

# 基于GIS规划模型的自然保护区无人机巡护覆盖问题研究

杨欣睿, 冯德鸿\*

三峡大学数理学院数学系, 湖北 宜昌

收稿日期: 2025年11月8日; 录用日期: 2025年12月1日; 发布日期: 2025年12月10日

## 摘要

国家级自然保护区在野外巡护工作中存在着一些需要解决的问题, 主要在巡护的基础设施和科技支撑环境不具备、以及高空卫星遥感监测与地面监测相结合的生态和资源监测方面, 应用低空无人机巡护存在着巡护站的经济建设和维护降低成本等问题, 其中的选址布局则是最关键的问题。文中首先建立了无人机巡护覆盖问题的通用数学整数规划模型, 然后以壶瓶山自然保护区为例, 应用水经注卫星影像图、地理坐标配准的矢量地图和栅格地图等采集了各功能分区之间的最大距离, 形成了距离邻接矩阵表, 选择以大疆林用无人机为例, 应用通用数学规划软件LINGO编程, 分低航程、中航程、远航程三种不同场景计算得到无人机巡护覆盖问题的初步解决方案, 再结合实际地形进行动态调整, 最终得到可灵活选择的可行方案, 实现了“少站点、广覆盖、快反应”的现代巡护新范式, 经验证方案科学可靠。

## 关键词

无人机巡护站, 地理信息系统, 0-1整数规划模型, 距离邻接矩阵表, 分枝定界算法

# Research on UAV Patrol Coverage in Nature Reserves Based on GIS Planning Model

Xinrui Yang, Dehong Feng\*

Department of Mathematics, School of Mathematics and Physics, China Three Gorges University, Yichang Hubei

Received: November 8, 2025; accepted: December 1, 2025; published: December 10, 2025

\*通讯作者。

## Abstract

There are some problems that need to be solved in the field patrol work of national nature reserves, mainly in the lack of infrastructure and technological support environment for patrol, as well as the combination of high-altitude satellite remote sensing monitoring and ground monitoring for ecological and resource monitoring. The application of low altitude unmanned aerial vehicles for patrol has problems such as the economic construction and maintenance cost reduction of patrol stations, among which the site selection and layout are the most critical issues. The article first establishes a general mathematical integer programming model for the problem of unmanned aerial vehicle (UAV) patrol coverage. Then, taking the Hupingshan Nature Reserve as an example, the maximum distance between each functional zone is collected using satellite images of water injection, vector maps registered with geographic coordinates, and raster maps, forming a distance adjacency matrix table. Take the DJI forestry drone as an example, the general mathematical programming software LINGO is used to program and calculate the preliminary solution to the UAV patrol coverage problem in three different scenarios: low range, medium range, and long range. Combined with the actual terrain, a feasible solution that can be flexibly selected is finally obtained, realizing a new paradigm of modern patrol with “few stations, wide coverage, and fast response”. After verification, the solution is scientifically reliable.

## Keywords

**Drone Patrol Station, Geographic Information System, 0-1 Integer Programming Model, Distance Adjacency Matrix Table, Branch and Bound Algorithm**

---

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

国家级自然保护区的巡护工作是生态环境保护的第一道防线，目前存在如下诸多需要解决的问题：

- (1) 巡护员队伍结构不合理，专业人才短缺：巡护人员普遍呈现“老龄化”趋势，经验丰富的巡护员因年龄增长逐渐退出野外一线，较高学历的年轻人才流失率高，尤其缺乏生物多样性科研方面的专业人才。
- (2) 巡护员待遇保障不足，职业吸引力不强：野外工作的特殊性未能在工资或津贴中充分体现，还面临财政支持有限的问题。
- (3) 巡护员的工作条件艰苦且充满风险：他们不仅要面对野外环境、自然灾害、野生动物袭击等风险，而且还受到当地居民(盗猎、盗伐、盗采等)的威胁。
- (4) 巡护的基础设施和科技支撑不足：在高海拔与地形复杂环境下，无法修建道路、视频监控塔不足，未能形成全域监控的智能管理系统，这使得巡护工作往往依靠传统的人工徒步方式，管理难度大，方式落后，新技术应用不足，如智能围栏、视频监控、无人机监管等科技化、信息化的管理措施有待加强。
- (5) 培训体系不完善，专业能力有待提升：经调查发现，近一半的巡护员没有接受足够的职业培训，最缺乏的是野外急救措施和地理信息系统软件使用等专业技能。
- (6) 执法权缺失与社区关系紧张：自 2019 年森林公安正式转隶到公安部统一管理后，大多数自然保护区工作人员不再具备执法权，发现违法行为时需要协调和联动执法人员参与，距离远且参与意愿低，这使得保护区巡护员对非法活动威慑有限，也带来极大的人身安全风险；有些保护区刚建立初期未能处

