doi: 10.11720/wtyht.2026.1422
栾晓东, 邱佳怡, 马亚宇, 等. 基于最高点法的无人机航空时间域电磁仿地导航软件设计[J]. 物探与化探, 2026, 50(5): 963-972. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1422
Luan X D, Qiu J Y, Ma Y Y, et al. Design of terrain-following navigation software for the UAV-borne time-domain electromagnetic detection system based on the highest point method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(5): 963-972. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1422

基于最高点法的无人机航空时间域电磁仿地导航软件设计

栾晓东[1], 邱佳怡[2,3], 马亚宇[2], 邹留晗[2], 张宇锐[2], 李焰明[2], 杨忠嘉[4], 郭琦[1]
(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 成都信息工程大学 计算机学院, 四川 成都 610225; 3. 重庆邮电大学 人工智能学院, 重庆 400065; 4. 北京信息科技大学 信息与通信工程学院, 北京 102206)

摘 要: 软吊舱结构(以下统称"软连接载荷")无人机航空时间域电磁探测系统在进行地质探测过程中, 传统平飞和仿地飞行易引发姿态不稳、高度波动、数据噪声增大等问题。本文基于等高线的地形数据, 提出最高点法软链接载荷无人机仿地导航飞行算法。该算法引入载荷姿态升限与无人机升限约束, 在保证飞行安全的前提下, 以最少的导航点实现无人机仿地导航飞行, 从而有效降低飞行系统的波动。在此基础上, 开发了配套的仿地导航软件系统, 主要包括地理空间数据处理模块、航线规划模块和 Blender 三维集成模块, 可实现地形数据导入、飞行路径自动生成以及三维可视化展示等功能。经乌海甘德尔山试验区实地验证, 该算法可实现精准的地形贴合飞行, 增强探测信号质量与深部探测能力。本研究为复杂山区矿产勘查与地质灾害监测提供了新的技术支撑, 并拓展了无人机仿地导航在地球物理探测中的应用潜力。

关键词: 无人机; 仿地导航飞行; 软链接载荷; 最高点法; 航空时间域电磁探测
中图分类号: P631.1; TP18; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)05-0963-10

0 引言

时间域电磁探测系统通过向地下发射一次场的电磁脉冲信号并分析地下感应产生的二次场的变化, 来实现地下地质结构的探测[1]。基于无人机平台的航空时间域电磁探测系统[2]能够克服地形限制, 可在山区、沼泽等人力难以到达地区高效完成地下地质结构的探测[3], 在地质矿产、水工环调查等领域发挥着关键作用。为实现无人机航空时间域电磁探测系统[4]对深部地下目标的有效探测, 探测系统需要接收更多晚期道数据。然而, 二次场信号随高度升高急剧衰减, 致使晚期道信号微弱, 易受噪声干扰。降低飞行高度可减少信号衰减, 获取到更强的晚期道信号, 有利于压制噪声的干扰, 提升系统探测深度。但在山区探测飞行时, 传统平飞方式因需保证安全飞行高度, 致使在山脚或山谷处系统离地过高, 接收到的有效信号质量下降[5]。因此, 如何规划无人机航空探测系统的飞行路径对于获取高质量的原始探测数据至关重要。在此背景下, 仿地导航飞行技术应运而生, 该技术能使无人机依地形变换飞行, 降低无人机航空时间域电磁探测系统的离地高度, 提升信号强度, 进而实现对深部地质结构的有效探测。

国内外对无人机仿地飞行导航算法的研究已取得一定成果。美国在计算机视觉、深度学习和控制理论等方面处于领先, 将相关技术广泛应用于无人机军事和侦察任务, 开发出能在复杂城市环境自主导航的无人机系统[6-8]。欧洲则着重解决无人机在复杂环境中的导航与控制难题, 在城市和林业监测方

收稿日期: 2025-12-08; **修回日期**: 2026-05-11
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB3902604); 国家自然科学基金项目(42204145); 部省合作项目(2024ZRBSHZ138); 甘肃省自然资源厅科技创新项目(202405); 成都信息工程大学科研启动基金项目(376278)
第一作者: 栾晓东(1990-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事电磁法数据处理解释和正反演研究工作。Email: xiaodong0829@hotmail.com

面有所突破，如提出将无人机管理系统集成与机载机器视觉相结合的方法，以提升无人机对小型飞行物的识别和避障能力，增强飞行安全性[9]。此外，通过使用高分辨率遥感图像和机器学习算法，无人机能够准确识别森林覆盖、树种类型和植被健康状况等信息，使得无人机能够更好地完成林业资源管理、病虫害监测和森林火灾预警等任务[10-13]。在国内，众多大学和研究机构利用深度学习、图像处理等技术，在飞行控制方法和飞行控制系统方面展开深入研究，提出基于多速率卡尔曼滤波[14]、DEM 数据[15]，采用仿地飞行技术进行倾斜影像数据获取[16]，以及采用激光雷达[17] 等多种仿地飞行方法，从不同的方向切入优化不同应用场景下的飞行效果。

在使用无人机进行航空时间域电磁探测系统作业时，探测系统与无人机飞行平台之间采用软吊绳链接[18]，但在使用无人机雷达或视觉系统探测地形起伏时，仿地飞行需要实时调整飞行高度，这会导致无人机飞行高度频繁变动，从而引发整个探测系统振动并产生大量运动噪声。此外，若未充分考虑软吊舱姿态变化，急剧的升降会造成姿态偏移，导致数据分量失真、测量误差增大；同时，高度调整未兼顾飞机升限性能，在地形复杂、切割剧烈区域极易引发飞行安全事故。传统的等高线简化算法通过减少构成等高线的数据点来简化形状[19]，但生成的飞行路线通常升降起伏不稳定，对于软连接无人机来说，在升限以及系统姿态方面的约束无法得到满足。本文在利用等高线数据的基础上，提出了一种基于最高点法的软连接无人机航空时间域电磁探测系统仿地导航方法。该方法综合考虑无人机升限与系统姿态约束，实现仿地导航的生成与优化，并且基于该算法开发了可与三维建模软件联动的可视化系统，用于航线展示与飞行模拟。该方法可在山区有效降低离地高度，稳定获取高质量晚期道数据，提升对深部地质结构的探测能力，为复杂地形地质勘查和重大工程地质评价提供有效的方法技术[20-21]。

