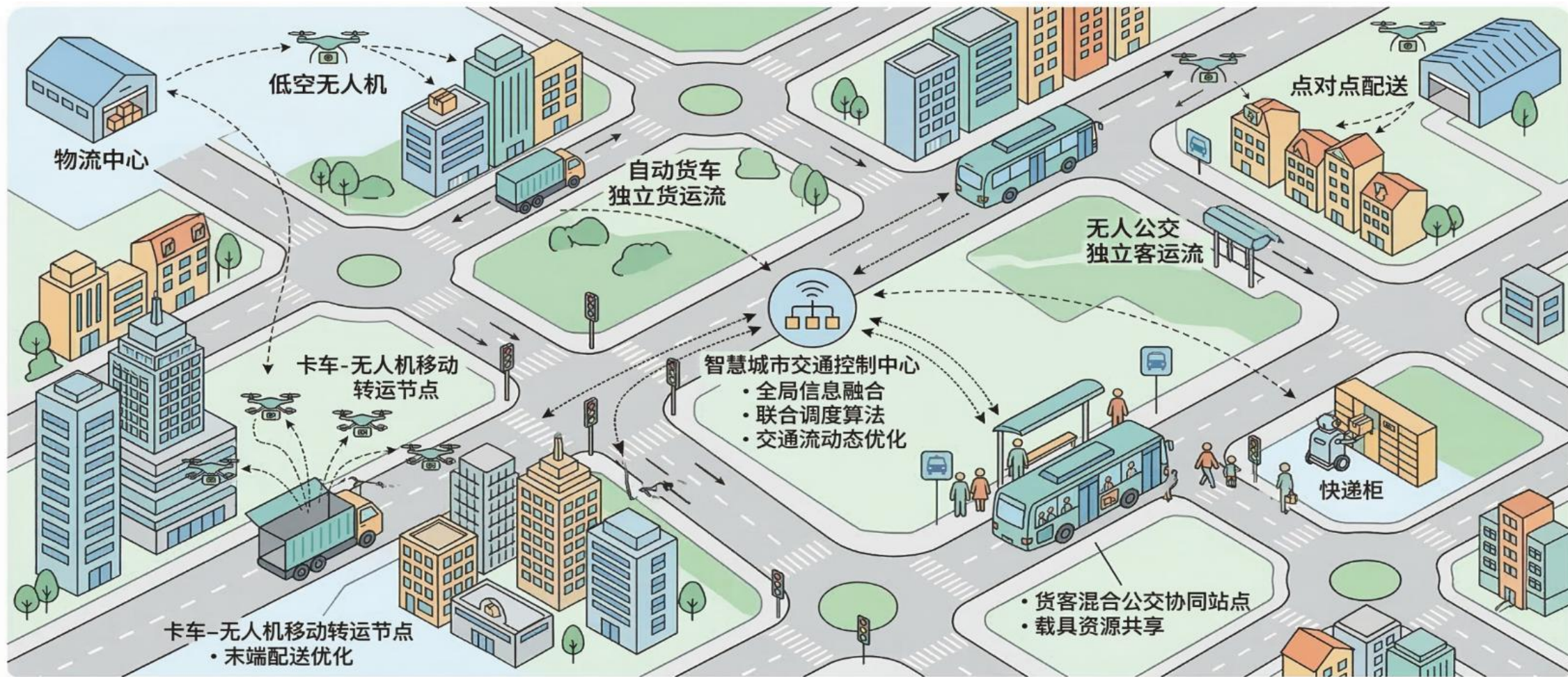


多模式低空运输系统运营与行业监管



空天智网



多模式自主运输研究团队

傅 惠 教授、博导



广东工业大学期刊中心主任

机电工程学院 教授、博导

低空物流智能技术研究院负责人

广东省低空经济专委会专家

国家科技部重点研发项目评审专家

《工业工程》期刊主编

荷兰代尔夫特理工访问学者

瑞士洛桑联邦理工大学访问学者

广东省道路交通安全专家

广东省机械工程学会工业工程分会理事长

研究领域：智慧运输、物流运作、低空物流、大数据分析、系统仿真、数字孪生、自动控制

研究对象：无人机（飞行控制、航迹规划）、汽车（运行控制、编队控制）、公交（调度优化）、AGV（调度优化）

研究范围：建筑物行人仿真、公交线网优化、城市交通管理、高速路网拥堵管理、仓库物流调度与运作管理、定价策略

研究特色：交通控制、公交调度、交通仿真（Vissim、Sumo、Carla）、物流仿真（Plant Simulation、Unity3D、自研）

团队情况

1. 运输系统与运营调度：（交通运输）

- 技术特色：低空航迹优化、多模式公交调度、交通噪声监测
- 核心成员：赵佳虹 副教授、韩霜 副教授、王海波 副教授、胡三根 讲师

2. 物流调度与系统控制：（物流、控制）

- 技术特色：多模式物流调度、服务排班优化、车辆调度优化与控制
- 核心成员：魏丽军 教授、叶艳 副研究员、曾伟良 副教授、李玮琛 博士生

3. 人工智能与系统仿真：（计算机、虚仿）

- 技术特色：人工智能与深度学习应用、低空物流系统仿真自动建模
- 核心成员：何汉武 教授、孟献兵 副教授、吴悦明 高级实验师、李宏鹏 博士生

4. 数字孪生系统设计：（工业工程、数字孪生）

- 技术特色：低空物流系统规划、数字孪生体系、定价策略与运营评估
- 核心成员：傅惠 教授、冷杰武 教授、赖信君 副教授、陈友滨、崔煜 博士生

依托科研平台

国家级平台：制造业物联网技术国家地方联合工程实验室

广东省CIMS重点实验室：工业与物流运筹实验室、虚拟现实实验室

校区共建平台：民航运筹优化实验室（南航）、低空物流智能技术研究院（顺丰）

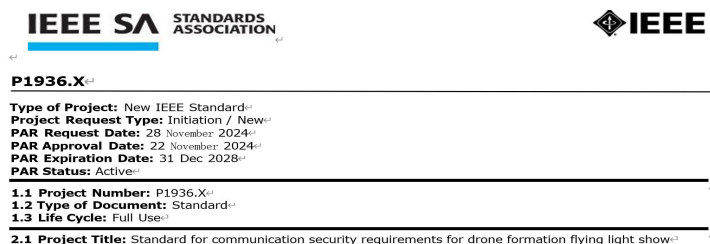
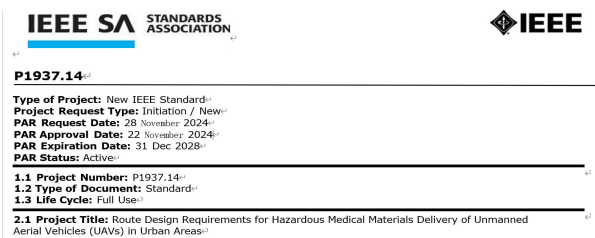
团队成果-专利与获奖



团队成果-标准与论文

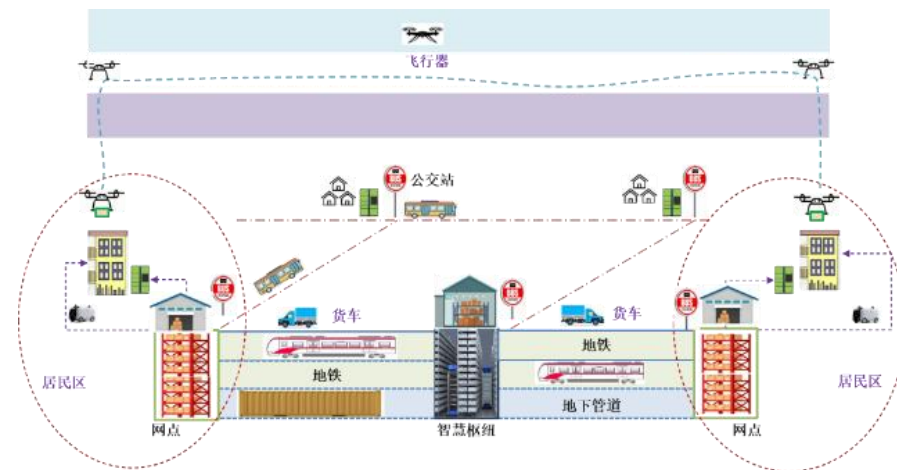
参与的代表性标准如下：

- 国际标准. Route Design Requirements for Hazardous Medical Materials Delivery of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Urban Areas. 2025-02.
- 国际标准. Technic Requirements of Airport Geofencing for Unmanned Aerial Vehicles(UAVs) Operation. 2025-02.
- 国际标准. Standard for Taxonomy and associated requirements for Unmanned Aircraft System's autonomy levels. 2024-03.
- 国际标准. Standard for communication security requirements for drone formation flying light show. 2024-03.
- 国际标准. Standard for civil unmanned aerial systems (UAS) cybersecurity framework.2024-03.
- 国际标准. Standard for specifications for lithium ion cells and batteries used in unmanned aircraft systems(UAS) .2024-03.



1. “城市公共交通大数据开放平台研发与产业化”，广东省科技计划项目(2016B010127004), 2017.1-2021.12，项目技术骨干。
2. “基于复杂路况感知与客流大数据的多模式公交调度技术研究”，广州市对外科技合作项目(201504291250033), 2015.9-2018.6，项目负责人。
3. “面向城市CBD路网多个拥堵子区的交通疏导与边界控制协同方法”，国家自然科学基金项目(61573110), 2015.9-2019.12, 项目负责人。
4. “城市交通突发事件应急联动的流程建模与资源优化调度”，国家自然科学基金项目(61104167), 2012.1-2014.12, 项目负责人。
5. “广州市交通委员会信息化发展十三五规划”，广州市交通委员会项目, 2014.12-2016.6, 项目负责人。
6. “番禺区亚运智能交通系统建设规划”，番禺区交通局, 2009.1-2009.12, 项目负责人。

- 傅惠 等，网联自动驾驶货车编队规划与控制研究综述，工业工程，2024年第1期；
- 傅惠 等，低空无人机物流配送研究与应用综述，工业工程，2025年第1期；入选中国交通运输协会研究部《低空经济内参》，中国知网下载9944次，被引65次。



- 傅惠 等，AI与低空经济时代下的多模式低空物流系统可持续设计，Design for Augmented Humanity, 2026年。

01 低空运输系统内涵

中国低空经济**产业链上游**为原材料与核心零部件领域，研发包括各种工业软件，原材料包括钢材、铝合金、高分子材料等，零部件包括芯片、电池、电机等；**产业链中游**包含无人机、航空器、高端装备、配套产品、低空保障与综合服务；**衔接下游**需要有飞行审批、空域备案等，通过后的下游应用是低空经济与各种产业的融合。



地面物流承载压力大，而低空智联网的出现有利于低空物流的发展。到2035年，我国仅无人机物流行业产值可超万亿元规模，因此低空经济+物流是巨大的发展机遇。

概念及构成

- 所在空域：G类空域（高120-300米）
- 实施目的：小批量、高频词、即时性货物配送
- 配送要求：直线距离10km以内，载重在5kg ~ 20kg
- 关键设备：无人机、eVTOL、通航直升机等

低空经济+物流产业构成



机 遇
(利好业态)

智慧交通

智能配送

数字物流

城乡经济

挑 战

安全隐忧

续航局限

载重瓶颈

审批复杂

1-1 全空间无人化是发展趋势

◆当前进展：

- ◆无人货运：全国无人驾驶物流车超1.5万台，低空物流无人机登记215.8万架
- ◆深圳现状：深圳无人物流车800多台规模第一，新石器、美团、顺丰领先
- ◆广州现状：小马智行货车编队，文远知行、九识无人配送车、顺丰低空物流

◆未来趋势：

- ◆无人机与无人车协同：灵活便捷低成本（无人机）、量大末端可及（无人车）
- ◆无人机与机器人协同：面向末端配送的小区、楼宇应用场景（搬运机器人）

结论：无人车、无人机、机器人协同，提升行业韧性！

1-2 运营与监管是核心命题

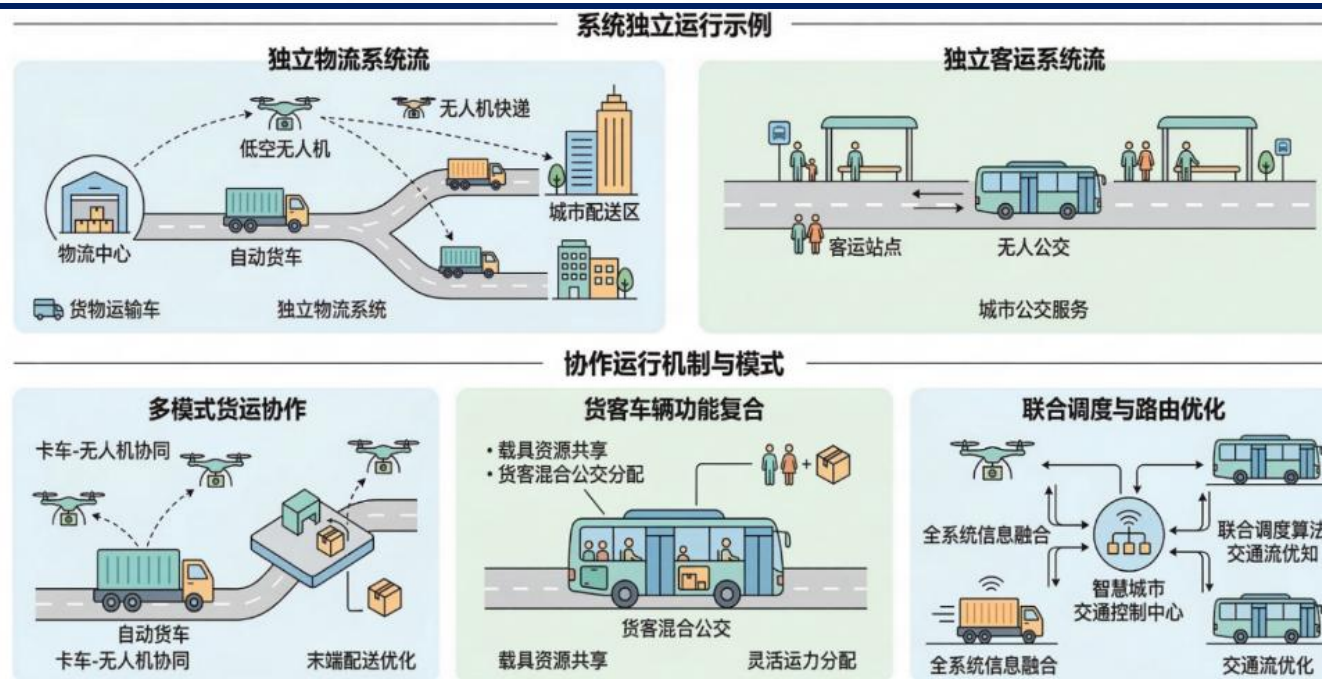
运营场景设计：

- ◆ 公交-地铁客货一体化运输
- ◆ 无人机-车-机器人末端配送
- ◆ 高速路服务区低空物流

行业支撑监管：

- ◆ 运营需求：场景设计能力、客货运输系统融合设计、有人无人作业重构
- ◆ 监管职能：跨部门协同机制、客运货运行业许可、客货安全监管机制
- ◆ 技术需求：系统运营仿真、数字孪生运控、空中交通管理、应急处置体系