理好与周边社区的关系, 日积月累矛盾加深, 当地居民擅自盗采、盗伐或放牧, 成为一种普遍的侵扰。

(7) 保护区管理局的管理体制存在缺陷: 如有些自然保护区与风景区、森林公园、地质公园、湿地公园等交叉重叠, 导致管理要求和边界范围模糊不清; 有些自然保护区还存在历史遗留问题, 如设立前已存在的小型水电工程、游览观光设施和原居民的种植养殖产业等, 产生生态环境保护矛盾。

(8) 生物多样性保护与科研监测不足: 有些保护区在生物多样性保护方面存在不足, 部分国家重点需要保护的野生动植物未能有效保护; 科研监测能力有待提升, 需要加强生物多样性基础理论研究、建立生态系统、植被和珍稀濒危物种分布数据库, 以及建立卫星遥感监测和地面监测相结合的生态和资源监测系统。

本文的研究侧重点在“巡护的基础设施和科技支撑不足”、“巡护的工作条件艰苦且充满风险”和“遥感监测和地面监测相结合的生态和资源监测”等方面, 即应用无人机低空巡护等科技手段, 提升巡护科技化与信息化管理水平。

## 2. 整数规划模型建模

### 2.1. 问题描述

某自然保护区有若干个巡护分区, 保护区整体内必须确定在哪些位置建设无人机巡护站, 以确保至少有一个巡护站在每个巡护分区的飞行(航程)范围内, 希望建设的无人机巡护站数量最少, 尽可能方便维护, 试建立数学规划模型, 求解自然保护区整体内应当修建多少无人机巡护站和巡护站所在的坐标位置。

### 2.2. 整数规划模型建模

数学整数规划建模[1]

定义  $x_i$  为 0-1 变量,  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $x_i = 1$  表示在分区域  $i$  建立无人机巡护站,  $x_i = 0$  表示不在分区域  $i$  建立巡护站。目标函数即最小化建立无人机巡护站的数量描述为:  $\min \sum_{i=1}^n x_i$ ; 定义  $d_{ij}$  为分区  $i$  与分区  $j$  之间的最大距离,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ , 可以得到最大距离邻接矩阵  $D = (d_{ij})_{n \times n}$ , 设无人机航程为  $L$  公里, 再定义一个覆盖关系矩阵  $A = (A_{ij})_{n \times n}$  如下

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq L \\ 0, & d_{ij} > L \end{cases}$$

这里  $A_{ij}$  是巡护分区  $i$  与  $j$  之间最大距离  $d_{ij}$  和航程  $L$  之间覆盖关系的数学表达, 用来确保模型仅能选择覆盖目标区域的站点, 所以对于每个区域  $j$ , 需满足约束:  $\sum_{i=1}^n A_{ij} X_i \geq 1, j = 1, 2, \dots, n$ , 该约束确保每个分区至少被一个在航程范围内的巡护站覆盖。

0-1 整数规划模型如下[1] [2]

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n x_i \\ \text{s.t. } & \sum_{i=1}^n A_{ij} X_i \geq 1, j = 1, 2, \dots, n \\ & X_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

### 2.3. 整数规划模型计算方法

上述模型为 0-1 整数线性规划模型, 通用计算方法有分枝定界算法、割平面法以及隐枚举法等, 考虑

到自然保护区无人机巡护覆盖建站的实际问题，巡护站数量不太多，适宜采用分枝定界算法或隐枚举法。

下面以湖南省石门县的壶瓶山自然保护区无人机巡护站的建设为研究案例进行说明。

### 3. 壶瓶山自然保护区案例分析与解决方案

#### 3.1. 壶瓶山自然保护区基本情况

湖南壶瓶山国家级自然保护区位于湖南省石门县境内，距石门县城 110 km，北望长江三峡，南接国家森林公园张家界。壶瓶山属武陵山脉北支的太青山系，地处湘西北和鄂西南鹤峰、五峰交界地带，主峰海拔 2098.7 m，为湖南第一高峰，被称为“湖南屋脊”。由于壶瓶山国家级自然保护区未受到第四季冰川的袭击，因而保存着良好的生态环境和大量珍贵的孑遗植物及其群落，被誉为“华中地区弥足珍贵的物种基因库”。2200 多种高等植物中，国家级保护的有珙桐、水青树、连香树等 47 种，272 种野生动物中，国家级保护的有华南虎、金钱豹、黑麂、娃娃鱼、苏门羚等 41 种。保护区的卫星影像图与七大功能分区情况，分别见图 1 和见图 2 所示[3] [4]。