1 基于最高点的仿地导航生成方法

最高点法是指以航线地形剖面中的全局最高点作为初始安全基准的方法。基于最高点法的仿地导航方法则是从最高点出发，通过射线投射与双向迭代求解，通过预设安全抬升高度、升限角度和交点合并阈值参数，预先规划出仿地飞行路径，在保证飞行安全的前提下有效降低离地高度、抑制载荷姿态扰动与运动噪声。

本文采用的数字高程模型（DEM）和数字表面模型（DSM）均可通过公开数据或实际测量获取。基于最高点的仿地导航生成算法综合考虑载荷姿态升限和无人机升限约束。算法流程如图 1 所示，参数说明见表 1。

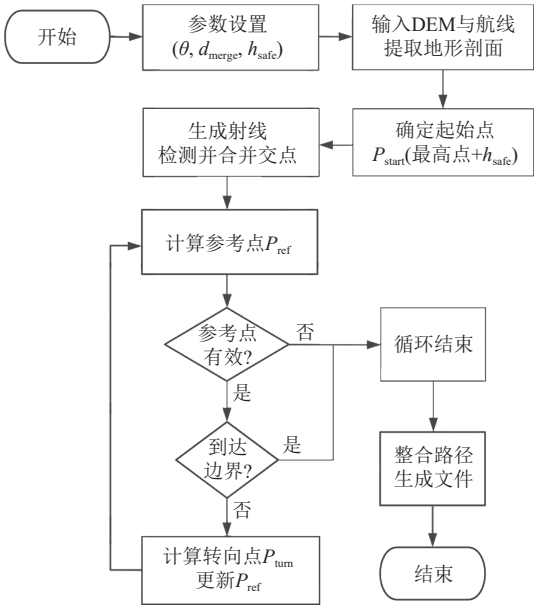


图 1 算法流程

Fig. 1 Overall flow chart of the algorithm

表 1 算法参数说明

Table 1 Algorithm Parameter Description

参数	说明	单位
θ	无人机爬升/下降升限角度	(°)
d_{merge}	距离合并阈值，融合邻近冗余交点	m
h_{safe}	无人机最小安全离地间隔，规避地形碰撞风险	m
P_{start}	全局安全基准点，双向路径迭代的起始位置	(m,m)
P_{ref}	路径迭代参考控制点	(m,m)
P_{turn}	航线方向切换关键转向节点	(m,m)

首先，沿航线起终点连线提取地形高程剖面，检索剖面全局最高点并叠加安全抬升高度（h_{safe}），以确定全局安全基准点 (P_{start})；其中h_{safe}为满足飞行高度与地面间距的设定参数，通常根据飞行安全规范、信号衰减高度范围等因素确定。然后，以P_{start}为顶点，依据设置的升限角θ向两侧投射射线，求解其与地形剖面的几何交点，并通过近距离合并阈值（d_{merge}）对邻近冗余交点进行合并以降低节点密度。在算法进入双向迭代阶段时，从P_{start}出发，向左右两侧迭代依次解算参考点 (P_{ref})；在满足空间边界条件（横坐标落于[0,L]区间）且参考点几何有效的前提下，进一步推算飞行路径转向点（P_{turn}），并更新参考点以维持循环，当触及边界或参考点失效时终止。最后，将全局安全基准点、参考点、有效转向点整

合, 并进一步检查点的飞行高度是否满足安全飞行高度, 输出满足运动学约束(由θ限定)且具备全程地形规避间隔(由h_{safe}保障)的安全路径。

1.1　安全抬升高度设置

算法中的安全抬升高度(h_{safe})用于保证飞行路径在地形之上, 保留必要的垂向安全间隔, 其取值应综合考虑地形起伏幅度、信号衰减、DEM 分辨率及风场扰动等因素。为防止无人机系统由于离地高度过高导致信号衰减过大, 安全抬升高度应通常设置在 20 m 以内。

1.2　升限角度设置

算法中无人机爬升/下降的倾斜角(升限角度θ)的取值, 取决于不同地形特征。高山峡谷等地形起伏剧烈区域, 需调大角度(20°~30°)以加快爬升/下降速度, 缩短路径长度; 丘陵平原等地形平缓区域, 调小角度(<10°)可提升路径平滑性, 降低无人机姿态调整频率。

1.3　近距离交点合并阈值设置

设置近距离交点合并阈值(d_{merge})的核心目的在于过滤地形剖面采样过程中由数字高程模型(DEM)像素级高程噪声(如单像素凸起)引发的伪交点, 同时规避采样间隔导致的相邻冗余交点对路径规划的干扰。合理的阈值取值可确保仅合并同一地形特征(如单个山峰)产生的冗余交点, 该阈值的设置既能剔除冗余信息, 又能保留地形关键特征, 保障仿地飞行路径规划中交点判定的准确性与合理性。

针对不同特征的地形数据, 阈值d_{merge}需差异化设定。d_{merge}的设置不易过大, 过大容易丢失地形的关键信息。算法无法捕捉到地形信息, 导致生成的路径无法贴合地形起伏。在试验过程中, 采用 90 m 精度的 DEM 数据文件, 设置θ=15°, h_{safe}=100 m, 将d_{merge}分别设置为 10 m 和 150 m, 最终同一航线由于阈值不同生成了不同的飞行路径(图 2)。图 2 中 A 点均为全局安全基准点, 即算法迭代起始点; 图 2a 中的 B、C 点为射线与山体剖面相交生成的交点, E 点为交点处理完成后生成的转向点, D 点为处理过程中的参考点; 图 2b 中的 B、C、D 及 F 点为射线与山体剖面相交生成的交点, G、I 点为转向点, E、H 点为参考点。由于d_{merge}的设置不同, 图 2b 中 B、C 点之间的距离达到了d_{merge}, 合并为了图 2a 的 B 点, 使得算法丢失了 B 点与 C 点间的地形信息。因此, 对于地形起伏平缓的区域, d_{merge}的设置可以略大, 对于地形起伏陡峭、变化较大的区域, d_{merge}的设置应尽量取小值。

