DOI:10.14188/j.2095-6045.20250183

文章编号:2095-6045(2026)05-0180-07

深水超大型导管架无人机精准摄影测量方法

杨现阳[1] 熊 文[2] 陈智鹏[2] 李家军[1] 霍悦龙[2] 李海峰[1] 杨青峰[1]
高静坤[1] 汪 姗[1] 王德洋[4] 彭怡锦[4] 余建伟[2] 曾 喆[3]

1 海洋石油工程股份有限公司,山东 青岛, 266555
2 深圳大学建筑与城市规划学院, 广东 深圳, 518060
3 中国石油大学(华东), 山东 青岛, 266580
4 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳, 518054

The Methodology for Precise UAV Photogrammetry of Deepwater Ultra-Large-Scale Jackets

YANG Xianyang[1] *XIONG Wen*[2] *CHEN Zhipeng*[2] *LI Jiajun*[1] *HUO Yuelong*[2]
LI Haifeng[1] *YANG Qingfeng*[1] *GAO Jingkun*[1] *WANG Shan*[1] *WANG Deyang*[4]
PENG Yijin[4] *YU Jianwei*[2] *ZENG Zhe*[3]

1 Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Qingdao 266555, China
2 School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China
3 China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China
4 CNOOC China Limited Shenzhen Branch, Shenzhen 518054, China

摘 要:本文提出了一种靶标增强的无人机导管架精准摄影测量方法。首先设计了一种摄影测量与全站仪共用的编码与非编码靶标,通过分层布设策略优化靶标密度与空间分布,然后根据导管架结构特征,提出外部贴近航线与内部圆柱航线的多视角数据采集方法,采用基于区域分解的平面投影算法与最大内接圆模型生成安全飞行路径,进一步融合改进YOLOv8的靶标智能识别算法与亚像素边缘拟合技术,实现复杂光照场景下的靶标精准定位,通过控制点约束的光束法平差,联合解算关键点三维坐标。实验表明,该方法在300 m范围内测量精度优于5 mm,显著提升测量效率,为深水导管架建造质量管控提供了可靠技术支撑。

关键词:导管架;无人机摄影测量;航线规划;靶标;工程测量

中图分类号:P231;TP751

文献标志码:A

Abstract: To address the technical challenges of achieving high-precision and high-efficiency measurements for large deepwater jackets, this study proposes a target-enhanced UAV-based precise photogrammetric method for jacket measurement. Firstly, a hybrid system of coded and non-coded targets compatible with both photogrammetry and total station measurements is designed, with target density and spatial distribution optimized through a hierarchical deployment strategy. Subsequently, based on structural characteristics of jackets, a multi-perspective data acquisition approach combining external close-range flight paths and internal cylindrical flight paths is developed. A region-decomposition-based planar projection algorithm and maximum inscribed circle model are employed to generate safe flight trajectories. The methodology further integrates an improved YOLOv8-based intelligent target recognition algorithm with subpixel edge fitting techniques to achieve precise target localization in complex lighting scenarios. Three-dimensional coordinates of key points are jointly resolved through control point-constrained bundle adjustment. Experimental results demonstrate that this method achieves measurement accuracy better than 5 mm within a 300 m range, significantly enhances measurement efficiency, and provides reliable technical support for quality control in deepwater jacket construction.

Key words: jacket; UAV photogrammetry; flight route planning; target; engineering measurement

随着深海油气的开采技术的发展,导管架的建造规模不断扩大。截至2024年,我国导管架的最大

引用格式:杨现阳,熊文,陈智鹏,等. 深水超大型导管架无人机精准摄影测量方法[J]. 测绘地理信息,2026,51(5):180-186(YANG Xianyang, XIONG Wen, CHEN Zhipeng, et al. The Methodology for Precise UAV Photogrammetry of Deepwater Ultra-Large-Scale Jackets[J]. Journal of Geomatics,2026,51(5):180-186)

基金项目:广东省自然科学基金(2025A1515010216);深圳市高校稳定支持计划(20220810184822001)。

作业水深达到了 324 m[1-3],导管架高度达到 300 m 级。为保障建造质量,需要在建设过程中及竣工后对其进行精确测量[4]。然而深水大型导管架测量存在以下困难:(1)深水导管架规模大、结构复杂,测量作业时间较长;(2)测量过程中多种施工活动同时进行,对测量工作易造成干扰;(3)导管架建造区昼夜温湿度变化易导致导管架发生变形。

