引文格式：钟良,张娅婷,邓邦龙,等. 基于贴近摄影测量的边坡无控制点毫米级形变监测方法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(12):17-21. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.12.004

基于贴近摄影测量的边坡无控制点毫米级形变监测方法

钟　良[1,3,4]，张娅婷[2]，邓邦龙[5]，魏伶芸[1,3,4]，陶鹏杰[2*]

（1. 长江空间信息技术工程有限公司（武汉），湖北 武汉 430010；2. 武汉大学遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079；
3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司，湖北 武汉 430010；4. 流域水安全保障湖北省重点实验室，湖北 武汉 430010；
5. 湖北清江水电开发有限责任公司，湖北 宜昌 443000）

摘　要：边坡形变监测是预防地质灾害和保障水利工程安全的重要手段，尤其在早期识别微小形变方面，对风险预警具有关键意义。无人机摄影测量因其高分辨率影像获取能力，能够精细刻画边坡微地貌特征，弥补了传统航空影像在精度和时效性不足的局限性。然而，现有方法通常依赖地面控制点，需分别对两期影像进行控制点约束下的空三处理，导致外业工作量大、成本高、效率低。为此，提出一种基于贴近摄影的无控制点毫米级边坡形变监测方法。该方法利用两期毫米级的无人机贴近摄影影像，结合GNSS/RTK定位信息完成区域网平差，解算获取监测点三维坐标；并以场景内稳定点作为基准点，计算并剔除系统误差，提取形变量。在南水北调中线工程邓州段水利边坡的实验表明，本方法在完全无控条件下实现了3.35 mm的形变监测精度，验证了其在高精度边坡变形监测中的应用潜力与工程适用性。

关键词：无人机影像；贴近摄影测量；边坡形变监测；无地面控制点

中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）12-0017-05

Millimeter-scale Deformation Monitoring Method of Slopes Without Ground Control Points Based on Nap-of-the-Object Photogrammetry

ZHONG Liang[1,3,4], ZHANG Yating[2], DENG Banglong[5], WEI Lingyun[1,3,4], TAO Pengjie[2]

(1. Changjiang Spatial Information Technology Engineering Co., Ltd., Wuhan 430010, China;
2. School of Remote Sensing Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;
4. Hubei Provincial Key Laboratory of River Basin Water Security, Wuhan 430010, China;
5. Hubei Qingjiang Hydropower Development Co., Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: Slope deformation monitoring plays a vital role in preventing geological hazards and ensuring the safety of hydraulic engineering structures, particularly by enabling early detection of subtle displacements. UAV photogrammetry, capable of acquiring ultra-high-resolution imagery, enables detailed characterization of slope micro-topography and addresses the limitations of traditional aerial photogrammetry in terms of both accuracy and efficiency. However, existing methods typically rely on ground control points (GCPs), requiring separate bundle adjustment for multi-temporal imagery, which increases field workload, costs, and operational complexity. We proposed a GCP-free, millimeter-precision slope deformation monitoring method based on nap-of-the-object photogrammetry. By integrating GNSS/RTK data, with block bundle adjustment, we derived 3D coordinates of monitoring targets, and corrected systematic errors between epochs using stable features as reference points, allowing extraction of true deformation. Field experiments conducted on a hydraulic slope along the Dengzhou section of the South-to-North Water Diversion Project demonstrate that the method achieves a deformation monitoring accuracy of 3.35 mm without GCPs, validating its potential and applicability for high-precision deformation monitoring in hydraulic engineering.

Keywords: UAV image, nap-of-the-object photogrammetry, slope deformation monitoring, without GCP

无人机摄影测量技术凭借其高分辨率影像获取能力与作业灵活性，已成为面向复杂地貌的三维建模与变形监测的重要手段[1-3]。尤其是在边坡、滑坡等微地貌区域，通过高精度空三处理可实现目标区域的精细三维重建。然而，现有方法高度依赖人工布设的地面控制点，需对两期影像分别进行控制点约束的区域网平差以解算监测点坐标，再通过差分计算形变量[4]。该过程存在多重瓶颈：其一，控制点布设需作业人员进入高风险区域，存在安全隐患；其二，两期独立建模效率较低，难以快速响应；更为关键的是，控制点