结论：运营是行业命脉、监管是行业基石！



1-2 多学科交叉是根本特征

◆物流工程/工业工程/系统工程：

◆作业管理：供应链管理、仓储管理、物流设施选址、仓库设计、流程优化等

◆系统优化：配送路径优化、装箱优化、成本核算、利益分配、系统仿真

◆自动控制/交通运输/通信工程：

◆无人机控制：飞手训练、航迹控制、飞控系统、多机作业协同控制

◆运输管理：起降场规划、低空线网规划、航迹冲突消解、空中交管

◆计算机/车辆工程/测绘工程：

◆调度系统+仿真、人工智能+决策、无人车控制+维护、航线规划设计

结论：跨学科研发新技术、跨专业培养新人才！

2026年全球全空间无人体系数字孪生平台市场规模

全球市场规模：25年市场规模约 95-110 亿美元，年复合增长率 34%

中国全空间无人体系数字孪生平台市场潜力与人才缺口分析

全空间无人体系数字孪生平台

180-220亿 2025年市场规模
750-850亿 2030年预测规模
33%-38% 年复合增长率(CAGR)

无人机仿真培训市场

80-95亿 2025年市场规模
220-260亿 2030年预测规模
26%-30% 年复合增长率(CAGR)

无人机操控员：供需严重失衡

100万+ 行业人才缺口
20.7万 全国现有持证人数

无人机装调检修工：缺口巨大

预计2030年人才缺口达**350万**



数据来源：Research and Markets (2026/01) | Future Market Insights (2025/09) | 中国科学院地理科学与资源研究所 (2026/04) | 环球低空经济研究院 (2026/03) | QYResearch (2026/04) | 中国民航局 (2025)

政策洞察：国家战略引领、省级硬核支持、市级落地保障

国家-省-市联动三级政策加持，赋能全空间无人体系加速落地



01 国家战略引领

- 顶层定调**：将低空经济、无人系统、数字孪生、仿真训练列为战略性新兴产业，全链条支持
- 执照强制仿真**：CAAC无人机超视距驾驶员执照必须使用认证仿真软件。
- 产教融合**：支持院校建设仿真实训基地、装调检修实训中心，经费 + 试点 + 认证三位一体支持



02 省级硬核支持

- 技术攻关资金**：低空基础软件、飞控、仿真、运控平台纳入省重点领域研发计划，给予专项资金支持。
- 产教融合**：支持高校、企业共建低空产业学院、实训基地、仿真培训中心，强化无人机装调、运维、操控人才培养。
- 空域开放**：建设省级低空飞行服务平台，推动常态化空域开放。



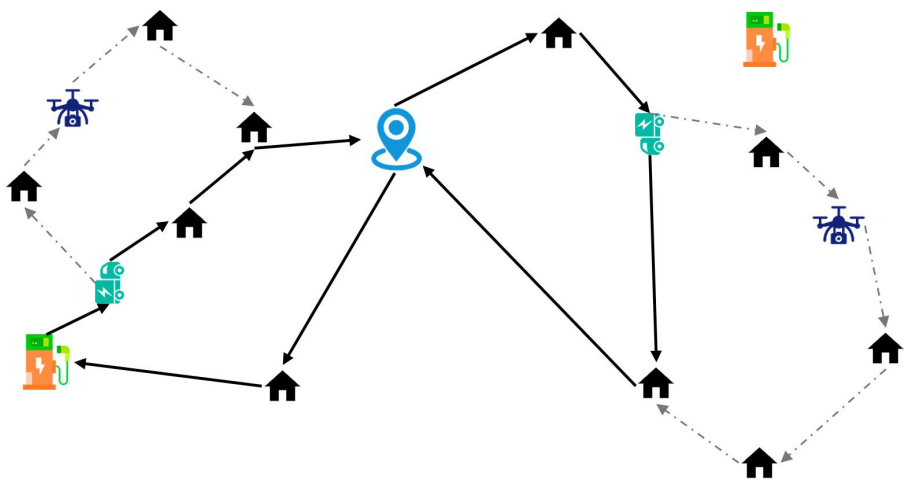
03 市级落地保障

- 投资补贴**：研发项目按固定资产投资给予2%-5%补贴。
- 关键技术攻关奖励**：低空核心软件、仿真系统、运控平台、装调检测技术攻关，单个项目最高奖励1500万元
- 场景开放**：广州大学城开放常态化空域与路权，支持示范落地。
- 人才支持**：支持共建仿真实训中心、无人机装调检修实训基地。

02 低空运输系统研究

2-1 车机协同调度优化（小区、示范区协同作业）

问题描述



配送网络

单配送中心，多充电站与客户节点

协同模式

多电动货车与多无人机协同配送

无人机服务

支持单次飞行多节点连续配送服务

混合需求

需求类型包括上门送货需求、上门取货需求

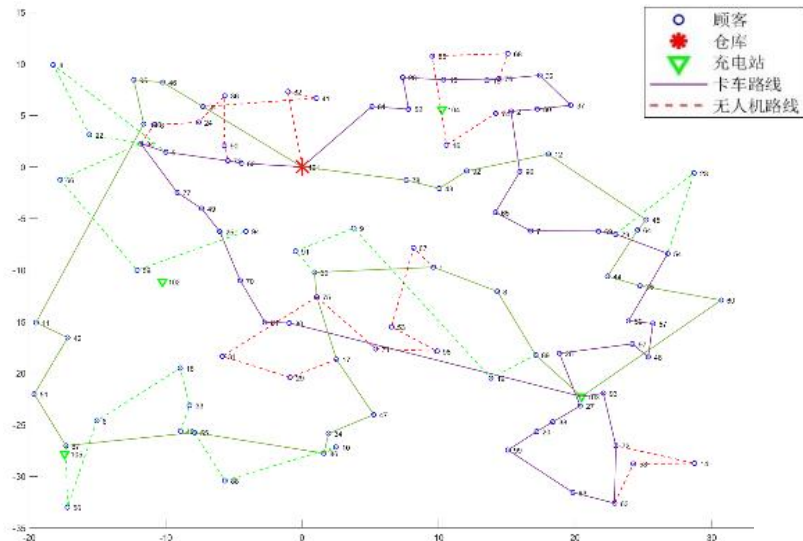
充电决策

在行驶途中据剩余电量决定是否前往充电站

优化目标

最小化系统总配送成本

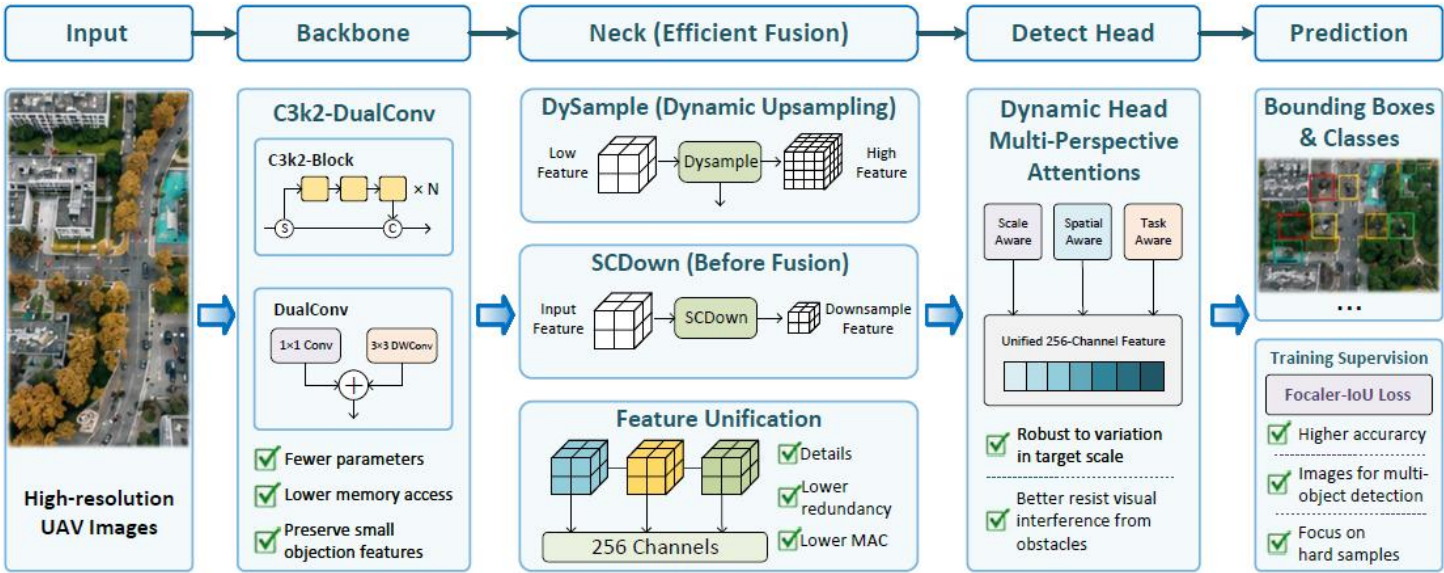
算法求解



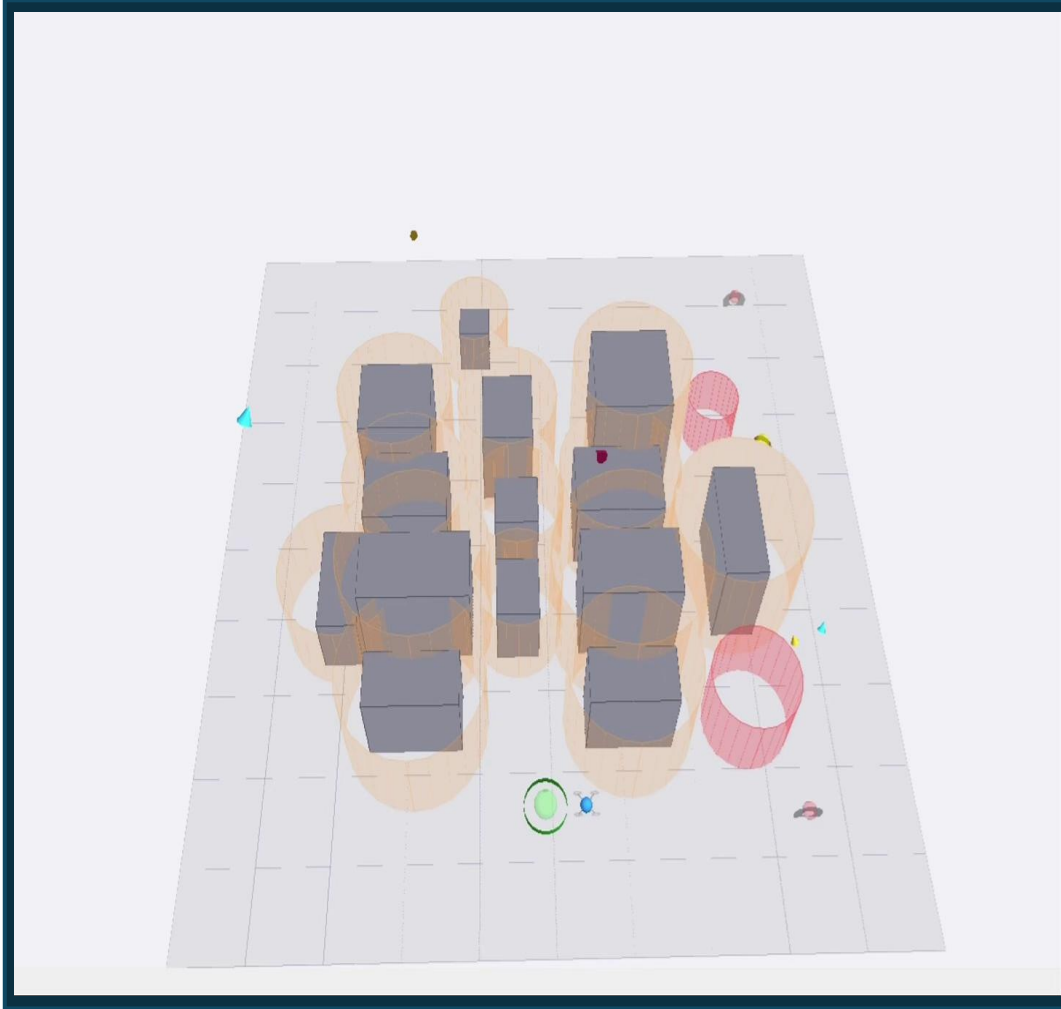
路线名称 ¹⁾	具体路径 ²⁾	
电动货车 1 路线 ³⁾	101-81-52-28-13-76-15-32-37-80-2-96-65-7-69-79-54-50-57-48-97-26-27-38-20-99-83-63-72-93-104-30-61-70-25-49-77-84-5-73-62-101 ⁴⁾	↩
电动货车 2 路线 ³⁾	102-21-46-95-100-11-42-51-87-55-86-34-47-17-75-39-1-8-89-104-60-35-44-64-45-12-92-43-78-102 ⁴⁾	↩
电动货车 1 无人机 1 第 1 次飞行路线 ³⁾	76-68-85-16-74-2 ⁴⁾	↩
电动货车 1 无人机 1 第 2 次飞行路线 ³⁾	63-58-14-72 ⁴⁾	↩
电动货车 1 无人机 1 第 3 次飞行路线 ³⁾	84-3-24-36-90-73 ⁴⁾	↩
电动货车 1 无人机 2 第 1 次飞行路线 ³⁾	79-23-54 ⁴⁾	↩
电动货车 1 无人机 2 第 2 次飞行路线 ³⁾	25-94-59-66-84 ⁴⁾	↩
电动货车 1 无人机 2 第 3 次飞行路线 ³⁾	84-22-4-5 ⁴⁾	↩
电动货车 2 无人机 1 第 1 次飞行路线 ³⁾	102-82-41-21 ⁴⁾	↩
电动货车 2 无人机 1 第 2 次飞行路线 ³⁾	17-29-31-75 ⁴⁾	↩
电动货车 2 无人机 1 第 3 次飞行路线 ³⁾	75-71-98-53-67-1 ⁴⁾	↩
电动货车 2 无人机 2 第 1 次飞行路线 ³⁾	87-56-6-18-33-40-55 ⁴⁾	↩
电动货车 2 无人机 2 第 2 次飞行路线 ³⁾	55-88-10-86 ⁴⁾	↩
电动货车 2 无人机 2 第 3 次飞行路线 ³⁾	39-91-9-19-89 ⁴⁾	↩