目前导管架关键点主要采用全站仪进行测量[5-8]。尽管全站仪能够提供可靠的精度,但在是在面对超大型导管架时,多个测站大幅增加了工作量和时间,难以避免变形带来的影响。地面三维激光扫描技术能够在单站扫描中迅速获取点云,精度与传统全站仪相近,但在多站测量中却面临着数据匹配误差累计的问题以及导管架顶部区域较高无法测量导致的数据缺失。无人机能够快速覆盖大范围区域、到达难以接近的区域,获取高分辨率图像,操作成本相对较低,在大型结构测量上具有明显优势[9-16]。

然而,将无人机摄影测量技术应用于大型导管架也面临着一些挑战:(1)导管架复杂的钢结构数据采集难;(2)纹理重复影像匹配难;(3)大尺寸测量全局精度保障难。

1　导管架无人机精准摄影测量方法

为应对大型导管架(见图 1)高精度高效测量需求,本文提出一种靶标增强的无人机摄影测量方法实现高效率的导管架测量,其技术流程图如图 2 所示:(1)根据导管架的结构特点,设计并布设全站仪与摄影测量共用测量靶标辅助影像匹配,在导管架待测关键点和连接处布设连接点靶标,提高关键点测量和连接点匹配精度;(2)为了获取高分辨率的摄影测量图像数据以及保证导管架建造飞行现场安全,先采用倾斜摄影测量获取现场的粗略模型,进一步通过粗略模型分别规划外部和内部航线摄影测量航线,并进行数据采集;(3)利用少量全站仪控制点辅助靶标点摄影测量联合空中三角平差计算,得到导管架关键点的高精度三维坐标,实现大型导管架关键点的快速三维测量。同时利用全站仪控制点验证三维测量精度。

1.1　摄影测量靶标设计及布设

本文参考工业近景摄影测量方法,设计靶标作为光束法平差的连接点。同时,为了精准测量导管架关键点的三维坐标,还需要在关键点上布设靶标。此外,为统一摄影测量坐标系与导管架建造的工程



(a) 导管架建造现场　　(b) 导管架井口关键点

图 1　深水导管架建造现场和井口关键点

Fig. 1　Construction Site of Deepwater Jacket and Wellhead Critical Points

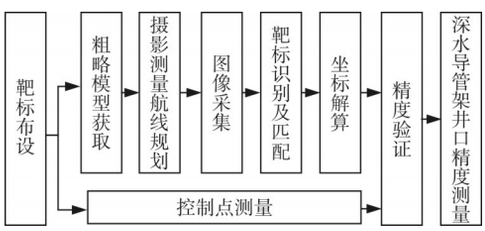


图 2　导管架无人机精密测量方法技术流程

Fig. 2　Technical Process for UAV Precision Measurement Method of Jacket

坐标,修正大范围摄影测量的尺度误差,将靶标设计成可供摄影测量和全站仪共用的靶标,为摄影测量提供少量控制点进行联合解算。

本文设计了两种靶标(见图 3),其中一种为非编码靶标,用于标记关键点和部分连接点,非编码靶标有效测量面积大,方便远距离摄影测量;另外一种为编码靶标[17],用于标记连接点,可有效唯一识别,用于校验误匹配。为了保障测量质量,根据实际摄影距离,对靶标的尺寸进行了设计。一般地,无人机与导管架距离需大于 20 m,摄影测量靶标特征在影像上像素需不小于 20 像素[18-20]。根据地面采样距离(ground sampling distance,GSD)的计算公式可计算靶标的尺寸:

$$\mathrm{GSD}=\frac{A\cdot H}{f} \tag{1}$$

式中,A 为像元尺寸;f 为焦距;H 为摄影距离。从而保证靶标可以在照片中被良好识别。



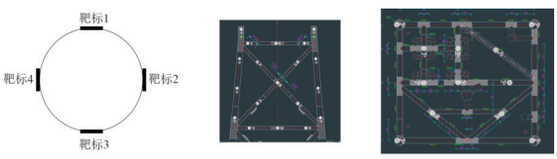
(a) 靶标设计　　(b)靶标布设

图 3　圆形编码靶标及无编码靶标

Fig. 3　Round-Coded and Non-coded Targets

在导管架上布设合适密度的靶标对于保障精度至关重要。导管架主要由多层桁架构成,本文采用分层布设的方法,在导管架的每一层桁架节点处借助附近的脚手架布设靶标。为了保障大于 50% 的