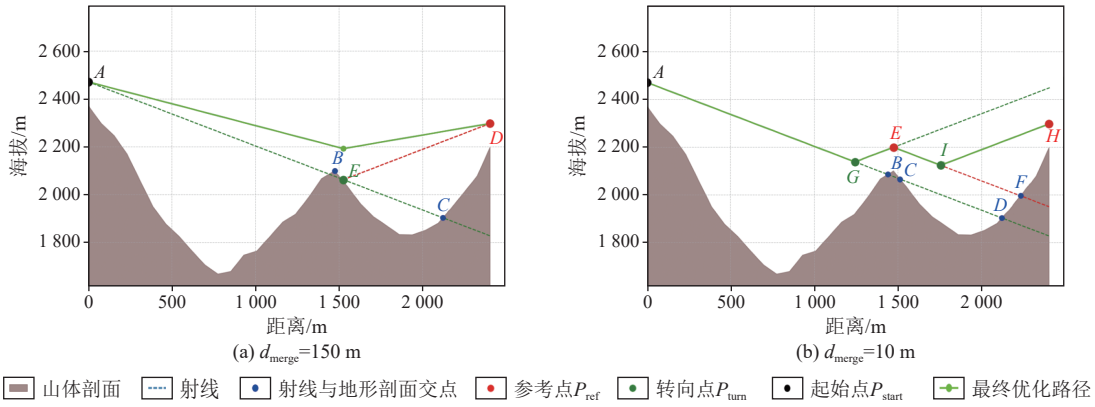


图 2　不同阈值生成路径对比

Fig. 2　Comparison of generated paths with different thresholds

1.4　路径转向点确定方式

以全局安全基准点P_{start}, 按预设的升限角度θ生成射线与地形剖面交点后, 需结合交点数量及地形形态的差异, 采用差异化处理方法确定后续路径转向点P_{turn}。具体规则如下:

1) 以右侧射线为例, 当射线与地形剖面交点个数为零(图 3a), 或仅有一个在山坡顶点的交点时, 射线延伸至剖面边界, 与剖面边界产生 2 个交点(图 3a 中 B、C 点), 确定边界交点作为参考点。

2)当射线与地形剖面图交点个数为 1 且交点不为某个山坡顶点时(图 3b 中 B 点), 此时为了防止飞行时撞击地面, 选取交点右侧的地形图最高点, 将这一点向上平移至安全抬升高度的距离, 平移后即可记为第一参考点(图 3b 中 D 点); 在第一参考点处同样做左、右 2 条射线, 第一参考点的左射线与起始点的右射线记为转向点(图 3b 中 E 点), 右侧射线继续按照同样的方法寻找与地形剖面图的交点, 并定义第二参考点; 若右射线仍与地形剖面图有交点, 则继续选下一参考点做 2 条射线, 直至参考点出现在剖面图的右边界。

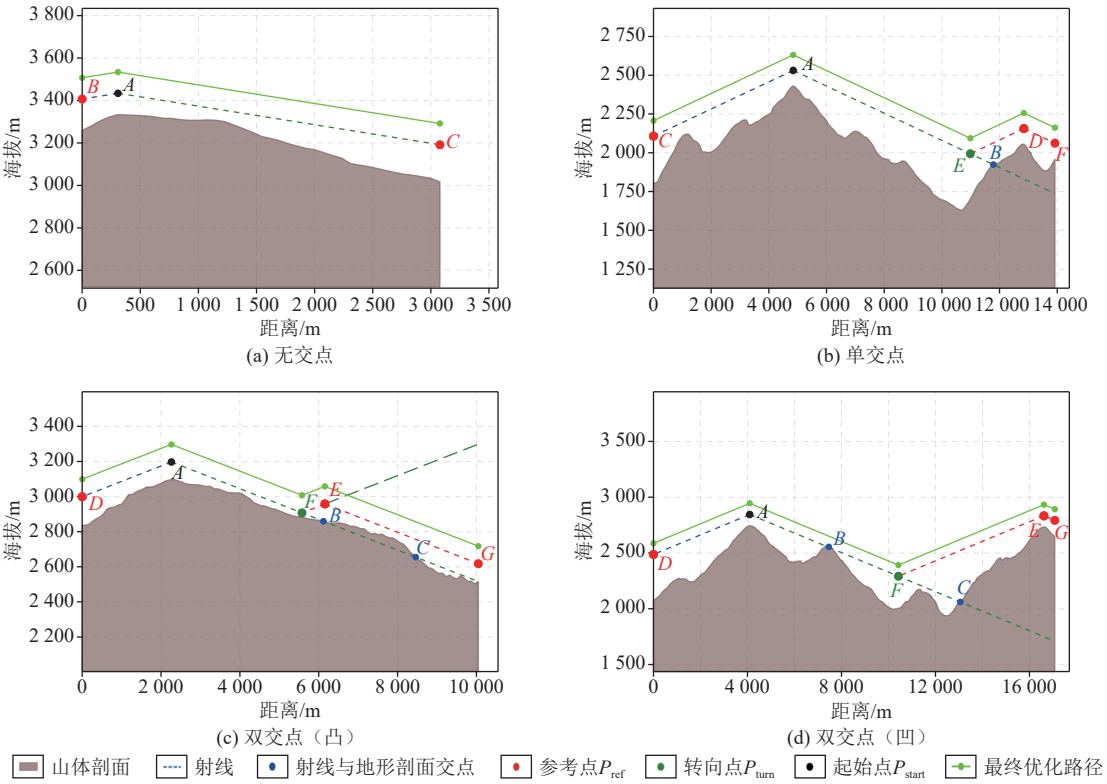


图 3　山体剖面射线交点示意

Fig. 3　Mountain profile ray diagram

3)当射线与地形剖面交点个数≥2 时(图 3c 中 B、C 点),首先将距离较近的交点根据设定的近距离交点合并阈值d_{merge}进行合并;随后选取距离起始点最近的 2 个交点,若这 2 个交点(图 3c 中 B、C 点)之间的地形为“凸”,则两点间的最高点上移后可作第一参考点(图 3c 中 E 点),并绘制左、右 2 条射线以继续寻找转向点和后续参考点。

4)若距离第一参考点最近的 2 个交点之间的地形为“凹”(图 3d 中 B、C 点),则选取两点间靠近左边界的点(图 3d 中 C 点)与左边界中间的最高点,上移之后作为第一参考点(图 3d 中 E 点),继续绘制左、右两射线以继续寻找转向点和后续参考点。