2-2 无人机视频应用技术（行人/建筑避障、噪声控制）

无人机视角多目标检测



考虑噪声情形下的无人机航线规划



使用模型在小目标数据集Visdrone2019进行检测

Visdrone	mAP
Model	38.1

2-3 高速路无人机-车协同（服务区场景）



高速路-匝道-显示屏：安全、畅通

专用道分时使用：动态分配客货车道，融合视频保障安全

路段变速度控制：分段调节通行速度，动态屏幕辅助畅通

无人机-货车-公交车：服务、运营

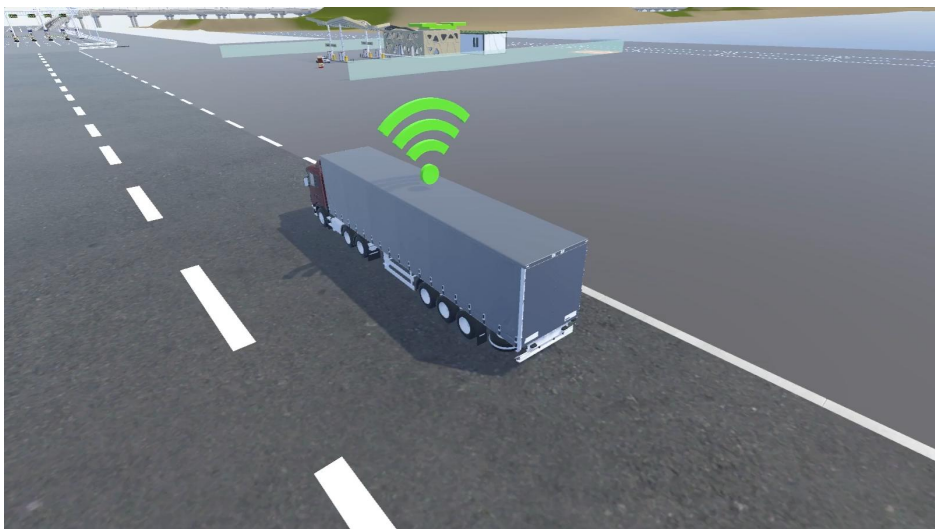
多模式运作协同：大件小件混合运输，突出运营模式创新

多主体效益分配：明确运营场景角色，促进效益共建共享

基站-服务区-服务站：稳定、运维

基础设施重规划：支撑无人车机网联，实现装卸转载编组

系统运行重监管：换电充电维修保养，调度交管数字孪生



以高速路为骨干、服务站为支点、无人机-货车-公交车为载运工具，
打造运行安全、运营稳定、客货并行、天地一体的低空物流示范项目。

高速路低空物流核心问题

01 高速路交通安全与通行效率

◆ 路段安全 ◆ 空域安全 ◆ 高效通行

02 无人机航迹规划与运行控制

◆ 航迹规划 ◆ 车路规划 ◆ 运动控制

03 无人车编队控制与稳定性

◆ 货车编组 ◆ 速度控制 ◆ 编队稳定

04 公交车闲置资源充分利用

◆ 站点设置 ◆ 客货混运 ◆ 货物转载

05 服务站建设与物流仓库管理

◆ 网络通信 ◆ 设施布置 ◆ 仓储管理

06 多模式物流系统运营管理

◆ 运营模式 ◆ 调度算法 ◆ 成本估算

07 多方合作总体利益分配机制

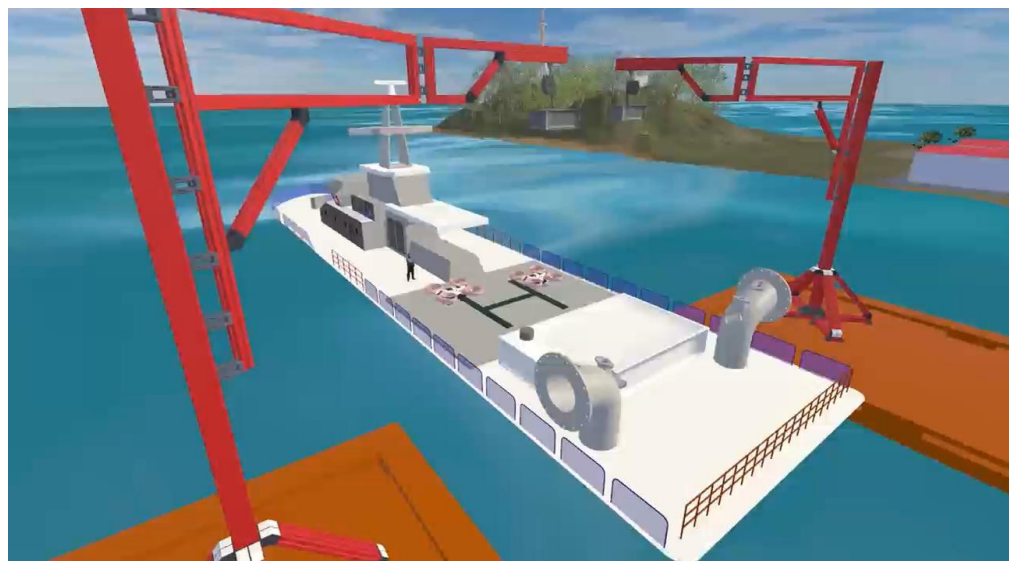
◆ 合作模式 ◆ 利益共享 ◆ 合理分配

08 物流系统多维度效益评估

◆ 经济效益 ◆ 社会效益 ◆ 环境效益

2-4 无人机-船协同作业（面向海洋养殖喂送场景）

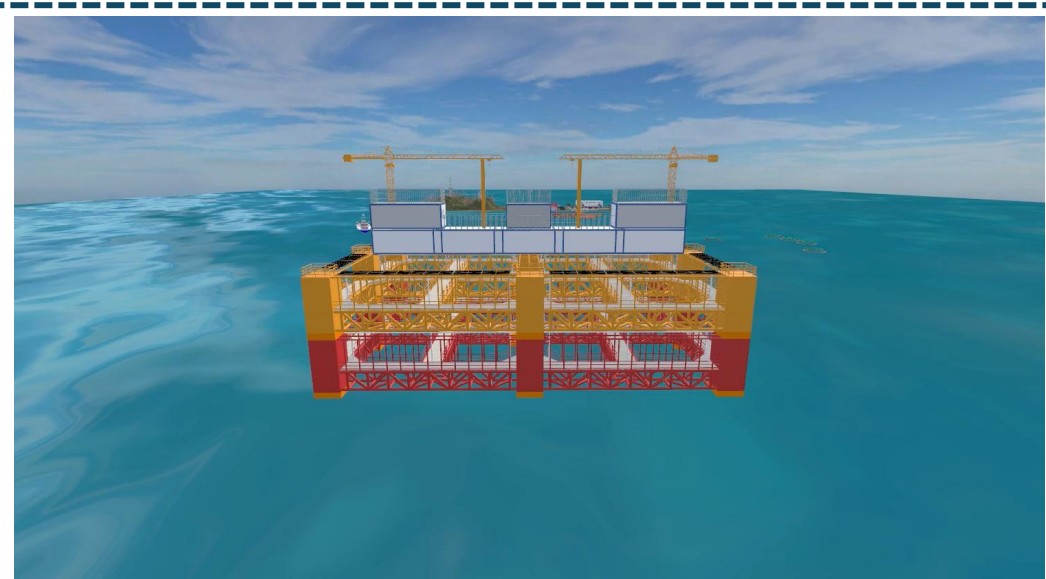
无人机无人船协同作业



海洋牧场环境



恒燄一号养殖平台



2-5 无人机-车协同利益分配（公交站、高速路、小区等）

关键问题



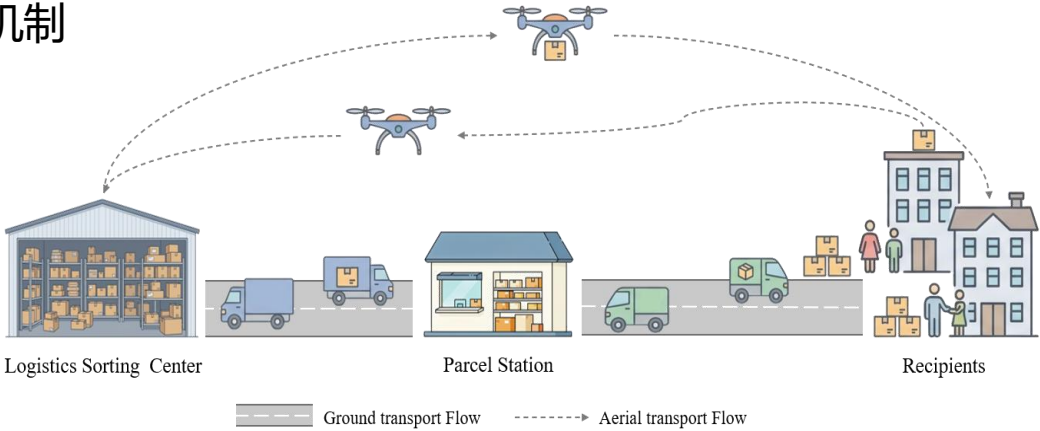
低空物流作为低空经济的重要应用形态，利用**无人机等航空器进行货物运输**，能够有效突破地面交通拥堵和地形限制，极大地提升“最后一公里”的末端配送物流效率。

现有研究在末端配送领域运行效率优化方面的研究已比较成熟，但在运营经济性层面仍存在两方面不足：

- 1) 服务定价制定——定价机制不完善
- 2) 合作收益分配——收益分配不公平

解决方式——车辆-无人机协同末端配送的定价均衡策略与收益分配机制

- ◆构建**车辆-无人机定价决策模型**（非合作定价策略模型和合作定价策略模型）并求解均衡解——**针对运输场景制定配送服务定价策略**；
- ◆系统分析关键参数对均衡结果的影响，识别“合作策略更优”或“非合作策略更优”的**边界条件与阈值**——**确定合作边界**；
- ◆考虑成员异质性的多维贡献因子，构建面向车辆-无人机协同末端配送的修正shapely值分配方法——**针对配送主体特征制定合作收益分配方案**。



