线结合飞行、任务载荷与信息传输，扩展任务执行范围。
- **智能赋能：**把人在控制与决策中的部分判断交给机载感知与人工智能，
  使飞机、车辆、舰船等载具在授权范围内无需人工操控即可完成特定任务。
- **群体协作：**集群路线用通信和任务分配组织多载具协作，
  多个节点利用共享信息协调决策，使单机能力共同服务于任务目标。
- **发展方向：**单机增强任务自主性；分散决策降低集群对单一中心的依赖。
  防范通信失效、黑客攻击、数据泄露与恶意干扰成为关键条件。

三条路线的汇合，使“机器会动”逐步走向“系统能自主完成任务”。

1.2.4 汇合与辨析：能力边界

能力层次与运行条件

能力层次	任务能力	运行前提	典型边界
机械执行	按机构关系 执行预定动作	齿轮、连杆等 固定传动约束	缺少状态反馈 难以自动纠偏
反馈纠偏	连续测量偏差 并修正动作	测量、控制计算 与驱动响应	测量偏差与 执行器限制
任务自主	依据环境变化 调整任务方案	感知、规划 与任务授权	超出适用范围 需要降级或接管
多机协同	多个节点分工 并协调行动	状态共享、通信 与任务分配	断链或节点退出 需要任务重构

执行、纠偏、自主与协同可以叠加，系统能力取决于各层配合及运行条件

课堂讨论

生产者、用户与监管机构怎样检验能力说法

- **任务能力：**说“能自主完成任务”时，具体任务与环境是什么？成功率如何统计，哪些环节有人协助，失败后怎样处理？
- **成本收益：**说“更省钱”时，与哪个方案比较？按采购还是全寿命成本计算？人员、训练、维护和运行保障是否计入？
- **运行安全：**说“很安全”时，针对哪一类伤害风险或通信威胁？验证了哪些条件，还剩哪些未覆盖的风险？
- **多机协同：**说“协同能力强”时，一个节点退出后多久被发现、由谁接替？任务完成率和覆盖完整性怎样变化？

明确生产者、用户和监管机构的需求与评价依据，有助于改进产品设计

本节小结

能力汇合之后，需要共同的系统架构

- **发展所得：**机构与反馈形成运动能力，载荷与通信扩展任务范围，感知与协作支持环境适应。
- **共同问题：**不同能力要在同一载具中共享状态、供电与执行资源，单独堆放模块不能完成任务。

由能力演进转向系统实现

功能：需要完成什么
部件：由哪些设备实现
运行：信息与指令怎样配合

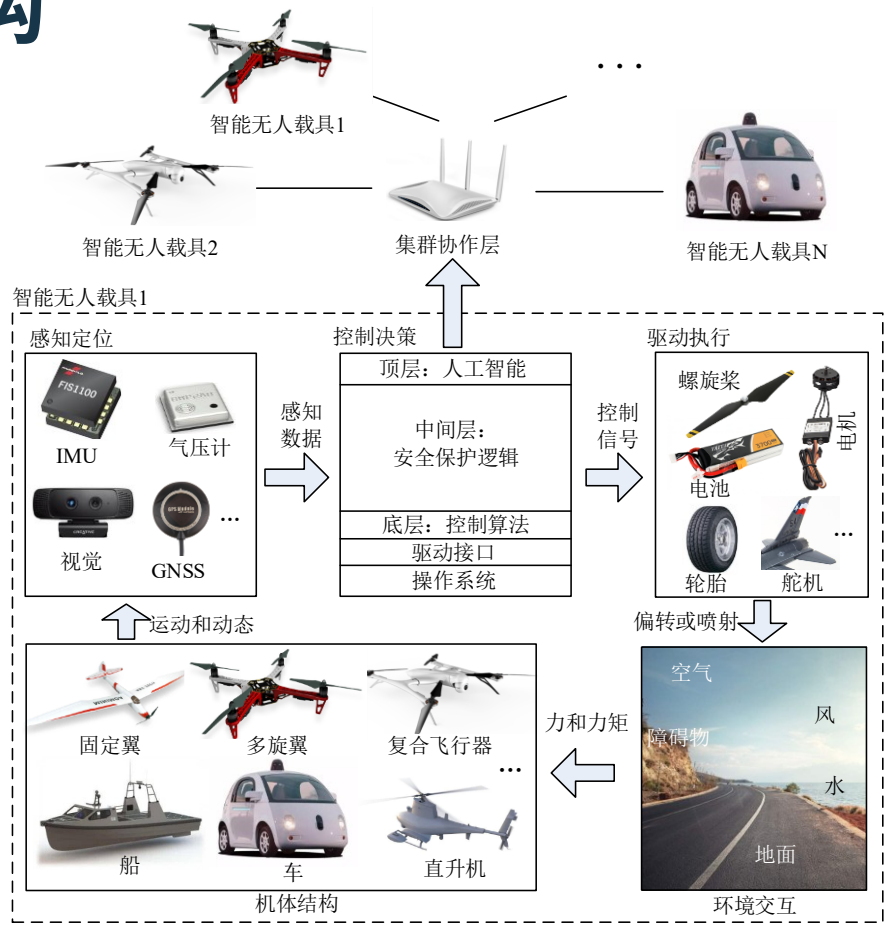


图1.6 无人系统统一框架