Figure 1. Satellite image of Hupingshan Nature Reserve [3]  
图 1. 壶瓶山自然保护区卫星影像图[3]

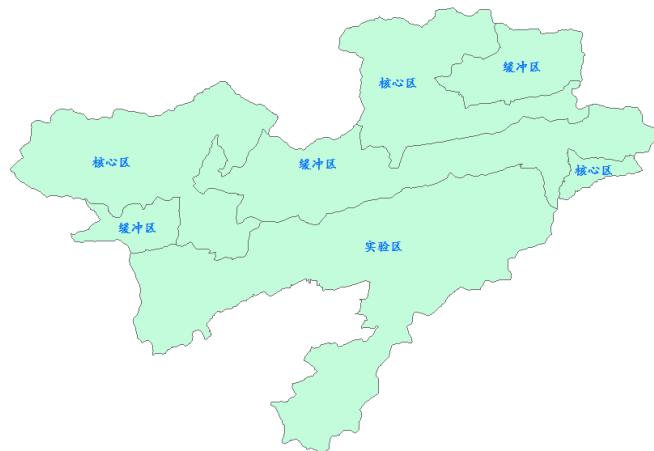


Figure 2. Functional zoning map of Hupingshan Nature Reserve [4]  
图 2. 壶瓶山自然保护区功能分区图[4]

#### 3.2. 七大功能分区的距离与村落位置数据采集

国家级自然保护区的分区  $i$  与分区  $j$  的之间的最大距离  $d_{ij}$  计算标准：(1) 若是平面影像图或矢量图，

首先经过 ArcGIS 进行地理配准, 具有 WGS-84 坐标系下的坐标信息, 然后寻找分区  $i$  与分区  $j$  距离最长的两点, 最后用 ArcGIS 距离测量功能得到两点之间的最大距离; (2) 若是高低起伏的立体影像图, 则在 WGS-84 坐标系下具有坐标信息的数字高程模型(DEM)中, 依据坡向坡度起伏的曲面走势来测量分区  $i$  与分区  $j$  距离最长的两点距离。

壶瓶山自然保护区现有地图大多是平面影像图与平面矢量图, 在水经注卫星影像图中用距离测量工具、栅格地图测量方法[5]、矢量地图测量方法[6] (依据地理配准的矢量地图, 通过分析 7 个巡护区域的多边形边界, 精确计算区域间的最长路径)和数据处理方法(测量得到的距离数据进行标准化处理, 统一距离单位, 剔除异常值), 最后得到 7 个巡护区域相互之间的实际最大距离, 形成距离邻接矩阵表[1], 详见表 1 所示, 表 2 所示为林业用无人机巡护功能航程的基本参数表, 以大疆无人机为例[7]。

**Table 1.** Distance adjacency matrix table for seven major functional zones (Units: km)

**表 1.** 七大功能分区距离邻接矩阵表(单位: km)

距离	分区 1	分区 2	分区 3	分区 4	分区 5	分区 6	分区 7
分区 1	0	25.29	31.73	27.54	9.21	21.45	39.80
分区 2	25.29	0	7.16	12.36	30.25	21.26	18.20
分区 3	31.73	7.16	0	19.06	31.54	28.35	10.88
分区 4	27.54	12.36	19.06	0	35.21	16.32	26.66
分区 5	9.21	30.25	31.54	35.21	0	27.42	35.44
分区 6	21.45	21.26	28.35	16.32	27.42	0	32.06
分区 7	39.80	18.20	10.88	26.66	35.44	32.06	0

**Table 2.** Basic parameters of range for forestry UAV patrol function (taking DJI UAV as an example)

**表 2.** 林业用无人机巡护功能航程基本参数表(以大疆无人机为例)

无人机型号	单向航程(km)	往返航程(km)	飞行时间(min)	最快飞行速度(m/s)
FlyCart 30	8	16	18	20
Mini 3	12	24	51	16
Air 3	16	32	46	21

### 3.3. 无人机巡护覆盖整数规划模型的计算与结果可行性分析

保护区分区域的数量  $n$  不大, 可应用求解 0-1 整数规划模型的分枝定界等算法[1], 在运筹学通用软件平台 LINGO [8][9] 或 MATLAB 上编程计算[10], 按照 3 种不同航程分类, 依次得到决策变量与目标值的计算结果, 见表 3 所示。