“车辆-无人机”协同末端配送场景示意图

无人机与无人车独立经营、合作定价

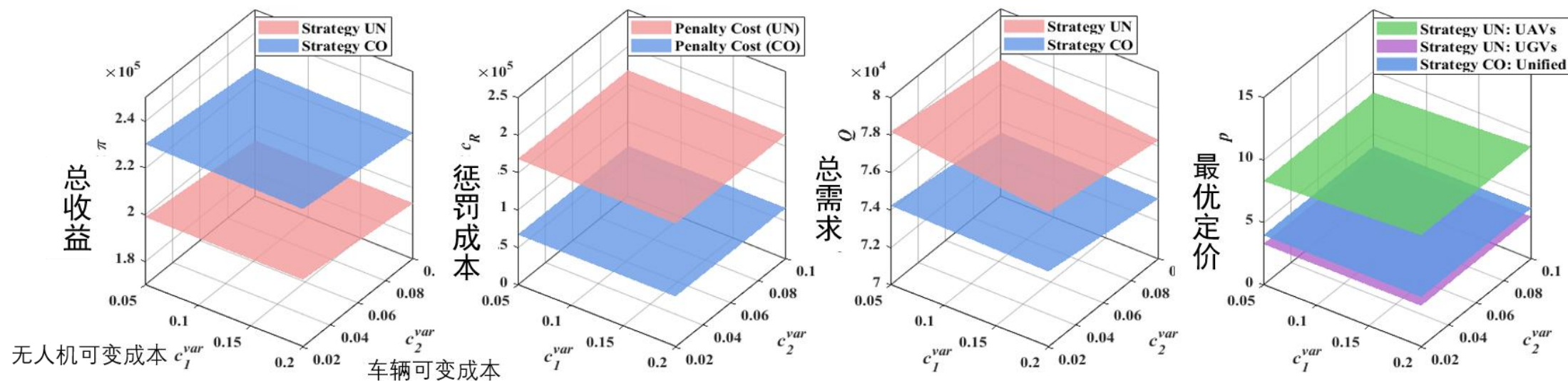


图5 车辆-无人机低空物流末端配送场景下可变成本对均衡结果的影响

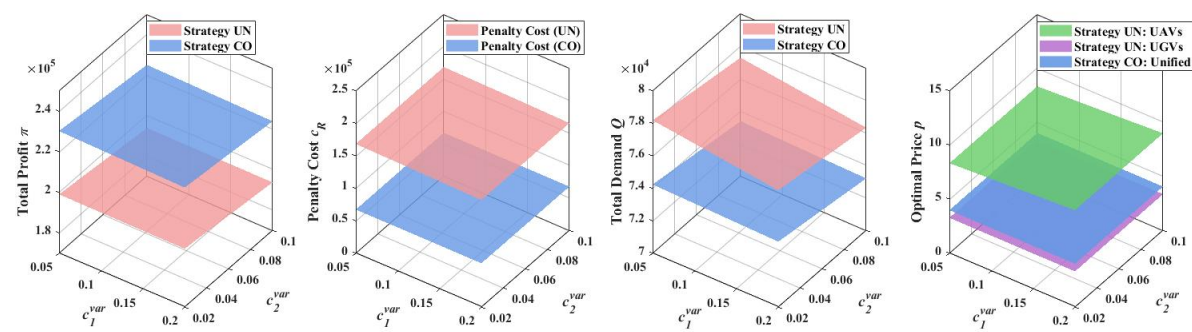
- **总收益**: 合作定价策略 > 非合作定价策略
- **惩罚成本**: 合作 < 非合作
- **总需求**: 合作 < 非合作
- **最优定价**: 车辆 < 合作 < 无人机

联盟收益的增长**并非依赖市场扩张**

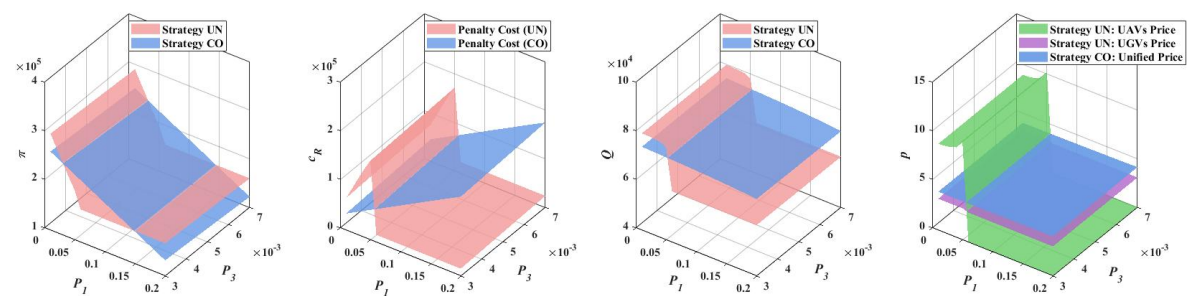


无人机-车协同利益再分配

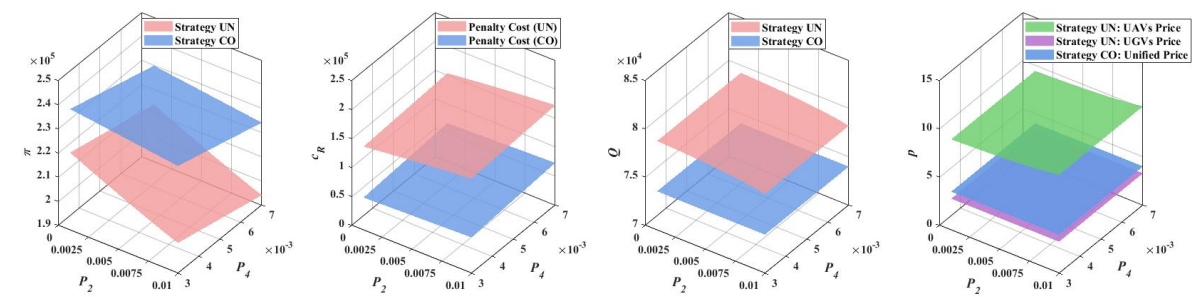
研究结果



车辆-无人机低空物流末端配送场景下可变成本对均衡结果的影响



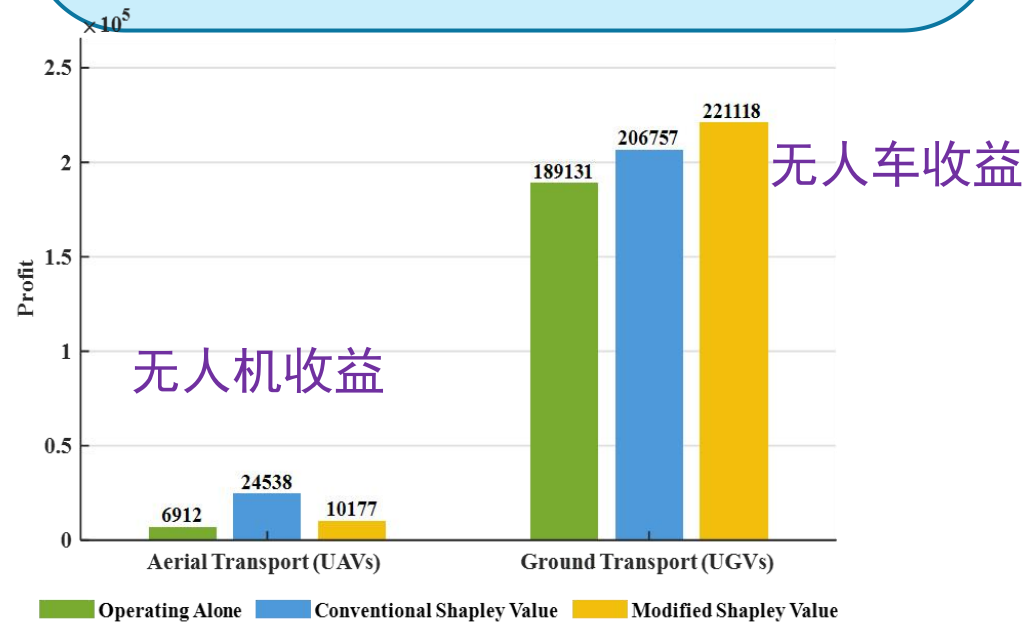
重度延误风险概率对均衡结果的影响



中度延误风险概率对均衡结果的影响

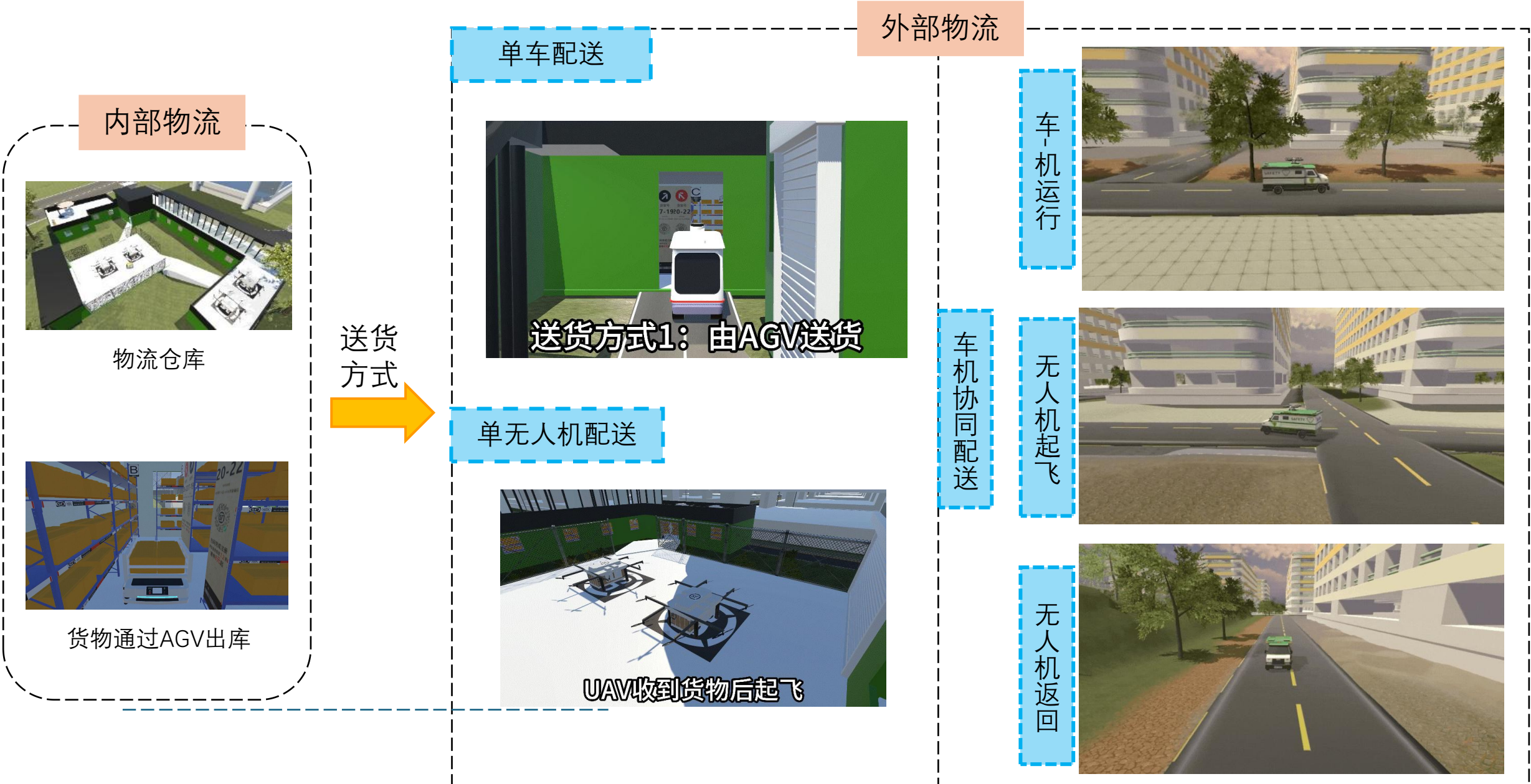
以广州大学城车-机联合配送场景为案例，
对定价模型与收益分配机制进行验证：

- ① 合作定价策略下，单个包裹配送定价优化至**4.02元**；
- ② 单日联盟**总收益提升18%**；
- ③ 无人机与无人车的收益相较合作前分别**提升47.2%**与**16.9%**。



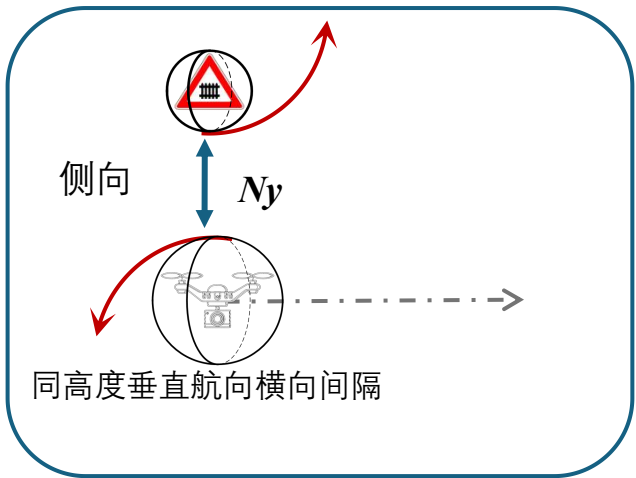
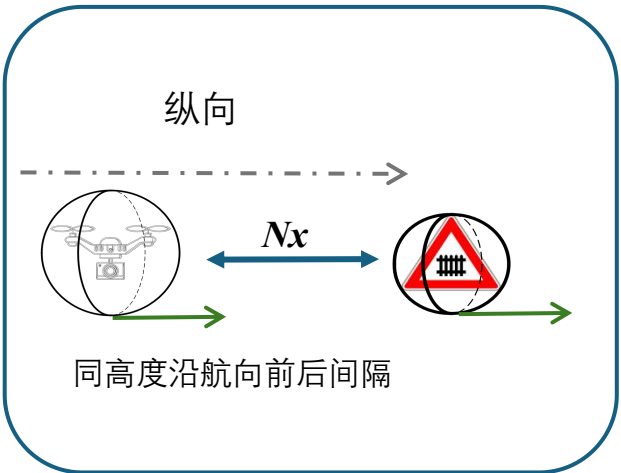
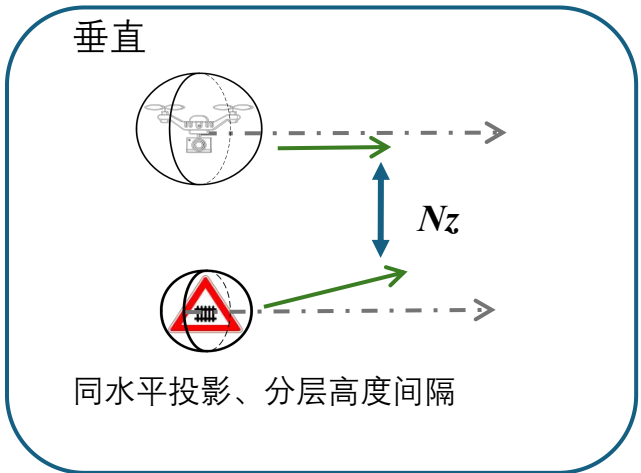
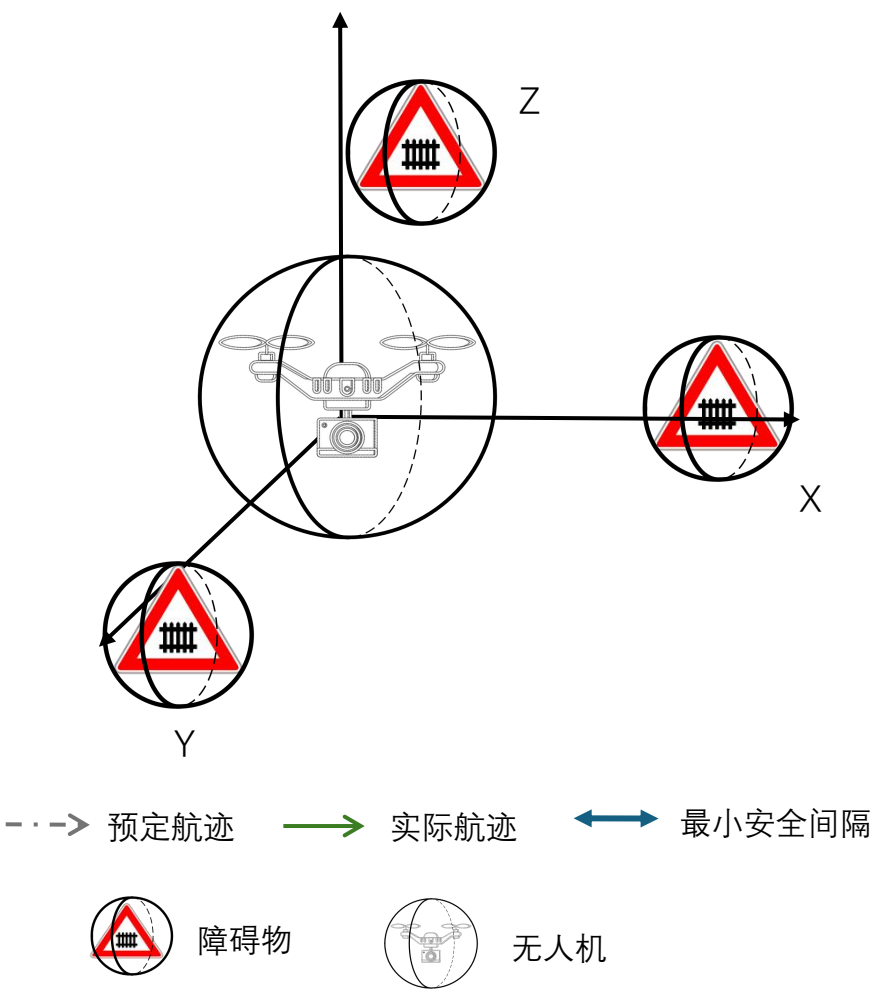
无人机与车辆在不同收益分配方法下的对比