按照上述相同的思路,对左侧下降阶段的无人机仿地飞行路径进行规划。整合全局安全基准点(起始点)、转向点、参考点,并检查点的飞行高度是否达到安全飞行高度,按照距离进行排序,最终可得到完整的飞行路径点集。

1.5　全局安全高度检查与补偿

由于航线转向点为离散采样生成,相邻航点间的实际飞行轨迹可能存在低于安全高度h_{safe}的风险。为确保飞行全程满足安全距离要求,算法在路径生成后需要进行全局安全高度检查。

具体方法为:计算飞行路径的离地高度的全局最小值h_{min};若$h_{min}<h_{safe}$,则将路径点集的飞行高程统一向上补偿,补偿量为$h_{safe}-h_{min}$,从而保证飞行途中任意位置的离地高度均不低于安全距离。该全局补偿机制以牺牲部分地形贴合精度为代价,换取飞行安全的绝对保障。

2　仿地导航软件设计

2.1　路线生成流程

图 4 给出了使用仿地导航软件生成飞行路径的全流程。首先,导入数字高程模型(DEM 数据)或数字表面模型数据(DSM 数据)和航线文件,通过数据处理模块,生成测线地形剖面。然后,设置无人机/航空物探载荷姿态控制角度(升限角度)、近距离交点合并阈值及安全抬升高度。以测线 DEM/DSM 剖面的高程信息为基础,结合姿态升限角度,采用最高点法计算并生成贴合地形起伏的仿地飞行路线。首先进行仿地飞行路线二维展示,呈现路线的走向、高程变化趋势;然后基于二维展示结果,拓展为仿地飞行三维展示,直观呈现飞行路径在三维空间中的形态,便于验证仿地效果;最后导出包含坐标、高程、姿态等信息的仿地飞行路径数据。

2.2　软件设计

本系统旨在为无人机作业提供从地理数据处理到三维飞行模拟的全流程解决方案。系统采用分层

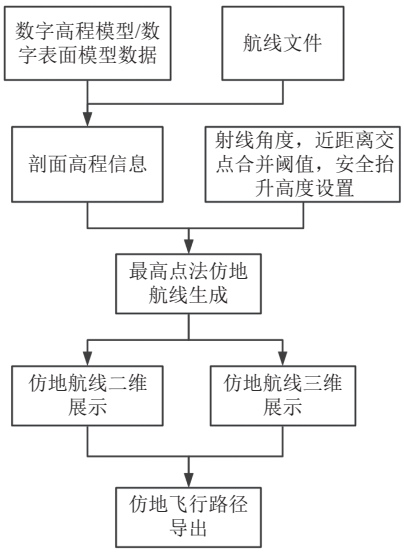


图 4　基于最高点算法的仿地导航生成软件系统流程

Fig. 4　The flowchart of the terrain following (TF) navigation generation software system based on peak-point algorithm

架构设计, 用户通过图形界面操作, 系统后台处理地理空间数据并生成安全飞行路径, 最终通过开源三维建模与渲染软件 (Blender) 实现高质量的三维可视化。核心思路是将 DEM 或 DSM 数据中提取的航线地形, 通过参数化建模实现多角度飞行模拟(图 5)。系统主要采用 Python 语言开发, 充分利用其丰富的地理处理和科学计算生态。核心功能模块包括: ①地理空间处理模块: 基于 Rasterio 库读取和处理 DEM/DSM 数据, 可导入数字高程文件从而计算航线距离和高程剖面; ②航线规划模块: 基于 NumPy 和 SciPy 实现基于最高点的射线投射算法, 自动生成避障飞行路径, 并提供飞行路径微调、文件保存等功能; ③Blender 集成模块: 通过其自带的 Python 模块 (bpy API), 实现三维地形建模和飞行模拟。此外, 系统图形用户界面采用 PyQt5 框架构建, 提供直观的交互体验。

地理空间处理模块集成了高程数据的二维可视化与航线全生命周期管理功能, 图 6 展示了用户传入的内蒙古乌海市甘德尔山区的数字高程图像以及相应航线文件的二维可视化效果。该模块不仅支持对现有航线文件的加载与解析, 还提供了灵活的航线编辑机制, 包括航线的新建与移除。在航线创建环节, 系统设计了双重交互模式, 用户既可通过图形化拖拽在地图上直观绘制航迹, 也可通过参数化输入指定起止点的经纬度坐标进行精确构建。这种设计兼顾了操作的便捷性与定位的精准度。