项目来源：基于无人机的高精度渠坡变形监测技术方法研究项目；清江库坝区部分滑坡体变形自动化监测及预警系统研究项目。
第一作者简介：钟良（1978—），博士，正高级工程师，主要从事摄影测量和遥感技术应用工作，E-mail：2044414@qq.com。
通信作者：陶鹏杰（1986—），博士，副教授，博士生导师，主要从事航天航天摄影测量工作，E-mail：pjtao@whu.edu.cn。

测量误差与模型解算误差的累积，限制了监测精度，难以实现毫米级的高精度应用[5-6]。

贴近摄影测量（Nap-of-the-Object Photogrammetry）是一种近距离、低空、面向目标表面展开的高分辨率摄影测量方式，具备极高的几何精度还原能力[7-8]。在GNSS/RTK定位辅助下进行区域网平差，其解算模型误差主要体现为刚性系统误差，即在各时相间保持空间结构一致，仅存在整体偏移[9-10]。这一特性使得可通过选取稳定点作为基准，估算并剔除系统误差，从而恢复监测点的真实坐标变化。

本文研究了一种基于贴近摄影测量的无地面控制点边坡毫米级形变监测方法。首先通过对水利边坡进行两期无人机贴近摄影，获取毫米级无人机影像；在RTK约束下进行区域网平差，解算待监测点位的两期空三加密坐标；基于基准点消除系统误差，通过对比计算，得到边坡形变量。

1 研究方法

本文方法的流程如图1所示，主要分为3个步骤：边坡贴近摄影航迹规划、GNSS辅助的无人机影像区域网平差和基于基准点的两期形变监测。

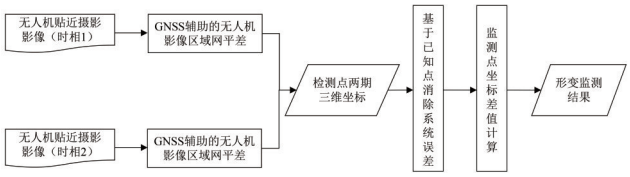


图1 本文方法流程图

1.1 边坡贴近摄影航迹规划原理

贴近摄影测量是区别于垂直航空摄影测量、倾斜摄影测量的第3种摄影测量方式[7-12]。贴近摄影的重点不在于“近”，而是“摄影方向”，它的本质是对目标表面摄影，针对非常规地面或人工物体表面等目标，进行贴合目标表面的飞行以获取高分辨率数据[13]。

在贴近摄影测量航迹规划中无人机镜头始终正对目标区域，可以被视为贴近摄影测量的“下视镜头”，如图2所示。

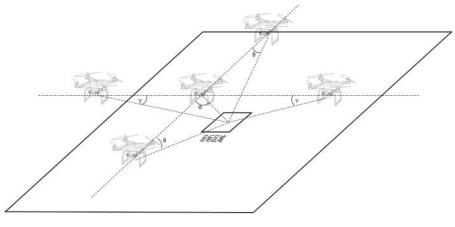


图2 无人机贴近摄影测量的多角度航迹

贴近摄影最优航迹与姿态规划，是在地形感知的基础上，解算最优化的无人机贴近摄影位置和面向地形表面的摄影姿态，从而指导无人机获取高陡斜坡的高分辨率影像。其原理如图3所示。

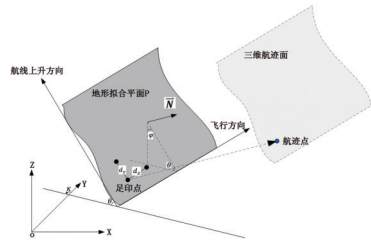


图3 三维航迹与姿态规划示意图

图中，d_x 与 d_y 分别为航向和旁向相邻两个航迹点对应足印点在平面 P 上的距离。设相机视场角为 $(\mathrm{fov}_x, \mathrm{fov}_y)$，贴近摄影距离为 d，航向与旁向重叠率分别为 o_x、o_y，d_x 与 d_y 计算公式为：

$$\begin{aligned} d_x &= 2d\left(1-o_x\right)\tan\frac{\mathrm{fov}_x}{2} \\ d_y &= 2d\left(1-o_y\right)\tan\frac{\mathrm{fov}_y}{2} \end{aligned} \tag{1}$$

第 i 条航线上第 j 个航迹点 Ep_{ij} 坐标为：

$$Ep_{ij} = R\begin{bmatrix} d_x \times j \\ d_y \times i \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \tag{2}$$