2-6最后一公里物流配送设计



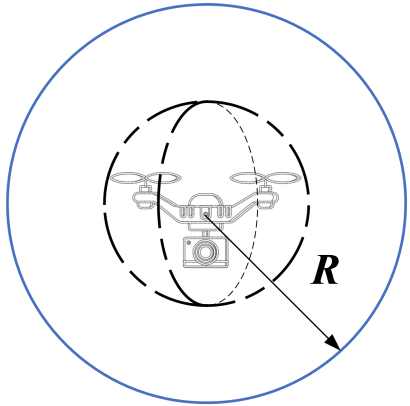
2-7 无人机运输安全评估（企业端、监管端）

无人机运行安全间隔

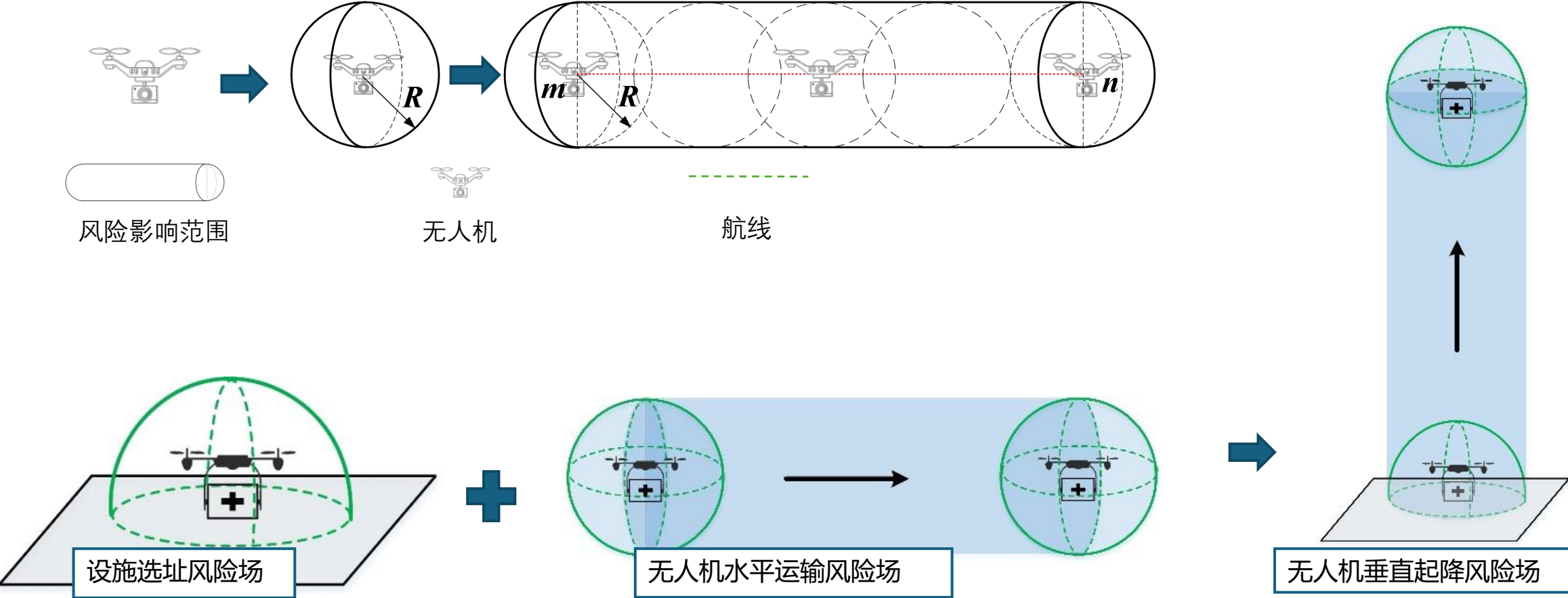


最小安全间隔

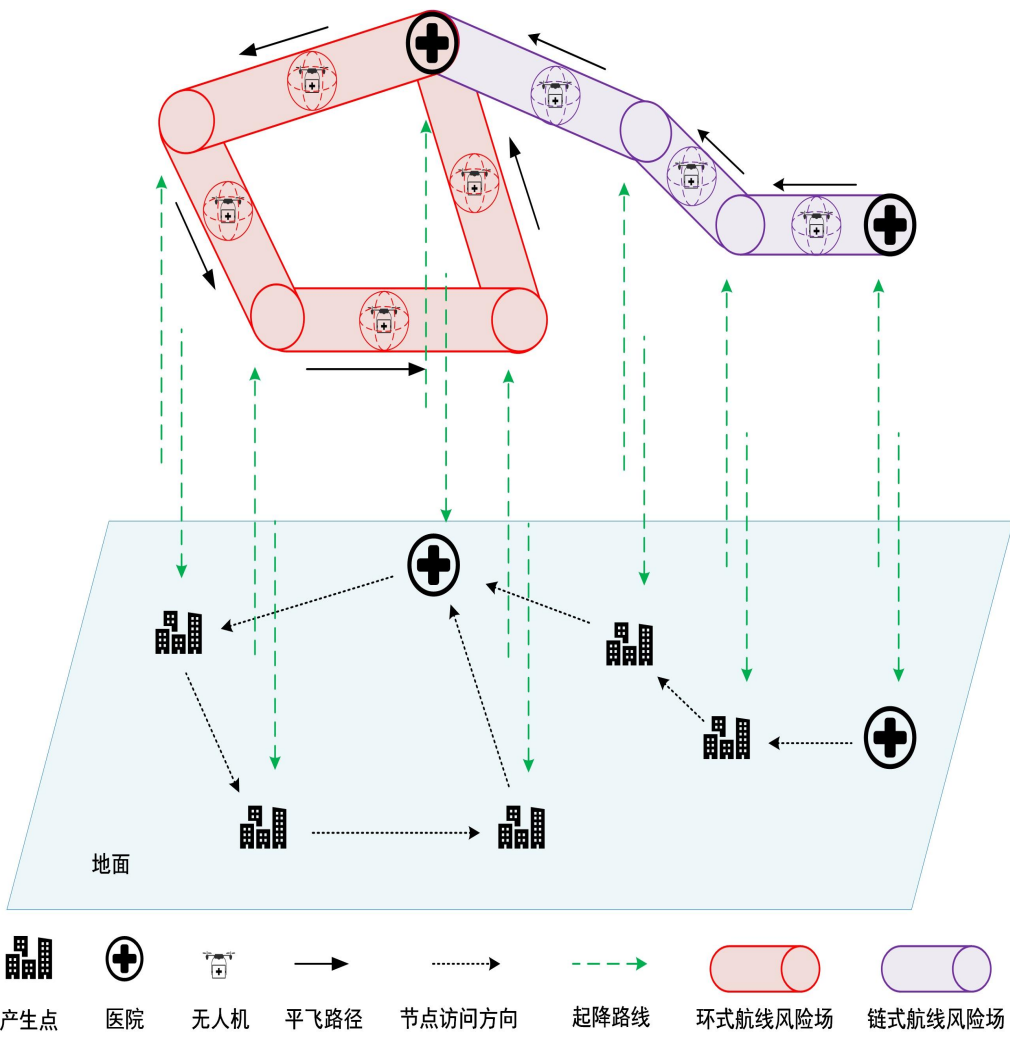
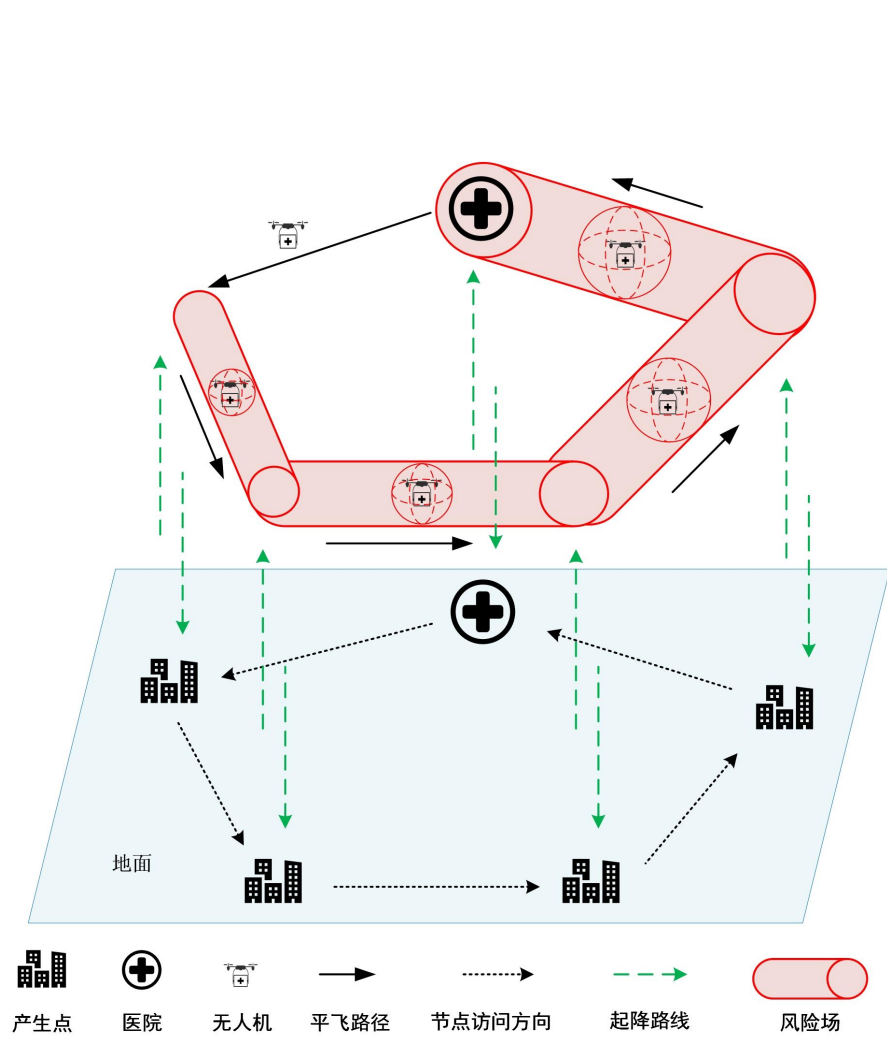
$$R = \max \left\{ \frac{N_x}{2}, \frac{N_y}{2}, \frac{N_z}{2} \right\}$$