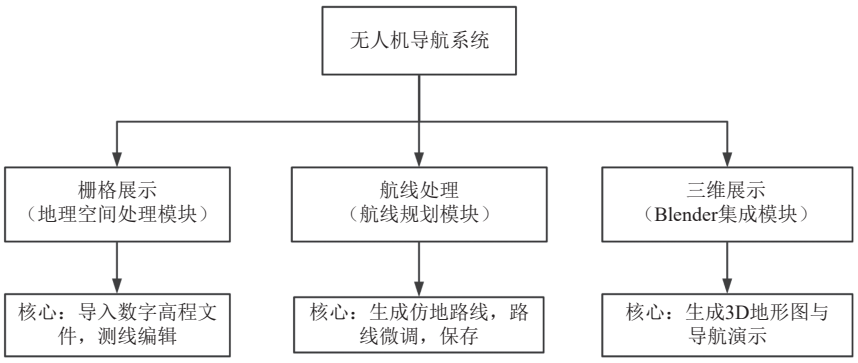


图 5　软件各模块关系示意

Fig. 5　Schematic diagram of the relationships among software modules

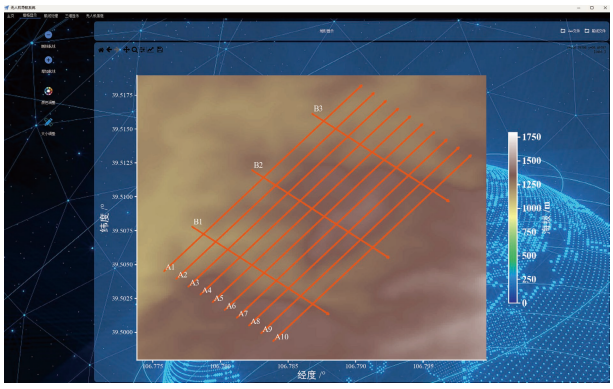
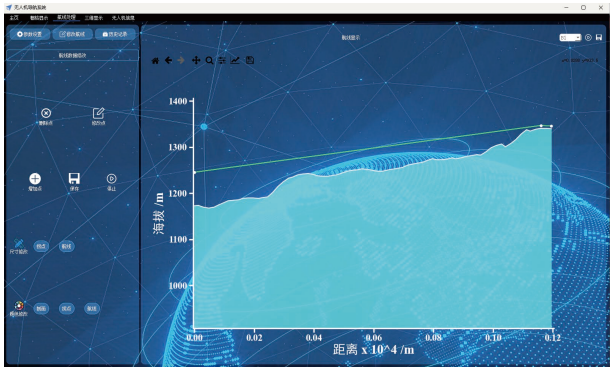


图 6　地理空间处理模块效果示意

Fig. 6　Geospatial processing module rendering

航线规划模块集成了参数配置、路径交互式微调及历史轨迹追溯等核心功能。图 7 显示了测线 B1 航线规划, 在设置离地高度限制为 5 m、升限角度为 5°、近距离交点合并阈值为 0 m 时, 算法生成的飞行路径整体较为平缓, 航点较少, 满足升限角度限制, 无人机姿态调整频率较低。该模块支持用户自定义关键飞行约束参数, 包括最大爬升角(射线角度)、近邻交点合并阈值及安全避障高度。通过灵活调整上述参数, 算法能够自适应不同复杂度的地形特征及多分辨率数字高程模型(DEM)数据, 显著提升了泛化能力。在路径生成后, 用户可将初始路径

导入编辑界面，根据实际任务需求对航迹进行精细化修正，包括动态调整爬升角度、增删关键转向节点等操作，以确保最终飞行路径的最优性与可执行性。



蓝色阴影—山地剖面；绿色折线—飞行路径；白点—关键转向点

图 7　航线规划模块效果示意

Fig. 7　Route planning module rendering

Blender 集成模块可实现三维可视化（图 8）。首先，将 DEM 数据转化为位移贴图材质，通过细分修改器创建精细地形网格；然后，根据规划的飞行路径生成曲线轨迹，将摄像机绑定到路径上实现飞行模拟；最后，利用 Cycles 渲染引擎输出高质量图像和视频。系统支持多角度批量渲染，可一键生成正视、俯视、侧视等标准视角。图 8 展示了根据用户传入的 DEM 数据渲染出的侧视三维图，相较于二维展示更能直观地表现出地形的起伏变化。

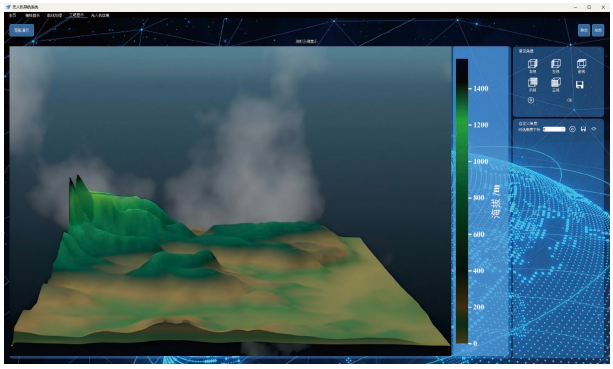


图 8　Blander 集成模块效果示意

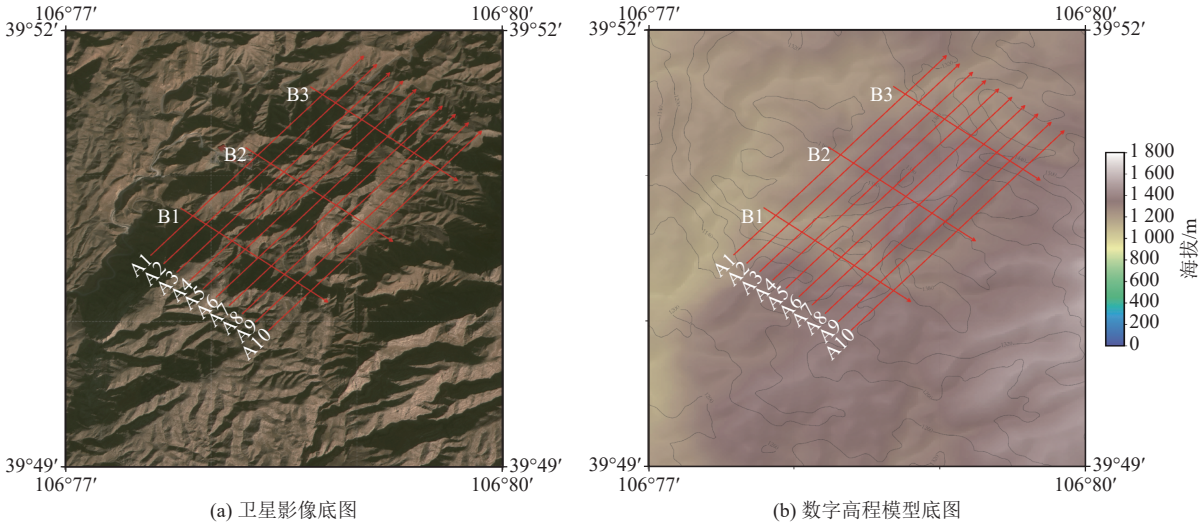
Fig. 8　Blender integration module rendering

本系统构建了一套从地理空间数据解析到三维飞行仿真验证的全流程无人机作业解决方案，实现了从二维剖面分析到三维动态模拟的衔接，打通了“数据导入—算法规划—交互修正—可视化验证”的技术闭环，为无人机在复杂环境下的安全作业提供了高效、精准且可视化的决策支持工具。

3　方法验证

本文选择在拟开展无人机航空时间域电磁实验的内蒙古乌海市甘德尔山区进行仿地导航的设计。实验区地形和航线设计见图 9。该区位于东经 106.77°~106.80°，北纬 39.49°~39.52°区域内，海拔超过 1 000 m，沟壑纵横，地形起伏剧烈，为典型山地丘陵地貌。本文选取 B1 号测线进行方法验证说明，该测线位于西北部山脊区域，地形剖面总落差 178 m，最低点 1 168 m，最高点 1 341 m。

