

# 面向草原生态修复的多无人机协同路径规划与面积分配方法研究

## 本科毕业论文答辩

王贤义

兰州大学信息科学与工程学院

2025 年 5 月 17 日



# 研究背景与意义

- 草原生态系统的重要性
  - 占全球陆地总面积 26% 至 40%
  - 防风固沙、涵养水源、调节气候、维持生物多样性
- 草原退化问题
  - 植被覆盖率下降、土壤沙化、水土流失加剧
  - 人类活动与气候变化的双重影响
- 传统修复方法的局限性
  - 人工植被恢复、机械作业效率低
  - 大范围复杂地形下施工困难、成本高
- 无人机技术带来的新机遇
  - 机动性强、操作远程、成本低
  - 多无人机协同作业模式展现良好前景

# 国内外研究现状与研究内容

## 无人机生态监测与修复应用

- 国际：无人机在三维地图绘制和环境监测的应用
- 国内：播种、喷洒和生态监测等应用场景
- 路径规划方法：传统 TSP/OP 问题建模、智能优化算法
- 局限性：静态环境假设、单机能力限制、缺乏能量约束

## 主要研究内容

- 建立多无人机协同草原修复面积最大化数学模型
- 开发基于深度强化学习的路径规划与面积分配方法
- 设计多无人机协同调度架构与决策执行流程
- 进行仿真实验验证与性能对比分析
- 技术思路：结合 Transformer 编码器与指针网络解码器，Actor-Critic 方法训练

# 草原修复问题建模

- 将草原建模为无向图

$$G = (V, E)$$

- $V = \{v_0, v_1, \dots, v_N\}$  表示待修复区域
- $v_0$  为地面信息融合中心
- 每个区域具有位置、退化度、面积等属性

- 无人机特性

- 初始能量:  $E_{max}$
- 携带草种重量:  $Q$
- 退化程度范围:  $[0.3, 0.8]$

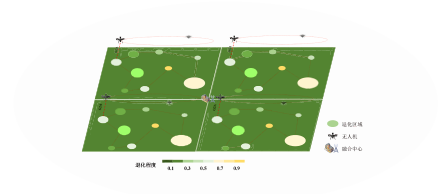


图 1: 多无人机协同草原退化区域示意图

# 无人机能量消耗模型

无人机在飞行过程中功率消耗：

$$P(\bar{q}_{ij}) = (M + \bar{q}_{ij})^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{g^3}{2\rho\zeta h}}$$

三种能量消耗：

$$E_f = \sum_{i=0}^N \sum_{j \neq i}^N e_{ij}^f d_{ij} x_{ij} \quad (\text{飞行能耗})$$

$$E_s = \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N \sigma_i e_i x_{ij} \quad (\text{播种能耗})$$

- $M = W + m$ ：无人机自重
- $\bar{q}_{ij}$ ：当前草种重量
- $\sigma_i$ ：修复的单位圆数量
- $x_{ij}$ ：路径选择变量
- $e_i = \eta q_i$ ：单位面积播种能耗
- $q_i = (1 + l_i)\gamma$ ：单位面积草种重量
- $e_{ap}$ ：信息采集能耗系数

$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N$

# 优化目标与约束条件

## 优化目标：加权修复面积最大化

$$\max_{x_{ij}, \sigma_i} \sum_{i=1}^N (l_i + 0.7) \cdot \sigma_i$$

## 核心约束条件：

- 能量约束：  $E_s + E_{ap} + E_f \leq E_{max}$
- 载荷约束：草种重量平衡与不超限
- 路径约束：每个区域最多访问一次
- 面积约束：  $1 \leq \sigma_i \leq c_i$

## 马尔可夫决策过程建模：

- 状态  $s(< i)$ ：部分修复解
- 动作  $\pi_i = s(i)$ ：下一步修复决策
- 策略函数：  
 $p(\pi|s) = \prod_{i=1}^n p(s(i)|s(< i))$
- 奖励函数：

$$R(\pi|V) = \alpha_p * Pel + \alpha_r * \sum_{i=1}^n (l_i + 0.7)$$

## 模型特点：多变量组合优化问题、NP-hard 难度、非线性约束

# 深度神经网络模型构建

## 编码器-解码器架构：

- **编码器：**基于 Transformer 架构，提取静态环境特征和动态无人机状态特征
- **解码器：**指针网络自回归解码，动态构建修复方案

## 编码器数学表示：

$$h^{l=0} = h^{in} W^{in} \in \mathbb{R}^{n \times d_e}$$

$$h_{rc}^{l+1} = \text{BN}(\text{MHA}^{l+1}(h^l) + h^l)$$

## 多无人机协同框架：

$$P(\bar{q}_{ij}) = (M + \bar{q}_{ij})^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{g^3}{2\rho\zeta h}} \quad (\text{功率方程})$$

$$E_f = \sum_{i=0}^N \sum_{j \neq i}^N e_{ij}^f d_{ij} x_{ij} \quad (\text{飞行能耗})$$

$$E_s = \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N \sigma_i e_i x_{ij} \quad (\text{播种能耗})$$

$$E_{ap} = e_{ap} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij} \sigma_i \quad (\text{信息采集能耗})$$

# 多无人机协同调度算法

## 算法 1 多无人机协同调度算法

参数序列  $Parms$ , 无人机修复地图集合  $M_u$ , 无人机状态集合  $S_u$  无人机访问的节点序列  $O_p$ , 修复面积  $O_a$ , 剩余能量  $O_e$

$M_u^i \leftarrow$  初始化( $M_u$ ) 根据初始化方法 (如 K-means) 分配初始地图

$P_u^i \leftarrow$  初始化( $P_u$ ) 初始化无人机信号量以决定优先级  $M_u \neq \emptyset$

$E_u^{rel} \leftarrow$  路径规划( $M_u, P_u^{self}$ ) 第一次路径规划 上报中心( $S_u, M_u, E_u^{rel}$ ) 第一次上报中心

$M_u^{tmp} \leftarrow$  更新地图( $M_u^{global}, P_u^{self}$ ) 下发新地图( $M_u^{tmp}$ ) 下发新地图

$E_u^{r2} \leftarrow$  使用算法训练的模型进行第二次路径规划( $M_u^{tmp}, P_u^{self}$ ) 上报中心( $E_u^{r2}, Area_u^{r2}$ ) 第二次上报中心

$\sum_{u=1}^U Area_u^{r2} \geq \sum_{u=1}^U Area_u^{r1} M_u \leftarrow M_u^{tmp}$  选择修复面积更多的地图

$\sigma_u^{max\_p} \leftarrow$  决策修复面积( $E_u, M_u$ ) 信号量最优先的无人机决策修复面积 执行修复与采集( $\sigma_u^{max\_p}, C_{max\_p}, P_u^{max\_p}$ )

无人机执行修复和信息采集 从地图移除( $M_u, P_u^{max\_p}$ )  $P_u^{max\_p} \leftarrow$  飞往下一个待修复区( $P_u^{benefit}$ ) 无人机飞往下个最优待修复区

更新信号量( $P_u^{max\_p}$ ) 更新无人机信号量 返回起点( $P_u^0$ ) 无人机返回起点