无人机运行风险场

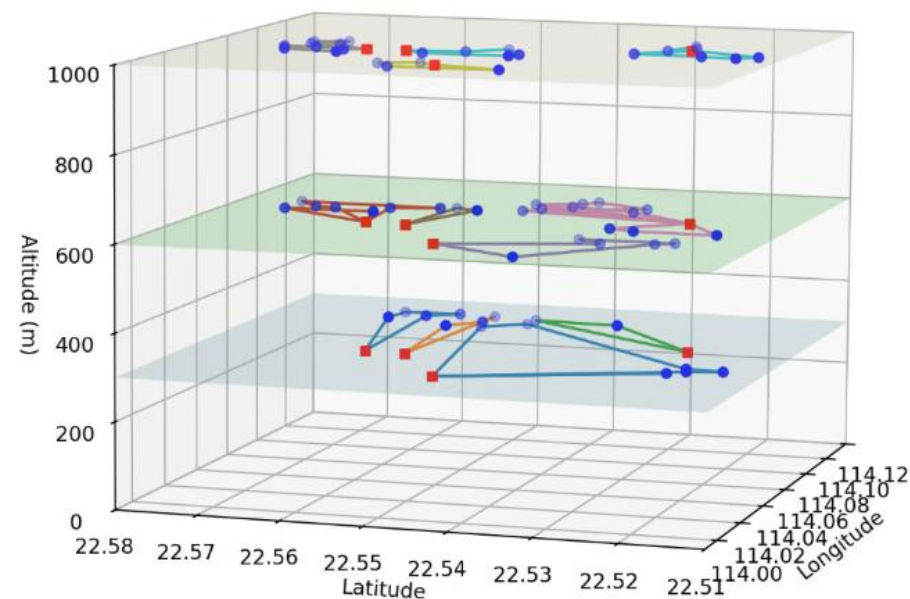
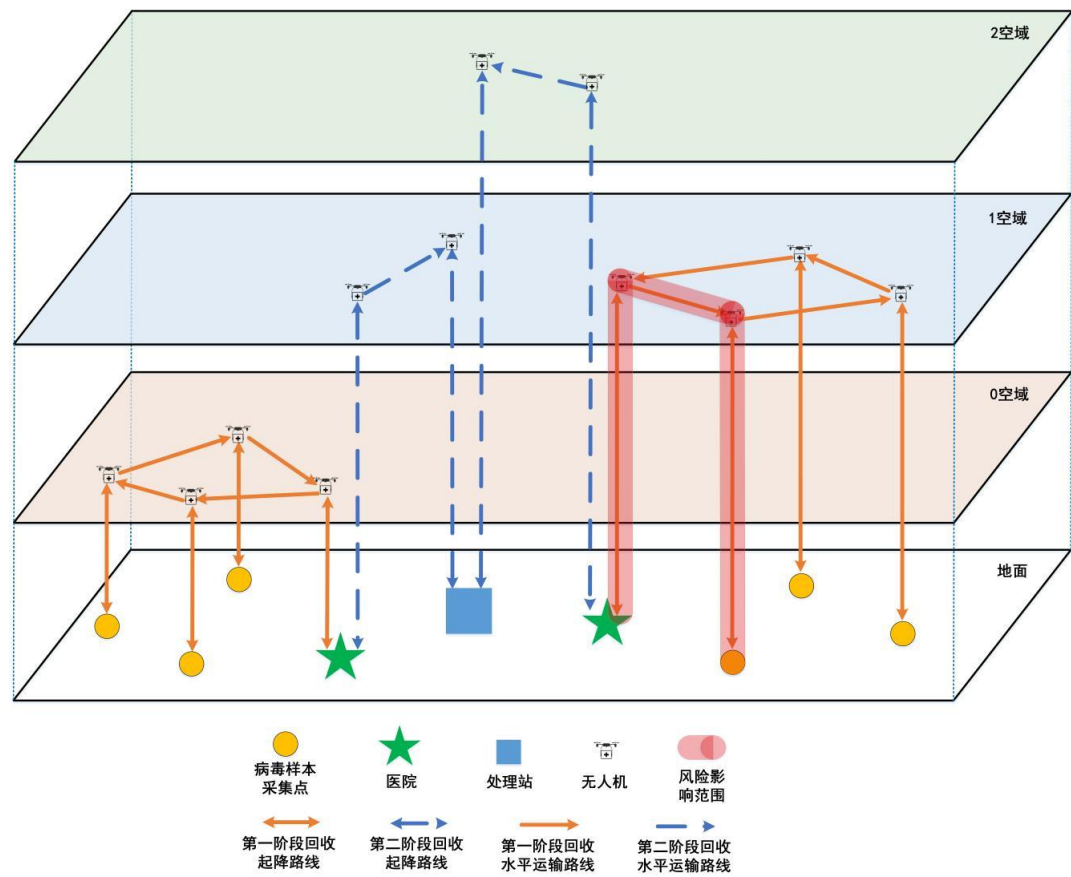


无人机病毒样本运输系统设计

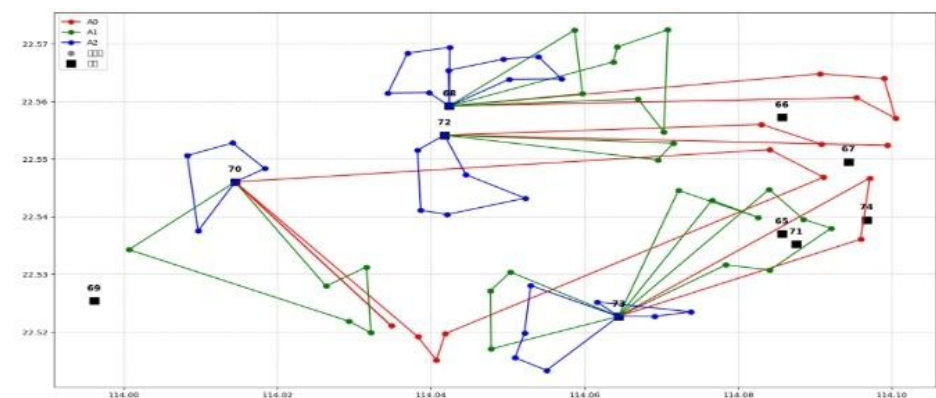


无人机病毒样本回收系统设计

无人机病毒样本回收系统



80节点分3个空域路径优化结果三维效果展示



基于风险场模型的安全评估方法，可全域刻画风险影响范围；
在多层级空域的医疗配送、巡检等场景中落地应用实验，安全性更高、冲突概率更低。

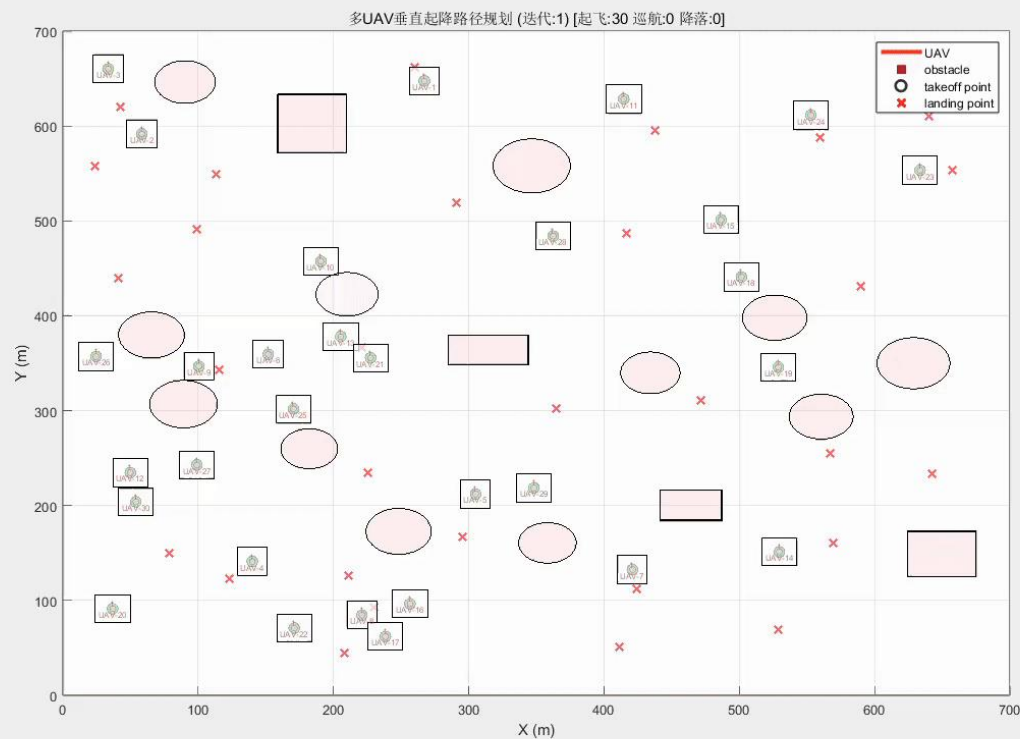
03 低空运输行业监管

3-1 低空无人机航迹规划

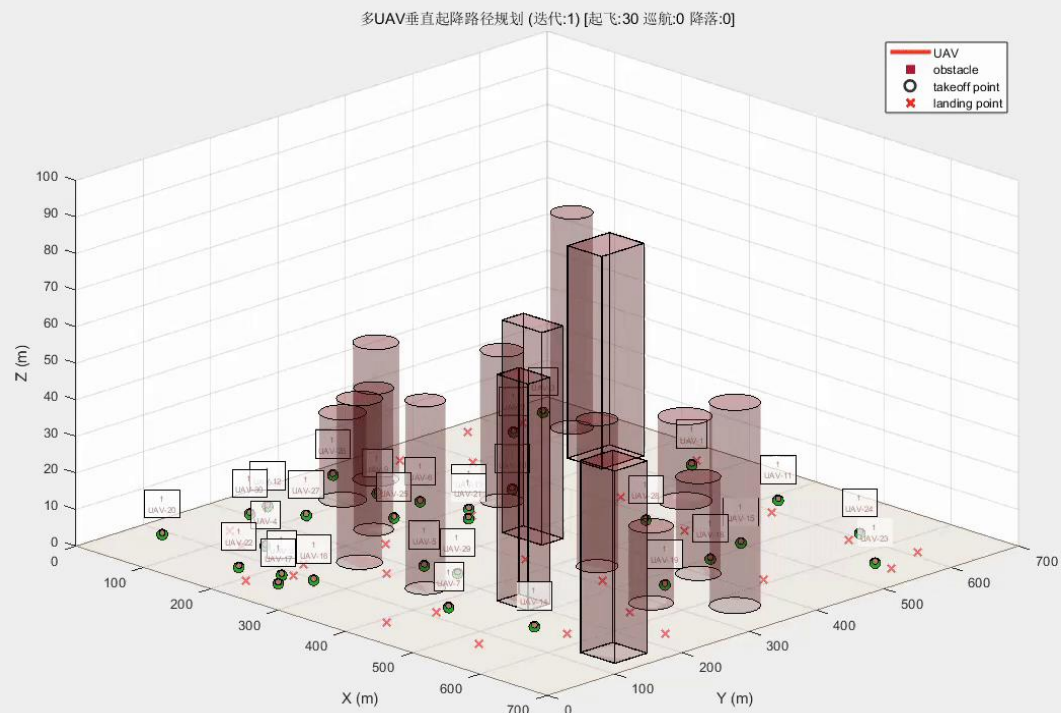
四类空域设置方式对比

空域类型	管道空域	走廊空域	层级空域	自由空域
基本构型	立体网状结构	分层走廊通道	功能分层区域	无结构
空域容量	小	中等	较大	最大
安全性	高	中等	较低	最低
工程实用性	易	较易	中等	难

低空管道式航迹规划仿真



DAPF算法航迹规划二维展示



DAPF算法航迹规划三维展示

动态人工势场（DAPF）算法，在城市复杂场景、多无人机协同飞行场景下，可规避局部极小值问题，具备更优飞行效率与目标到达成功率。

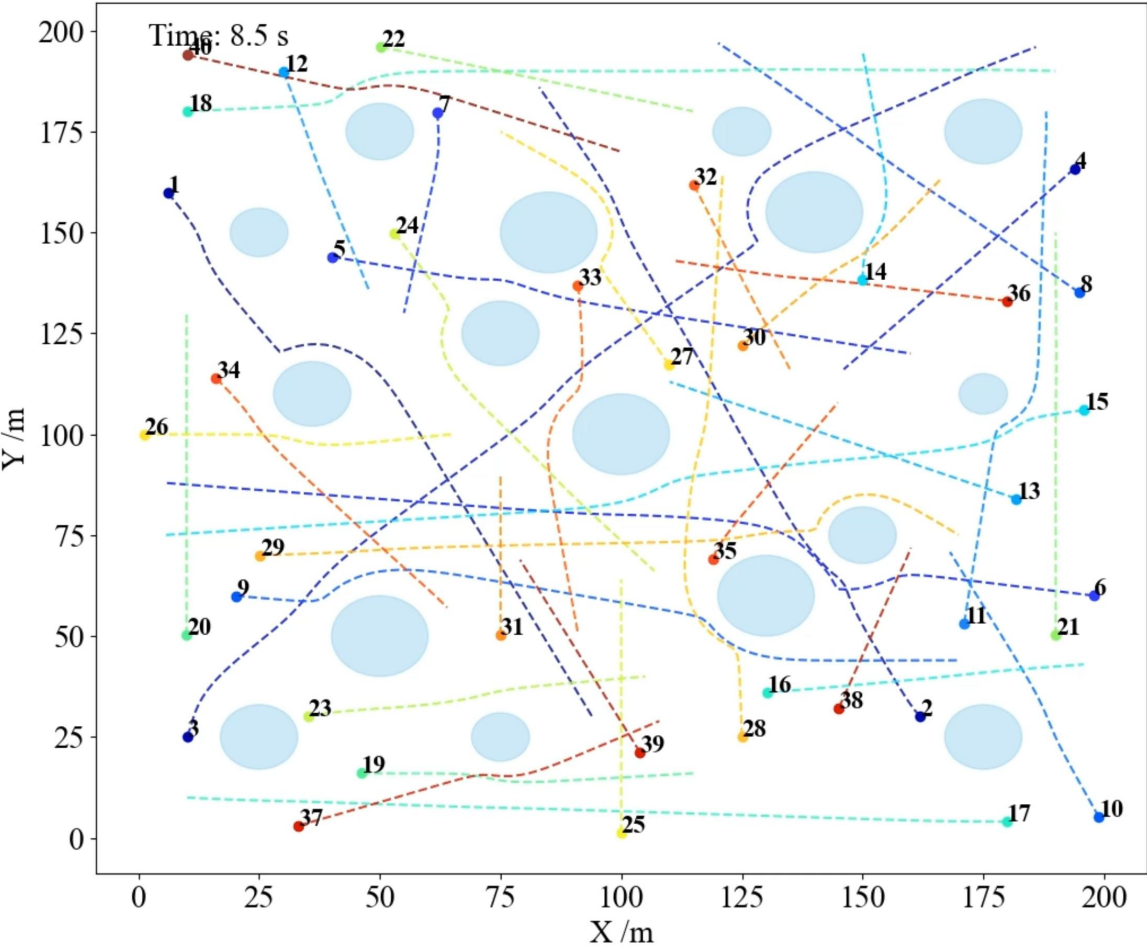
3-2 高密度低空航线冲突消解

无人机冲突消解策略对比

消解方法	消解机制	控制参数	实时性	鲁棒性	适用规模
几何引导	分布式	速度、航向、高度	强	强	小
人工势能场	分布式	速度、航向、高度	强	差	中等
数学规划	集中式	速度	差	差	小
启发式算法	集中式	速度	中等	中等	大规模
强化学习	集中式	速度	强	强	大规模