如果在该区域选择 B1 号航线，设置安全飞行高度 h_{safe}=5 m，按照传统平飞的飞行方式，飞行路径如图 10 中纯蓝色点虚线所示，生成的平飞路径在最高处离地高度到达 5 m，而在山谷等最深处，离地高度达到了 178 m。离地高度过高，容易导致探测信号衰减严重，影响探测结果。为了验证本文算法的可用性，设置 h_{safe}=5 m，d_{merge}=0 m，分别计算最大升限角度



(a) 卫星影像底图　　(b) 数字高程模型底图

图 9　实验区不同底图上叠加飞行路径示意

Fig. 9　Flight path is overlaid on different experimental area base maps

θ为 5°、10°、15°、20°、25°、30°、35°和 40°时生成的仿地导航路径, 结果对比如图 10 和表 2 所示。本文使用皮尔逊相关系数度量飞行路径与地形之间的拟合程度。

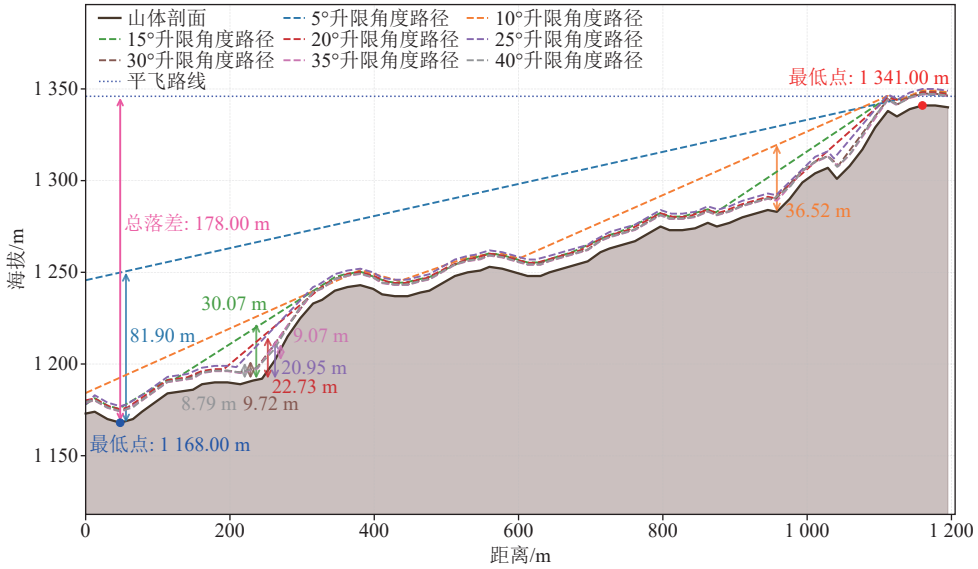


图 10　不同升限角度下生成的导航路径对比

Fig. 10　Comparison of navigation paths generated under different ceiling angles

表 2　B1 测线不同升限角度下仿地导航飞行参数统计

Table 2　Flight parameters of terrain-following navigation for the B1 survey line under different ceiling angles

θ/(°)	最大离地高度/m	平均离地高度/m	标准差/m	皮尔逊相关系数	导航点个数
传统平飞	178.00	95.09	47.00		
5	81.90	47.02	18.85	0.97	3
10	36.51	18.37	9.00	0.98	12
15	30.05	10.97	5.77	0.99	40
20	22.70	8.49	3.37	1.00	66
25	20.94	9.66	2.09	1.00	92
30	9.71	6.60	0.61	1.00	115
35	9.07	6.18	0.48	1.00	127
40	8.78	6.39	0.32	1.00	135

结果表明: 在θ<30°时, 随θ的增大, 航线逐步逼近地形, 表明增大坡度约束对地形贴合具有持续改善作用。其中, 在θ=15°前后呈现出明显的阶段性差异: 在 15°以下时, 最大离地高度从 81.90 m 快速降至 30.05 m, 标准差从 18.85 m 降至 5.77 m, 路径形态变化剧烈; 超过 15°后, 各项指标改善幅度明显收窄, 算法在此坡度范围内已基本达到地形贴合的极限。进一步将θ增大至 30°, 最大离地高度降至全区间最低的 9.71 m, 平均离地高度降至 6.60 m, 标准差仅 0.61 m, 航线与地形高程几乎完全同步, 各项指标达到最优平衡。然而, 当θ继续增大至 35°和 40°时, 最大离地高度和平均离地高度虽进一步降低, 但标准差下降速率明显减缓, 且转向点数量持续增加导致导航效率下降, 同时载荷姿态逼近极限。综合最大离地高度、平均离地高度、标准差及皮尔逊相关系数 4 项指标, B1 测线最佳升限角度确定为 30°。

采用本文算法对实验区所有测线(A1~A10、B1~B3)进行仿地导航, 测试时升限角度分别设置为 5°、10°、15°、20°、25°以及 30°, 结果如表 3 所示。验证结果表明, 升限角度的选取应充分考虑航线具体地形特征、导航点个数等, 不宜采用统一参数, 需在保障飞行安全的前提下维持较高的地形相关性。