为保证相机始终面向平面 P，无人机机头方向应保持垂直于飞行方向并朝向平面 P 一侧，相机光轴方向为 $-\vec{N}=(-a,-b,-c)$，可按下式计算旋偏角 κ 和俯仰角 φ：

$$\begin{aligned} \kappa &= a\tan 2(-a,-b) \\ \varphi &= -a\tan 2\left(c,\sqrt{a^2+b^2}\right) \end{aligned} \tag{3}$$

式中，$a\tan 2(y,x)$ 为2个参数的反正切函数，相当于计算 y/x 的反正切，其返回值范围为 $[-\pi,\pi]$。

在常规竖直摄影测量中，立体像对间的最大交会角约为相机视场角的0.4倍（往往小于90°），因此常规摄影测量的平面精度通常大于高程方向（或深度方向）精度[14]。为了增加立体像对间的交会角，提高摄影测量成果的精度（尤其是深度方向的精度），一般会采用交向摄影（倾斜摄影）的方式来拍摄数据[15]。贴近摄影测量的本质是对面摄影，如果将这个面旋转到水平位置，那么与常规的摄影测量相似。因此，为了增加交会角，保证精细重建结果的精度，也需要对贴近摄影测量增加交向摄影；另一方面，增加交向影像还可以保证最终获取的数据能够覆盖那些在对目标进行平面拟合过程中被忽略的结构[16-17]。

1.2 GNSS辅助的无人机影像区域网平差

GNSS辅助的区域网平差技术是实现无地面控制

点摄影测量解算的核心手段之一。该方法通过引入影像获取时的GNSS/RTK定位信息，赋予每张影像初始外方位元素，进而在空中三角测量中建立以相对约束为主、绝对几何框架为辅的解算体系，能够在不依赖控制点的情况下恢复一个具有刚性结构的影像区域网。

与传统依赖地面控制点的空三平差不同，GNSS辅助的区域网以飞行过程中同步记录的高精度位置数据为支撑，使得影像间的相对几何关系可由连接点特征匹配稳固维持，而整体三维空间刚性框架则由GNSS位置信息提供的弱约束锁定。在高密度特征点与高重叠度影像结构的共同作用下，该刚性区域网具有较强的一致性与稳定性。

本研究采用光束法区域网平差，构建包含相机外方位元素与加密点三维坐标的联合最小二乘估计模型，结合GNSS观测值作为先验输入进行迭代求解。在解算过程中，虽然GNSS位置存在厘米级的误差，但其对区域网构型的影响体现为整体平移或刚性变换，可通过后续基准点消差模型有效剔除。因此，GNSS辅助区域网平差所恢复的地面三维模型在多时相之间具有一致的刚性空间结构，成为实现形变监测的几何基础。

光束法区域网平差是以影像外方位元素和像点坐标观测值作为未知数的非线性函数，需要进行线性化，对未知数作偏微分。误差方程式为：

$$\begin{cases} v_x = a_{11}\Delta X_S + a_{12}\Delta Y_S + a_{13}\Delta Z_S + a_{14}\Delta\varphi + a_{15}\Delta\omega + \\ \quad a_{16}\Delta\kappa - a_{11}\Delta X - a_{12}\Delta Y - a_{13}\Delta Z - l_x \\ v_y = a_{21}\Delta X_S + a_{22}\Delta Y_S + a_{23}\Delta Z_S + a_{24}\Delta\varphi + a_{25}\Delta\omega + \\ \quad a_{26}\Delta\kappa - a_{21}\Delta X - a_{22}\Delta Y - a_{23}\Delta Z - l_y \end{cases} \tag{4}$$

式中，a_{ij}为影像外方位角元素构成的旋转矩阵的元素；$(\Delta X_S, \Delta Y_S, \Delta Z_S, \Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa)$为外方位元素$(X_S, Y_S, Z_S, \varphi, \omega, \kappa)$的改正量；$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$为连接点地面坐标$(X, Y, Z)$的改正量；$(l_x, l_y)$为常量；$(v_x, v_y)$为像点残差。