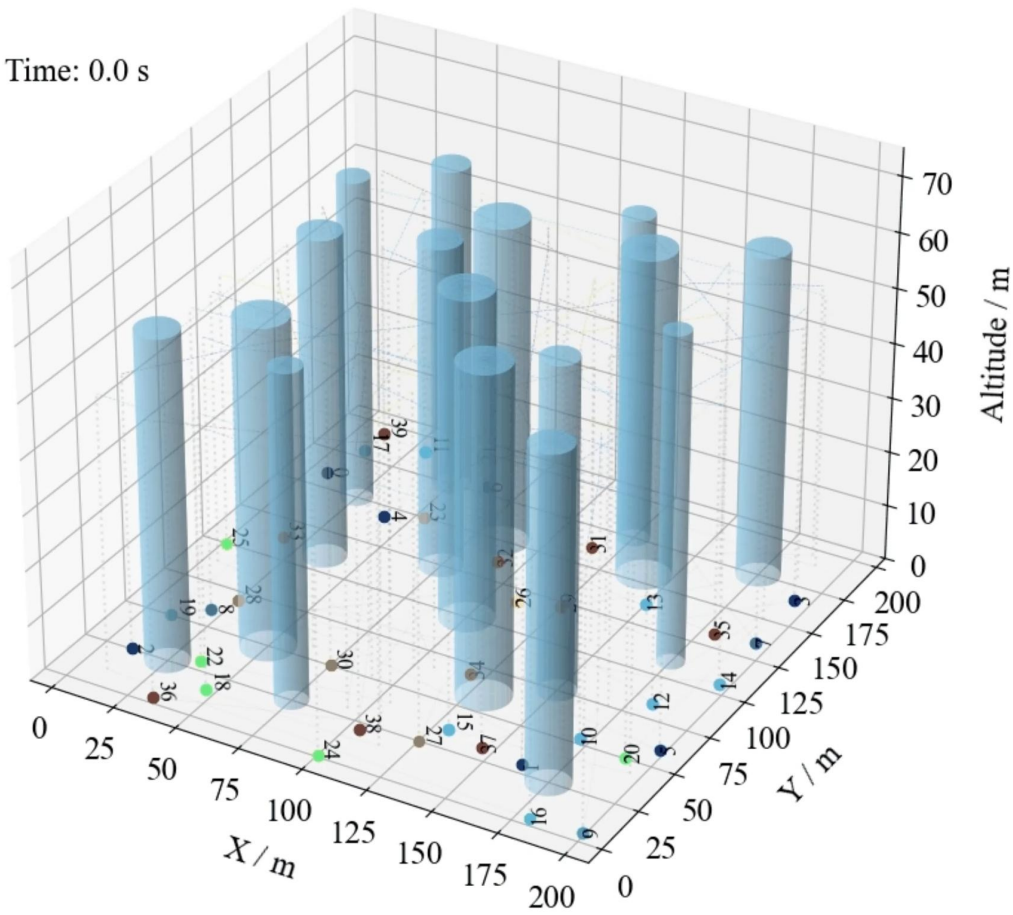
40架无人机航线计划调度

40-UAVs-2D
Cruise Phase



多航线冲突的时间计划消解策略

40-UAVs-3D
Takeoff→Cruise→Land



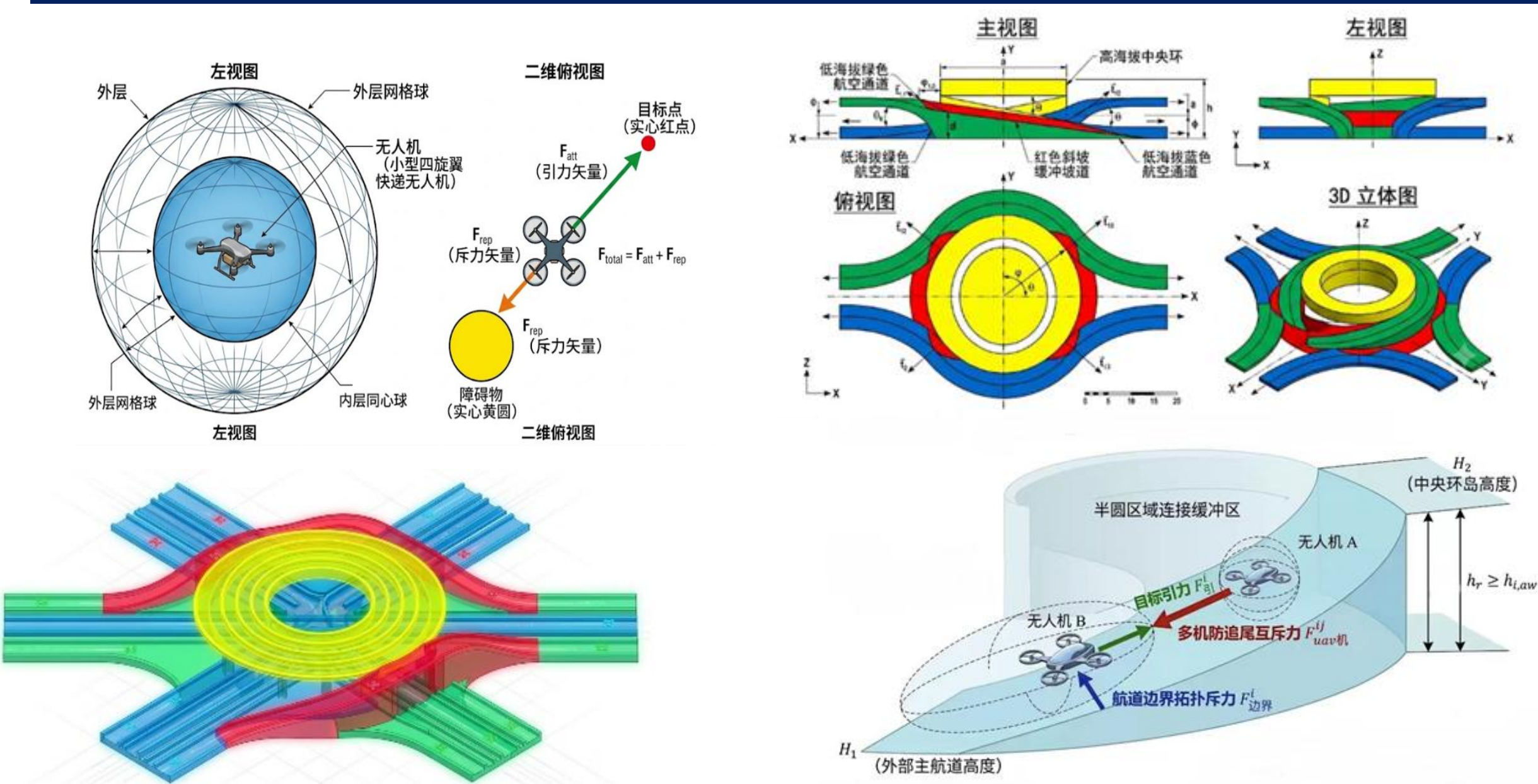
冲突计划消解策略三维展示

3-3 空中交通管理与运行控制

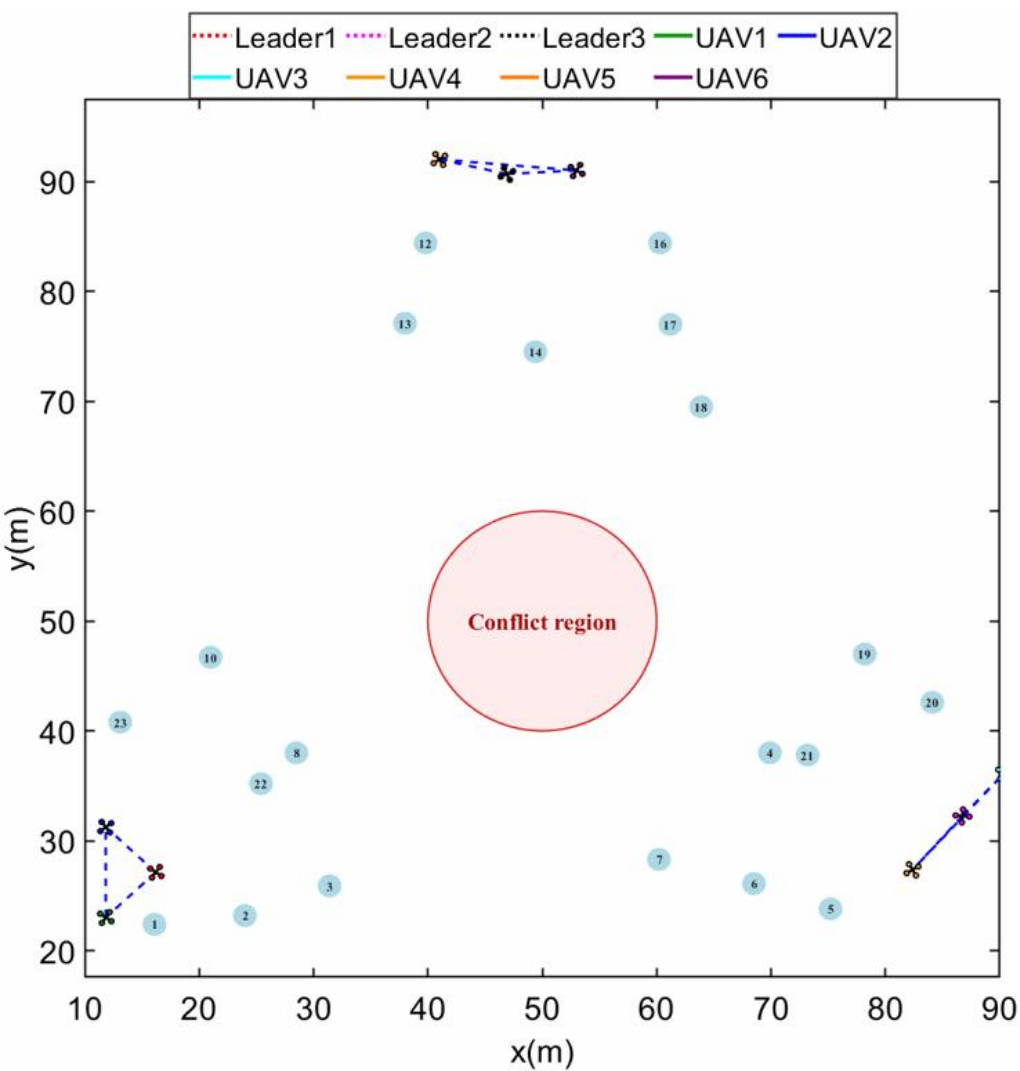
空中交通流量调控策略对比

调控策略	实施层级	交通流模型	网络规模	工程实用性
地面等待	节点级	轨迹模型	中等	易
空中等待	航路级	轨迹模型	中等	中等
航路变更	航路级	轨迹模型	中等	难
航速调整	航路级	轨迹/分区模型	中等	中等
关键航路限速	网络级	流量模型	大规模	易