**Table 3.** Calculation results of integer programming model for unmanned aerial vehicle patrol coverage

**表 3.** 无人机巡护覆盖整数规划模型计算结果表

航程 L	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	目标值
航程 8 km	1	0	0	1	1	1	1	5
航程 12 km	0	0	0	1	0	1	0	2
航程 16 km	0	0	0	0	0	1	0	1

为了真正实现了“少站点、广覆盖、快反应”的现代巡护新范式, 需要对上述计算结果进行动态调整。

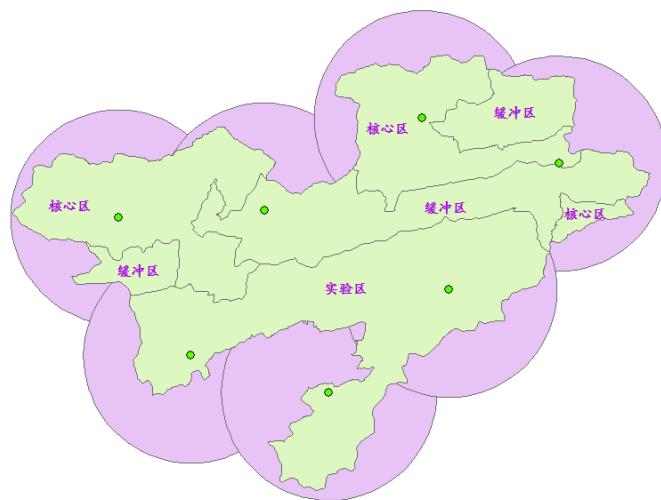
### 1. 航程 $L = 8 \text{ km}$ 场景

计算结果显示巡护区域 1、4、5、6、7 都需要至少各设 1 个站点。在实际布局中, 考虑到小区域邻域边缘覆盖, 利用区域 1 的站点对面积较小的区域 5 进行覆盖, 减少重复的建设。针对面积较大的巡护区域 4 和 6, 分别设置了 2 个与 3 个巡护站, 再结合运用大区域灵活选站策略, 然后考虑壶瓶山自然保护区村落的分布, 优先在靠近村落处建立巡护站, 以便于无人机后勤保养和充电。在优化巡护站点分布后, 区域 7 可以由区域 4 的站点完全覆盖, 见图 3 所示, WGS84 坐标系下航程 8 km 的选址坐标见表 4 所示。

**Table 4.** Site selection coordinates for a range of 8 km (WGS84 coordinate system)

**表 4.** 航程 8 km 的选址坐标(WGS84 坐标系)

序号	巡护站	经度	纬度
1	巡护站 1	110.56775808	30.01942813
2	巡护站 2	110.68012763	30.02438014
3	巡护站 3	110.80118824	30.08657868
4	巡护站 4	110.90696066	30.05625139
5	巡护站 5	110.62404156	29.92675245
6	巡护站 6	110.73023243	29.90218810
7	巡护站 7	110.82249284	29.97137904



**Figure 3.** Site selection plan for a range of 8 km

**图 3.** 航程 8 km 的选址方案

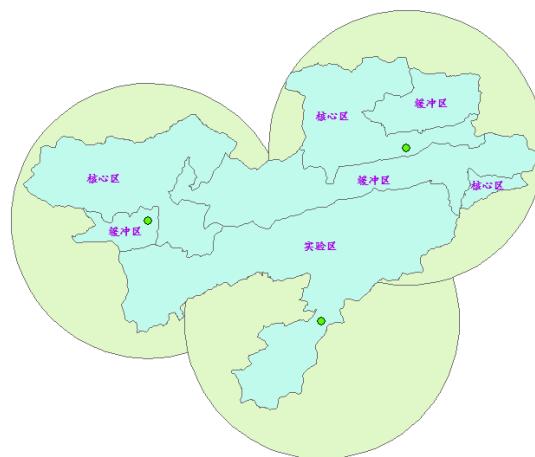
### 2. 航程 $L = 12 \text{ km}$ 场景

计算结果显示必须在区域 4 和 6 建站。实际布置时还存在更优解。考虑到覆盖效果和后勤保障, 可在区域 5 多建立的 1 个站点, 形成了在区域 4、5、6 各建了 1 个巡护站。最终方案通过调整航程, 仅用 3 个站点就实现了整个保护区覆盖, 并且所有站点都选在靠近村落的位置, 方便无人机充电和维护, 见图