综合实验区整体表现, 为保证航线对地形的有效拟合, 该实验区升限角度宜控制在 20°~30°区间。

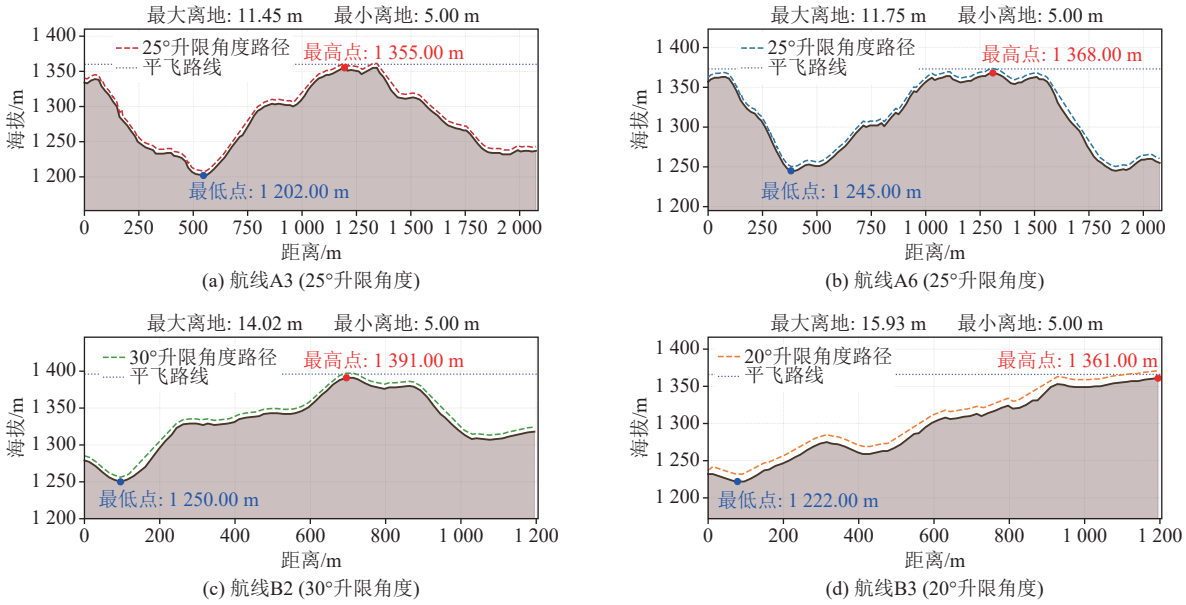
表 3　实验区仿地导航最佳设计参数与离地高度统计

Table 3　Statistics of optimal design parameters and ground clearance height for terrain-following navigation along each survey line in the test area

测线编号	最佳升限角度/(°)	最大离地高度/m	平均离地高度/m	标准差/m
A1	25	17.99	8.01	1.52
A2	20	14.29	8.25	1.10
A3	25	14.13	6.61	0.34
A4	30	20.81	9.65	1.86
A5	20	16.92	8.59	2.11
A6	25	11.74	5.94	1.26
A7	30	20.09	7.16	3.34
A8	25	14.63	7.52	1.39
A9	30	33.99	9.62	4.75
A10	30	25.21	8.21	3.17
B1	30	9.71	6.60	0.61
B2	30	14.00	6.86	1.47
B3	20	15.92	10.98	0.96

在此区间，算法生成的飞行路径、最大离地高度可维持在 30 m 以下，平均离地高度在 10 m 以下，标准差在 5 m 以下，极大程度地贴合了地形，在满足无人机航空时间域电磁探测设置起伏角度限制的同时，也不至于因离地高度过高而导致信号衰减过大。

图 11 给出了部分航线导航路径效果，直观展示了本文算法生成的飞行路径在满足升限角度的情况下能很好地贴合地形。验证结果表明，算法使用的仿地飞行方法突破了传统平飞局限，飞行路径更加贴合地面，飞行高度波动显著降低，飞行安全性得到提升，有助于提高山谷区域的探测分辨率。



(a) 航线A3 (25°升限角度)　(b) 航线A6 (25°升限角度)

(c) 航线B2 (30°升限角度)　(d) 航线B3 (20°升限角度)

图 11　不同航线导航路径对比

Fig. 11　Comparison of terrain-following navigation paths for different survey lines

4　结论

本文面向软链接载荷条件下的无人机航空时间域电磁探测需求，提出了一种基于最高点约束的仿地飞行规划方法，并研制了配套的全流程软件系统。该方法通过综合考虑载荷姿态约束与无人机飞行性能，结合射线投射技术，实现了复杂地形条件下平滑且安全的避障导航路径自动生成，有效降低了飞行过程中的高度波动与系统噪声。乌海甘德尔山试验区的实地验证结果表明，该方法能够实现稳定的高精度地形贴合飞行，能够提升探测信号质量与深部响应能力。

本研究构建了一套面向复杂山区环境的无人机地球物理探测飞行规划与实现方案，为矿产资源勘查与地质灾害监测提供了可靠的技术路径，并拓展了无人机仿地导航技术在地球物理探测中的应用边界。

参考文献(References)：

[1] 韩雪，殷长春，任秀艳，等. 时间域航空电磁系统探测深度研究 [J]. 吉林大学学报：地球科学版，2019，49(5)：1448−1456.
Han X, Yin C C, Ren X Y, et al. Research on exploration depth of time-domain airborne EM system[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2019, 49(5): 1448−1456.

[2] 王绪本，张赛民，高嵩，等. 无人机半航空瞬变电磁探测技术及其应用 [C]//中国地球物理学会，2019 年中国地球科学联合学术年会论文集，2019：61−63.
Wang X B, Zhang S M, Gao S, et al. UAV Semi-Airborne Transient Electromagnetic Detection Technology and Its Applications [C] // Chinese Geophysical Society, Chinese Seismological Society, Proceedings of the 2019 China Joint Conference on Earth Sciences, 2019: 61−63.

[3] 方涛，张建军，付成群，等. 无人机地空瞬变电磁系统在冶山地下巷道探测中的应用 [J]. 地球物理学进展，2015，30(5)：2366−2372.
Fang T, Zhang J J, Fu C Q, et al. Using ground-airborne transient electromagnetic system on unmanned aerial vehicle detecting Yeshan underground tunnels[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(5): 2366−2372.

[4] 马洪翔，刘丽华，晏使楚，等. 无人机全航空时间域电磁探测组合脉冲发射技术 [J]. 中南大学学报：自然科学版，2024，55(10)：3756−3767.
Ma H X, Liu L H, Yan S C, et al. Unmanned aerial vehicle time domain electromagnetic detection combination pulse launch technology[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2024, 55(10): 3756−3767.

[5] Varma K N V S, Kumari S L. Robotic vision based obstacle avoidance for navigation of unmanned aerial vehicle using fuzzy rule based optimal deep learning model[J]. Evolutionary Intelligence, 2024, 17(4): 2193−2212.

[6] 王冲, 秦涛涛, 卞雷祥, 等. 多旋翼无人机对瞬变电磁探测系统干扰分析 [J]. 自动化与仪器仪表, 2025(4): 4−9.
Wang C, Qin T T, Bian L X, et al. Analysis of multi-rotor UAV interference to transient electromagnetic detection system[J]. Automation & Instrumentation, 2025(4): 4−9.