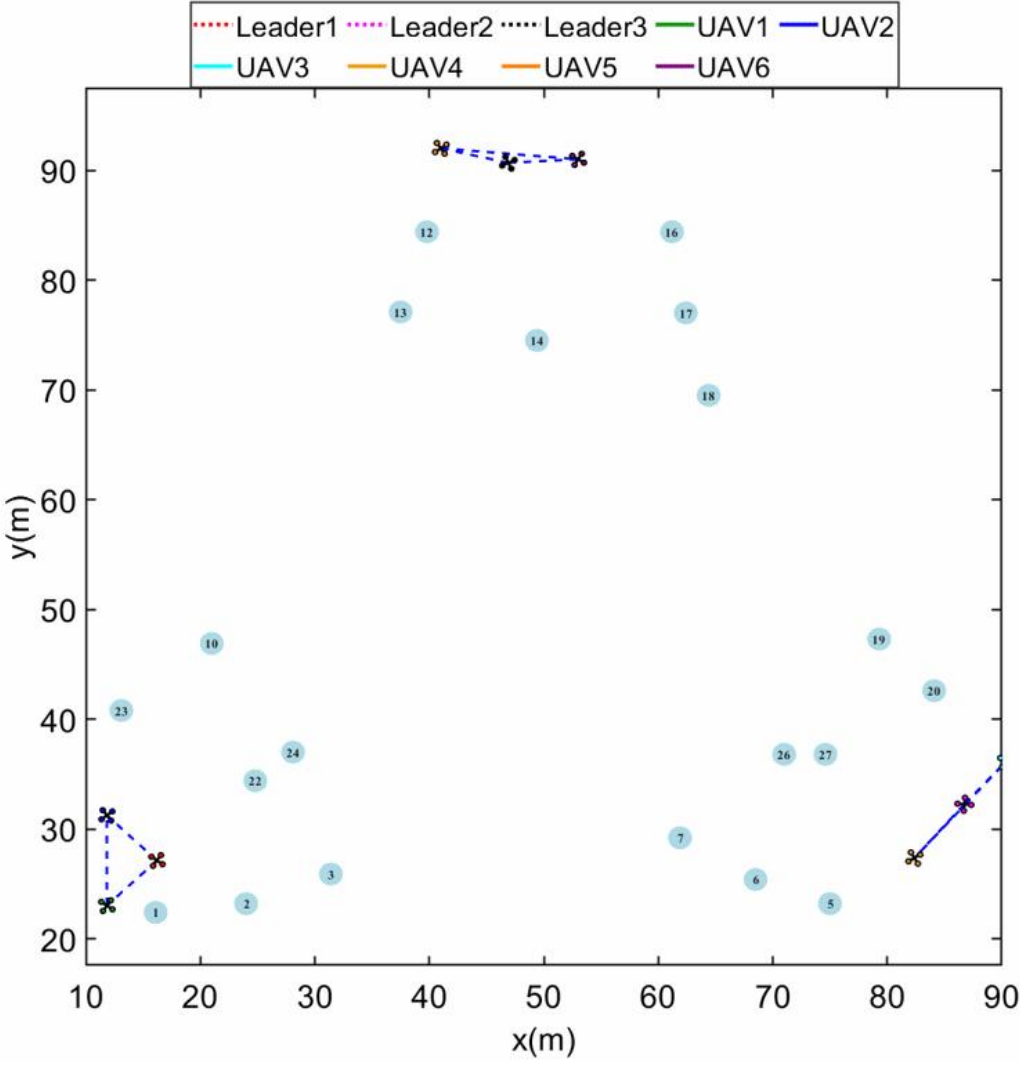
空中航线冲突点立交设计



多航线立交设计与编队有序通行



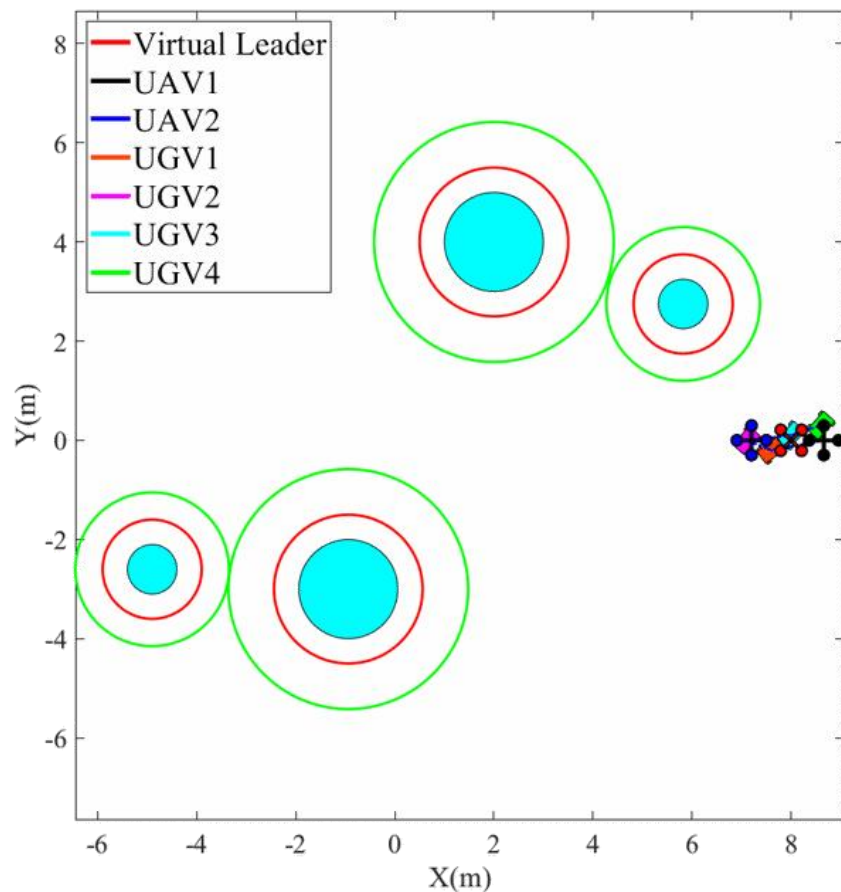
多无人机环形立交+编队通行策略



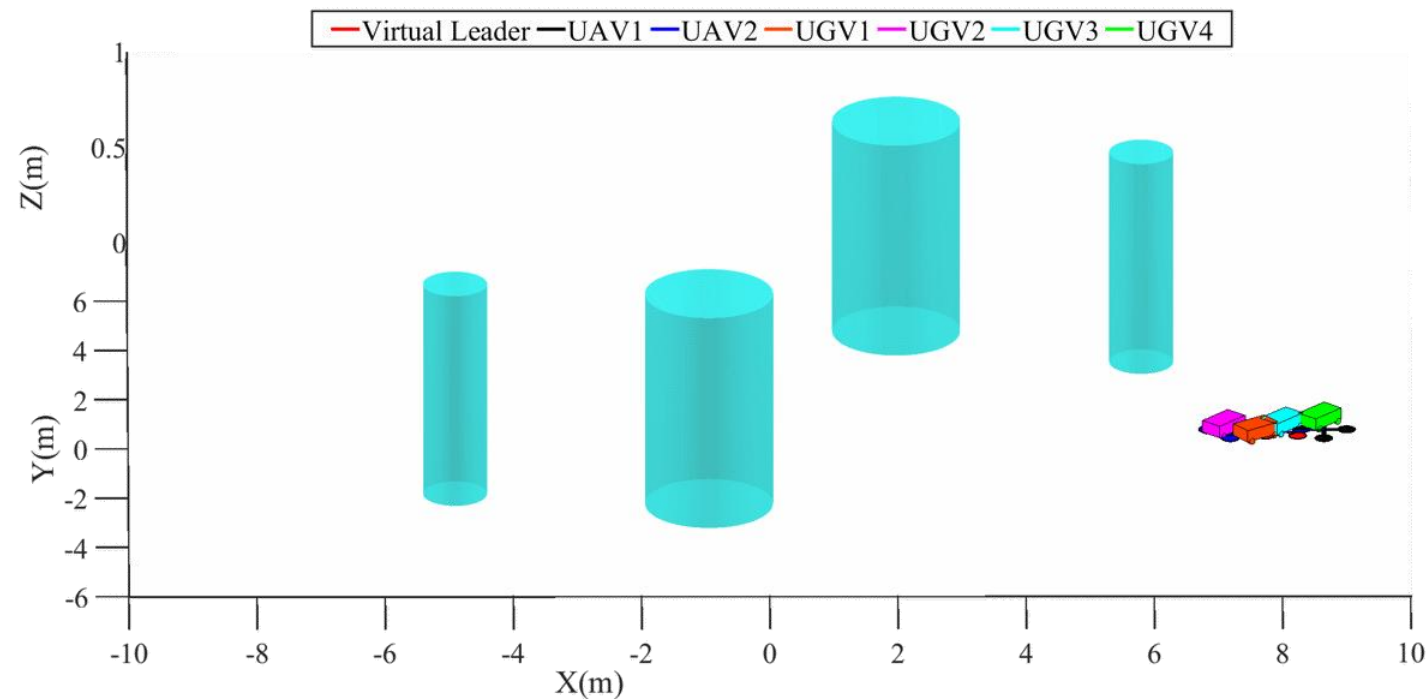
多无人机绕行+编队通行策略

多车-多机协同避障控制

4 UGVs-3 UAVs-2D
Obstacle Avoidance



4 UGVs-3 UAVs-3D
Takeoff→Cruise→Land



无人车与无人机空地协同控制

3-4 低空航路网络交通仿真

低空交通仿真平台对比

平台/软件	商用/开源	仿真特点	交通流功能	相关文献与应用
Gazebo	开源	单机/多机微观物理仿真；高扩展性（可虚实融合）。	不具备	运动路径仿真 ^[53]
AirSim	开源	侧重微观物理仿真；尤其是视觉算法。	不具备	路径规划 ^[54]
FlightGear	开源	高精度空气动力学模型。	不具备	目标追踪 ^[55]
MATLAB / Simulink	商用	数值仿真为主，侧重于微观动力学仿真；高扩展性。	可支持自定义接入	避障与路径规划 ^[56]
BlueSky	开源	2D显示；纯虚拟仿真；空中交通流与管理仿真。	宏观交通流仿真	受限空域资源分析 ^[51]
RflyUT-Sim	半开源	含微观动力学模型、通讯网络等模块，依赖其他软件。	提供交通流接口	高保真多无人机配送 ^[57]
XR-AltSim	开源	虚实融合物理仿真，多模式物流	具备交通流仿真	DTUAV: a novel cloud-based digital twin system for unmanned aerial vehicles

多模式低空运输系统态势总览



全空间无人载具运行仿真



04 低空物流人才培养

低空物流专业人才培养方案

- 1、人才需求分析与论证：大湾区、未来三到五年、代表性企业需求
- 2、培养方案规范与前瞻：类似《工程教育论证标准》、升本定位
- 3、专业课程基础与特色：全校现有相关特色课程、跨专业共建课程
- 4、实验实训体系与条件：软硬结合、现有体系迭代更新、稳步推进

明趋势、跨学科、重规划、建体系！

工程教育认证标准（2024版）

- **适用范围：**

- 本文件规定了工程教育认证的通用标准和各专业类补充标准。
- 本文件适用于以培养工程师为目标的普通高等学校全日制本科专业工程教育认证。

- **培养目标：**

- 体现对学生在毕业后5年左右预期达到的职业胜任力的总体描述。

- **毕业要求（11条）：**

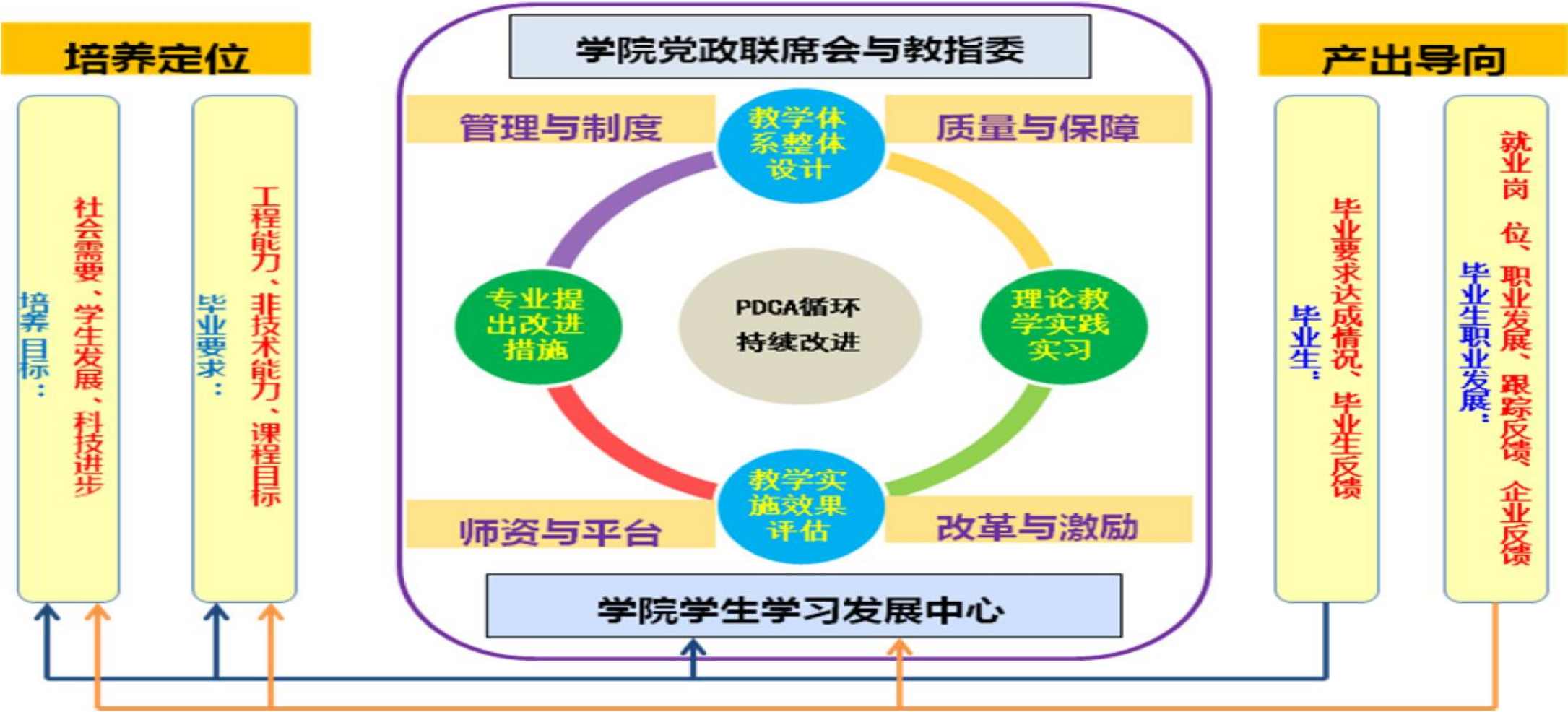
- 对学生毕业时应该具备的知识、能力和素养的具体描述。
- 毕业要求应符合培养目标定位和自身特色，支撑培养目标的达成。

- **课程体系：**

- 课程设置和教学实施应体现正确的价值导向，体现前沿技术的发展和应用，支持毕业要求的达成，课程体系制定与修订应有企业或行业专家参与。

学院教学质量保障体系

- 1、树立学生中心理念，全面统领教学教育各项工作；
- 2、坚持产出导向思想，贯彻落实工程教育认证理念；
- 3、强化主体责任意识，夯实院级教学质量保障体系；
- 4、突出教育改革创新，产教融通驱动教学工作创新。



敬请批评指正！

多模式运输拓展低空物流内涵

智慧化监管保障低空行业发展

交叉型专业深化低空人才培养