对于每张影像，摄影中心坐标(X_S, Y_S, Z_S)有GNSS观测值$(X_{GNSS}, Y_{GNSS}, Z_{GNSS})$，引入式（5）所示的先验约束观测方程。

$$\begin{cases} v_{X_S} = X_S - X_{GNSS} \\ v_{Y_S} = Y_S - Y_{GNSS} \\ v_{Z_S} = Z_S - Z_{GNSS} \end{cases} \tag{5}$$

这些约束方程被加入到光束法平差中，其权重由GNSS观测值的先验精度确定。

1.3　基于基准点的两期形变监测

在影像GNSS信息约束下，两期无人机影像摄影测量处理恢复的地面点三维坐标也有差别，该差别取决于不用时间无人机RTK的精度差异。为了实现无地面控制条件下的毫米级形变监测，需要在摄影场景内选取若干稳定点作为基准点，设定其空间坐标不变，则可将由两期无人机影像解算的基准点地面坐标的差值作为RTK差异形成的系统误差。那么，两期影像计算的地面点三维坐标差减去系统误差后的残余误差即为形变量。假设多个基准点的两期坐标误差均值为$(\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r)$，各个地面点的两期坐标差值为$(\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i)$（其中下标$i$为地面点序号），则地面点的形变量如下：

$$\begin{cases} \Delta X_i' = \Delta X_i - \Delta X_r \\ \Delta Y_i' = \Delta Y_i - \Delta Y_r \\ \Delta Z_i' = \Delta Z_i - \Delta Z_r \end{cases} \tag{6}$$

2　研究数据

2.1　数据采集设备

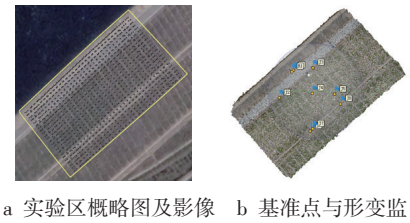
使用大疆M350 RTK无人机，搭载大疆禅思P1高清镜头进行影像获取。其相关参数如表1所示。

表1　大疆P1全画幅相机相关参数

参数	大疆P1全画幅相机
镜头数量	单镜头全画幅传感器
有效像素	4 500万
传感器尺寸	全画幅（35.9 mm×24 mm）
倾斜角度	智能摆动拍摄
镜头焦距	支持24/35/50 mm 3种焦段DJI DL卡口镜头
支持机型	经纬M300 RTK、M350 RTK

2.2　影像数据与监测点分布

实验区域为位于南水北调中线工程邓州段的一处水利边坡，如图4所示，测区大小约为70 m×40 m。该区域坡度＞45°，存在潜在裂缝或形变迹象。采用贴近摄影方式，于2025年3月20日上午和下午分别采集了2 256与2 257张影像，覆盖面积约为2 800 m^2。无人机飞行高度约7 m，利用武汉大学研制的贴近摄影航迹规划软件规划无人机航迹后，导入大疆无人机进行影像采集，航向与旁向重叠度分别为80%与70%，采集的影像分辨率约为0.85 mm。为了提高测量精度，贴近摄影采用正视加交向摄影方式，即采集3个视角的无人机影像。



a 实验区概略图及影像摄站分布　　b 基准点与形变监测点分布

图4　位于南水北调中线工程邓州段的实验区边坡

2.3 监测点数据

由于两期时间差较小，地面几乎没有形变，因此采用如图5a所示的游标标靶模拟 X 、Y 、Z 三轴方向的毫米级形变；另外，为提高监测点的影像点位量测精度，在监测点布设如图5b所示的方形靶标，靶标中十字交叉位置即为监测点位。



a 游标标靶　　b 方形靶标

图5 游标标靶和方形靶标点

整个测区范围内，设置了1个基准点与8个形变监测点，其分布如图4b所示。其中选取监测区内地质条件稳定、无位移风险的特征点作为基准点。基准点的选取依据包括：①位于基岩露头或稳固混凝土结构等抗变形区域；②多期影像中纹理特征清晰且位置一致性高；③通过时序坐标解算验证其位移量趋近于零。此类基准点多以人工观测墩形式布设于稳定基岩上，其强制对中装置可保障测量标志的长期稳固性。通过将此类稳定点作为平差基准，可构建无控制条件下的绝对坐标框架，支撑后续形变量的精确解算。选取的基准点位于实验区的一个观测墩，如图6所示。