[7] Yang S Y, Cheng H Y, Yu C C. Real-time object detection and tracking for unmanned aerial vehicles based on convolutional neural networks[J]. Electronics, 2023, 12(24): 4928.

[8] Wang C, Wang J, Wang J J, et al. Deep-reinforcement-learning-based autonomous UAV navigation with sparse rewards[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(7): 6180−6190.

[9] Riordan J, Manduhu M, Black J, et al. LiDAR simulation for performance evaluation of UAS detect and avoid[C]//2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS).IEEE, 2021: 1355-1363.

[10] Sudhakar S, Vijayakumar V, Sathiya Kumar C, et al. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based Forest Fire Detection and monitoring for reducing false alarms in forest-fires[J]. Computer Communications, 2020, 149: 1−16.

[11] Saarinen N, Vastaranta M, Näsi R, et al. Uav-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging for mapping biodiversity indicators in boreal forests[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, XLII-3/W3: 171−175.

[12] 张杨. 基于无人机热成像的森林火灾早期识别与扑救策略分析 [J]. 消防界: 电子版, 2025, 11(11): 111−113.
Zhang Y. Analysis on early identification and fighting strategy of forest fire based on UAV thermal imaging[J]. Fire Protection World: Electronic Edition, 2025, 11(11): 111−113.

[13] Nex F, Remondino F. UAV for 3D mapping applications: A review[J]. Applied Geomatics, 2014, 6(1): 1−15.

[14] 沈跃, 张念, 孙志伟, 等. 基于多速率卡尔曼滤波的植保无人机仿地飞行方法 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 190−197.
Shen Y, Zhang N, Sun Z W, et al. Terrain-following flight method of plant protection UAV based on multi-rate Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 190−197.

[15] 余斌, 顾涛, 王勇, 等. 一种基于 DEM 数据的无人机地形匹配仿地飞行方法: CN113625731B[P]. 2024-06-21.
Yu B, Gu T, Wang Y, et al. A UAV terrain-matching terrain-following flight method based on DEM data: CN113625731B[P]. 2024-06-21.

[16] 代明, 刘晓文, 吴英梅. 倾斜摄影仿地飞行技术在山地地形图测绘中的应用研究 [J]. 现代信息科技, 2023, 7(16): 121−124.
Dai M, Liu X W, Wu Y M. Research on the application of oblique photography and ground simulation flight technology in mountain terrain mapping[J]. Modern Information Technology, 2023, 7(16): 121−124.

[17] 林峰, 石田松, 卢艳军, 等. 基于激光雷达的无人机仿地飞行系统设计与实现 [J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 146−151, 156.
Lin F, Shi T S, Lu Y J, et al. Design and implementation of UAV's terrain following system based on lidar[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(9): 146−151, 156.

[18] 荣凤娟, 张清华, 张杰, 等. 无人机软连接吊舱的伪卫星定位算法研究 [J]. 全球定位系统, 2018, 43(4): 1−7.
Rong F J, Zhang Q H, Zhang J, et al. Dynamic positioning for flexible pods of UAV based on pseudolites[J]. GNSS World of China, 2018, 43(4): 1−7.

[19] 王炳乾, 陈超, 王华军, 等. 基于等高线构建无人机航线的新型仿地飞行策略 [J]. 测绘通报, 2020(11): 104−107, 115.
Wang B Q, Chen C, Wang H J, et al. A new ground-like flight method based on contours to construct drone routes[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(11): 104−107, 115.

[20] 于显利, 刘顺安, 刘佳琳. 无人机在地球物理探测中的应用 [J]. 中国矿业, 2012, 21(7): 107−109.
Yu X L, Liu X A, Liu J L. Application of unmanned aerial vehicle for geophysical surveying[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(7): 107−109.

[21] 刘双, 胡祥云, 郭宁, 等. 无人机航磁测量技术综述 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2023, 48(6): 823−840.
Liu S, Hu X Y, Guo N, et al. Overview on UAV aeromagnetic survey technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(6): 823−840.

Design of terrain-following navigation software for the UAV-borne time-domain electromagnetic detection system based on the highest point method

LUAN Xiao-Dong[1], QIU Jia-Yi[2,3], MA Ya-Yu[2], ZOU Liu-Han[2], ZHANG Yu-Rui[2], LI Yan-Ming[2], YANG Zhong-Jia[4], GUO Qi[1]

(1. *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources*, *Beijing* 100083, *China*; 2. *School of Computer Science*, *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225, *China*; 3. *School of Artificial Intelligence*, *Chongqing University of Posts and Telecommunications*, *Chongqing* 400065, *China*; 4. *School of Information and Communication Engineering*, *Beijing Information Science & Technology University*, *Beijing* 102206, *China*)

Abstract: In geological surveys, the unmanned aerial vehicle (UAV)-borne time-domain electromagnetic detection system with a flexible pod structure (also referred to as "flexibly connected payload") faces multiple challenges, including unstable attitude, fluctuating alti-

tude, and increased data noise during conventional level flight and terrain-following flight. Based on contour-derived terrain data, this study developed a highest-point algorithm for terrain-following navigation of UAVs with a flexibly connected payload. By introducing constraints on the payload attitude ceiling and the UAV flight ceiling, the proposed algorithm enabled terrain-following navigation of UAVs with a minimum number of waypoints while ensuring flight safety, thereby significantly alleviating the fluctuations of flight systems. Based on this, a matched terrain-following navigation software system was developed, consisting primarily of a geospatial data processing module, a flight route planning module, and a Blender 3D integration module. This software system allows for terrain data import, automatic flight route generation, and 3D visualization. Field tests conducted in the Gandel Mountain area in Wuhai City, Inner Mongolia, demonstrate that the proposed algorithm supported accurate terrain-following flight and enhanced signal quality and subsurface detection capability. This study provides a novel technical approach for mineral exploration and geological hazard monitoring in complex mountainous areas while also extending the application of UAV terrain-following navigation in geophysical exploration.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV)**;** terrain-following navigation**;** flexibly connected payload**;** highest point method**;** airborne time-domain electromagnetic detection

（本文编辑: 叶佩, 沈效群）