4 所示, WGS84 坐标系下航程 12 km 的选址坐标见表 5 所示。

**Table 5.** Site selection coordinates for a range of 12 km (WGS84 coordinate system)  
**表 5.** 航程 12 km 的选址坐标(WGS84 坐标系)

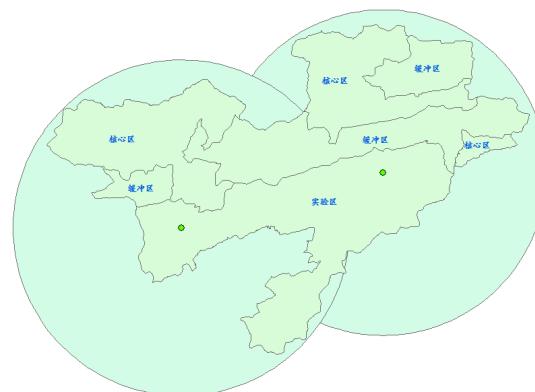
序号	巡护站编号	经度	纬度
1	巡护站 1	110.60479939	29.99265432
2	巡护站 2	110.76945864	29.90983726
3	巡护站 3	110.84923983	30.05342782



**Figure 4.** Site selection plan for a range of 12 km  
**图 4.** 航程 12 km 的选址方案

### 3. 航程 $L = 16$ 公里场景

计算结果表明只需要在区域 6 建站。事实上在区域 6 建立两个站点即可完成壶瓶山自然保护区的覆盖了, 也符合模型计算结果。选址时考虑到村落分布和地形特点, 通过将巡护站 1 的航程调整为 16.5 公里(原计划 16 公里)来完成覆盖, 巡护站 2 则保持 16 公里航程。该方案保证了整个保护区都能被覆盖, 同时两个站点都选在无人机后勤保障方便位置, 见图 5 所示, WGS84 坐标系下航程 16 km 的选址坐标见表 6 所示。



**Figure 5.** Site selection plan for a range of 16 km  
**图 5.** 航程 16 km 的选址方案

**Table 6.** Site selection coordinates for a range of 16 km (WGS84 coordinate system)**表 6. 航程 16 km 的选址坐标(WGS84 坐标系)**

序号	巡护站编号	经度	纬度
1	巡护站 1	110.62301695	29.94869292
2	巡护站 2	110.82796991	29.99814212

以上调整方案都结合了计算结果和实际需求, 满足了巡护效果的前提, 并重点考虑了无人机充电、维护等实际问题, 为壶瓶山自然保护区可行的无人机选址优化方案。动态调整的主要原则是: (1) 适当调整航程距离; (2) 灵活选择站点位置; (3) 优先在靠近居民点设站。

#### 4. 结论

研究结果表明: 经过优化调整后, 若选择无人机 8 km 航程时, 则最少 7 个站点即可实现全分域覆盖; 若选择无人机 12 km 航程时, 则最少 3 个站点即可完成全分域覆盖; 若选择无人机 16 km 航程时, 依靠“1 + 1”布局, 则最少 2 个站点即可完成全区域覆盖。这种巡护站布局不仅可以降低壶瓶山自然保护区无人机巡护站建设的经济成本和后续的维护成本, 而且以最有效的方式为壶瓶山自然保护区提供无盲区, 安全可靠的无人机巡护任务, 在“巡护的基础设施和科技支撑不足”、“巡护的工作条件艰苦且充满风险”和“遥感监测和地面监测相结合的生态和资源监测”等方面, 提升了巡护科技化与信息化管理水平

#### 参考文献

- [1] 徐家旺, 刘彬. 实用管理运筹学[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [2] 韩中庚. 数学建模方法及应用[M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [3] 湖南壶瓶山国家级自然保护区官方网站[EB/OL]. <http://hnmps.zrbhq.cn/>
- [4] 冯德鸿, 丁峰, 陈华. 基于 RS 与 GIS 的壶瓶山国家级自然保护区森林立地分类研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(24): 47-49.
- [5] 黄杏元, 马劲松. 地理信息系统概论[M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [6] 牟乃夏. ArcGIS10 地理信息系统教程[M]. 北京: 测绘出版社, 2012.
- [7] 大疆官网. 大疆行业应用产品和林业用户案例[EB/OL]. <https://enterprise.dji.com/cn>
- [8] 司守奎, 孙玺菁. LINGO 软件及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [9] 司守奎, 孙玺菁. 数学建模算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2024.
- [10] 向军, 李万春. MATLAB 程序设计与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023.