图6 基准点实景图

3 实验结果与分析

3.1 形变检测结果

利用高性能服务器，使用Agisoft Metashape软件，分别对2个时相下采集的无人机高分辨率影像进行GNSS辅助的区域网平差处理，得到基准点与形变监测点的空三加密坐标。处理过程中，设置的Agisoft Metashape软件关键参数如表2所示。

表2 空三处理关键参数

参数项	参数设置
每张影像特征点数	40 000
是否使用影像姿态初值	否
位置初值先验精度	0.5 m
相机畸变参数	焦距 f，像主点位置 c_x，c_y，畸变参数 $k1$，$k2$，$k3$，$p1$，$p2$，$b1$，$b2$

在进行GNSS辅助的区域网平差后，像点中误差控制在0.4像素左右，影像区域网平差的精度高，为后续进行形变监测提供了数据基础。影像外方位线元素（X，Y，Z）改正量均控制在15 cm以下。

原始影像经GNSS辅助的区域网平差后，根据布设的靶标点进行刺点，通过前方交会解算真实地物坐标；根据设定的基准点坐标消除RTK造成的测量系统性误差，得到形变监测结果。在平差后的影像中选择预设的靶标点和基准点进行刺点，并计算对应的地面三维坐标，得到1个基准点和8个靶标点在两期影像的空三加密坐标及其变化量，如表3所示。

表3 基准点与形变监测点的两期空三加密坐标与变化量

点号	第一期坐标/m			第二期坐标/m			坐标变化量/mm		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
R1	577 731.272 6	3 621 089.440 4	125.965 2	577 731.271 1	3 621 089.434 7	125.957 2	1.53	5.73	8.02
J1	577 731.884 4	3 621 089.999 2	124.968 9	577 731.897 9	3 621 090.006 1	124.960 9	−13.55	−6.98	8.04
J2	577 725.634 9	3 621 077.977 2	125.049 5	577 725.6349	3 621 077.970 7	125.046 3	0.00	6.44	3.27
J3	577 740.441 7	3 621 091.106 2	125.024 9	577 740.438 6	3 621 091.099 7	125.026 8	3.11	6.54	−1.86
J4	577 740.184 4	3 621 079.985 0	127.386 4	57 7740.168 0	3 621 079.994 7	127.378 4	16.47	−9.67	7.96
J5	577 749.803 1	3 621 079.535 3	129.562 0	577 749.798 8	3621 079.531 0	129.563 7	4.27	4.32	−1.74
J6	577 739.328 7	3 621 063.890 2	130.774 9	577 739.306 7	3 621 063.875 2	130.777 3	22.04	15.05	−2.43
J7	577 740.381 7	3 621 064.739 0	130.894 1	577 740.375 9	3 621 064.735 2	130.900 1	5.77	3.80	−6.05
J8	577 752.344 1	3 621 075.467 7	130.936 8	577 752.364 9	3 621 075.480 1	130.940 2	−20.83	−12.47	−3.42

将基准点 $R1$ 的形变量（1.53，5.73，8.02）作为系统误差，其他8个形变监测点坐标减掉该系统误差后的形变量及与实际模拟形变量对比情况得出形变监测的中误差为3.35 mm。

3.2 摄影方式对形变检测精度的影响

此外，为了验证无人机贴近摄影测量中交向摄影的必要性，采用了仅正视影像和正视+交向影像2种方案进行GNSS辅助的区域网平差，2种方案中无人机位置初值先验精度均为0.5 m，消除系统误差后形变监测点的形变量如表4所示。

采用正视+交向的摄影方案后，形变监测精度显著提升。在仅使用正视影像进行GNSS辅助的区域网平差，消除系统误差后形变监测点的形变量中误差为6.17 mm，加入交向影像后，中误差降至3.35 mm，提

表4　不使用交向摄影影像时形变监测点的形变量/mm

点号	两期影像检测的形变量				模拟形变量	误差
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔXYZ		
J1	−15.64	−11.98	0.14	19.70	20	−0.30
J2	−4.02	−0.75	−6.83	7.96	3	4.96
J3	3.08	2.61	−12.50	13.14	8	5.14
J4	19.20	−18.06	−5.59	26.94	20	6.94
J5	11.51	−2.70	−12.64	17.30	10	7.30
J6	23.55	−0.94	−8.73	25.13	20	5.13
J7	8.18	−11.65	−12.40	18.88	8	10.88
J8	−11.32	−20.29	−10.23	25.38	28	−2.62
中误差						6.17