重叠度，本文根据最近 20 m 摄影距离和相机视场的大小，将相邻靶标之间的间隔距离设置为大约 7～10m，保障同一张照片可以拍摄到 4～6 个靶标点。此外，在导管架布点位置，环绕钢管每隔 90 度布设 1 个靶标，便于从不同角度对靶标点进行观测（见图 4(a)）。



(a) 横截面靶标布设 (b) 侧面靶标布设 (c) 各层靶标布设

图 4 导管架侧面与每层靶标点布设

Fig. 4 The Layout of Target Points on the Side of the Jacket for Each Layer

1.2 导管架多视角摄影测量航线规划

针对导管架这种结构复杂且内部中空的大型钢架结构，本文提出了基于倾斜摄影测量粗略模型的无人机航线生成方式：(1)对于导管架外部，采用贴近飞行的方式，进行图像采集；(2)对于导管架内部，进行圆柱航线规划进行图像采集（见图 5）。

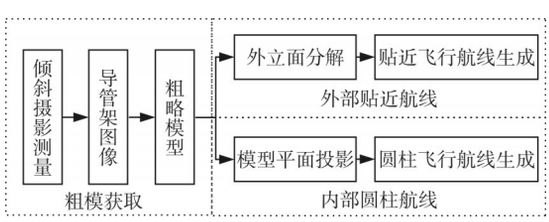


图 5 航线规划技术流程

Fig. 5 Technical Process of Route Planning

1.2.1 外部贴近摄影测量航线规划

如图 6 所示，首先将导管架外部待测区域分解为多个平面，之后将每个平面转换到水平面上，分别规划全覆盖摄影测量航线，最后将二维航线重新转换到三维空间中生成最终的外部贴近摄影测量航线。设相机摄影距离为 D，在平面上的矩形可视区域的长为 L，宽为 W；摄影测量所需的水平重叠度为 o_x，竖直重叠度为 o_y。在水平方向上两个视点的距离 Δx，竖直方向上的两个视点的距离 Δy：

$$\Delta x = (1 - o_x) L \tag{2}$$

$$\Delta y = (1 - o_y) W \tag{3}$$

在获取水平与竖直方向的偏移距离后，鉴于无人机水平飞行的能耗显著低于垂直飞行，生成的外部航线采用“弓”字形设计。此航线优先沿水平方向偏移 Δx 构建平行路径，以实现能耗的有效控制。同时，通过在竖直方向上的逐层偏移 Δy，逐步生成完整的二维覆盖航线，确保对目标区域的全面覆盖。在生成二维航线之后，通过三维坐标转化，将航线转化到初始平面所在的方向。最后，沿着平面法向量 $\vec{n}$ 偏移指定的距离 D，即可得到贴近飞行航线，如图 6 所示。

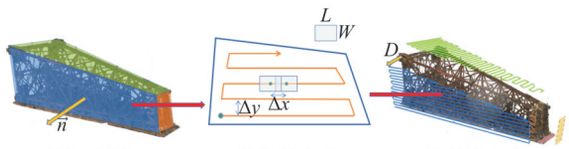


图 6 外部贴近航线规划示意图

Fig. 6 Schematic Diagram of External Approach Route Planning

1.2.2 内部圆柱摄影测量航线规划

为了保证无人机在导管架内部飞行安全，需将导管架模型投影到水平面上，并计算指定区域内的最大内接圆，使得无人机尽可能远离导管架主体结构，避免与导管架主体结构发生碰撞（见图 7）。假设多边形为 $P=\{V_1, V_2, \cdots, V_n\}$，其中顶点 V_i 按顺时针顺序排列。每条边 E_j 由顶点 V_j 和 V_{j+1} 确定。对于多边形内部任意一点 (x, y)，通过最大化该点到每条边距离中的最小值，即可求得最大内接圆的圆心 $Q=(x_0, y_0)$。选取最大内接圆的圆心 Q 作为圆柱航线的中心，圆柱航线的环绕半径为 R，每层间隔环绕偏移角 θ 生成一个视点，圆心到该航点的单位向量为 N_i；飞行最大高度为 H，垂直偏移距离为 Δy，同外部贴近航线一致。因此，圆柱航线的航点位置 $P_{i,j}$ 的计算公式为：

$$N_i = \left(\cos(\theta_i), \sin(\theta_i), 0\right),\ 0 \leqslant i \leqslant \frac{360}{\theta} \tag{4}$$

$$P_{i,j} = Q + R \cdot N_i + \Delta y \cdot j,\ 0 \leqslant j \leqslant \frac{H}{\Delta y} \tag{5}$$