高了形变监测的精度，验证了交向摄影在基于无人机贴近摄影测量的毫米级形变监测中的必要性。

3.3　影像GNSS位置先验精度对形变检测精度的影响

为评估影像GNSS位置先验精度对两期形变检测结果的影响，在空中三角测量过程中，分别设定影像GNSS位置先验精度为0.5 、1.0 、2.5 、5.0 m和10.0 m，记录并分析其对应的形变检测精度变化情况。实验结果如图7所示。

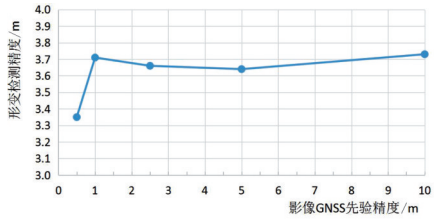


图7　不同GNSS先验精度下形变检测精度

由图7可见，随着GNSS先验精度从0.5 m降低至10.0 m，形变检测精度始终保持在4 mm以内，且整体波动幅度较小，表现出良好的稳定性。这表明，在GNSS/RTK约束下的区域网平差条件中，形变检测对GNSS位置先验精度并不敏感。

4　关于基准点的讨论

本研究提出的无地面控制点毫米级边坡形变监测方法，其核心环节之一在于通过稳定基准点确定GNSS误差引起的两期影像区域网之间的系统性偏差。为增强本文方法在工程实践中的适应性与理论合理性，就基准点的存在性与数量要求作进一步讨论。

4.1　基准点的存在性与可获取性

在当前边坡形变监测工程中，广泛采用全站仪等高精度设备进行形变测量，其基本策略为在监测区域周边布设观测墩作为稳定基准点，该策略隐含的前提是待监测的边坡外围存在相对稳定区域。对于稳定区域的界定与基准点的选取，通常可由地质勘察手段（如钻孔、地质雷达）划定边坡的影响范围，并在此范围之外选择结构完整、地质条件稳定的区域布设基准点；即使在特殊地形条件下，稳定区域距离边坡较远（如在对岸或坝后），但理论上边坡外围一般存在符合稳定性要求的基准点。

在极端情况下，若难以明确识别绝对稳定区域，则可采用“动态基准”技术方案，即在基准点处配置GNSS/北斗接收机，实时记录其三维坐标。即便基准点本身存在微弱位移，也可通过动态数据进行差分修正，构建标准稳定的参考框架，实现对边坡其他监测点坐标的精确解算。

4.2　基准点的数量要求

理论上，同一地面场景的两期影像在分别进行区域网平差之后，若存在刚体变换（包括平移、旋转和尺度变化），则至少需布设4个分布合理的基准点以解算完整的变换参数。然而，在实际工作中，我们发现对具备高精度GNSS/RTK定位能力的旋翼无人机（如DJI M350 RTK）所获取的贴近影像进行区域网平差时，影像之间主要存在整体平移误差，旋转与尺度变化可忽略不计。这一现象已在相关研究中得到验证[18]，并通过本文实测数据得到进一步印证。

因此，在此类高精度GNSS辅助条件下，仅需1~2个几何上可见性良好、结构稳定的基准点即可实现两期影像区域网间系统误差的有效剔除。此策略在降低部署成本与作业复杂度的同时，仍能保证监测精度满足毫米级要求。

在后续研究中，我们将进一步引入多基准点冗余建模与加权策略，探索其在复杂地形、局部不稳定区域中的误差抑制潜力，以提升整体模型的鲁棒性与适应性。

5　结　语

本文提出了一种基于无人机贴近摄影测量的边坡无地面控制点毫米级形变监测方法，构建了“GNSS辅助区域网 + 稳定基准点差分消差”的处理流程。通过南水北调中线工程邓州段典型水利边坡的实测验证，该方法在完全无控制点条件下实现了3.35 mm的三维形变监测精度，具备较高的稳定性与可靠性。该方法通过智能航摄规划与多视角融合技术，显著降低人力成本并提升数据采集效率；构建基于影像特征自匹配的变形解算体系，有效降低传统监测对地面控制的依赖性。该方法特别适用于高陡、危险或难以人工布设控制点的工程场景，为无人机技术在地质灾害预警、水利基础设施健康监测等领域的实用化与工程化应用提供了可行路径。

（下转第81页）