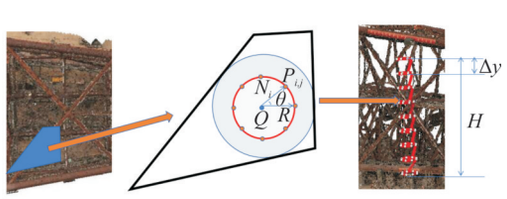


图 7 内部圆柱航线规划示意图

Fig. 7 Schematic Diagram of Internal Cylindrical Navigation Route Planning

2 摄影测量靶标自动测量与平差计算

2.1 靶标自动测量

为了应对靶标识别中所面临导管架施工场景的复杂光照、角度、距离对定位精度的影响，提出结合

深度神经网络智能识别与几何特征精确拟合定位的靶标自动测量方法。在靶标识别与定位的过程中,采用改进YOLOv8[18]进行靶标的识别。为了进一步提升测量精度,在识别到靶标ROI(Region of Interest)的基础上,进行靶标亚像素边缘检测,对靶标中心进行亚像素定位测量,整个流程如图8所示。

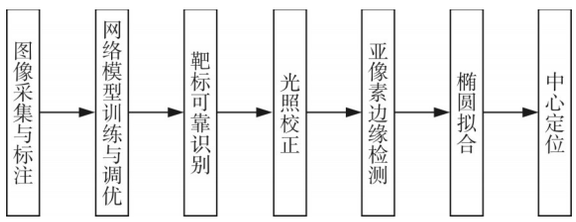


图8　靶标识别与定位流程

Fig. 8　Target Identification and Localization Procedure

(1)靶标识别。针对导管架场景下所面临的纹理重复、光照变化等问题,通过YOLOv8网络模型进行特征提取,通过将可变形卷积(deformable convolution network, DCN)加入主干网络中的C2f(CSPdarknet to 2-stage FPN)结构辅助提取受光照影响的重复特征,加入小目标检测层辅助提取较远距离的小靶标。使用多种弱纹理场景数据集进行模型训练(见图9)。

(2)靶标定位。首先对识别出靶标的图像进行图像增强。再对光照校正后的图像进行边缘检测及梯度计算,找出图像中靶标的边缘轮廓,并计算图像的梯度,以便更精确地定位边缘和确定靶标的形状,对检测到的边缘点进行亚像素边缘点修正。最后根据修正后的边缘点,使用椭圆拟合算法[19-20]对靶标的轮廓进行拟合,根据拟合出的椭圆参数,精确计算出靶标的中心位置(见图10)。

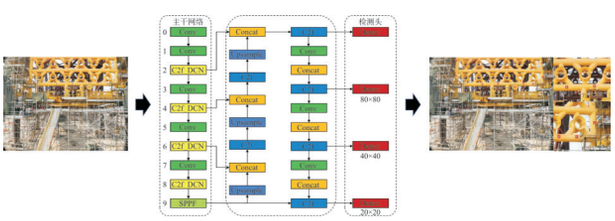


图9　靶标识别网络模型

Fig. 9　Target Identification Network Model

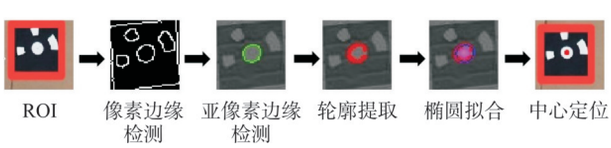


图10　靶标识别与定位

Fig. 10　Schematic Diagram of Target Identification and Localization

2.2　导管架关键点三维坐标计算

为进一步计算关键点三维坐标,利用摄影测量靶标二维像素坐标和全站仪测量的控制点三维坐标,进行光束法网平差,建立误差方程,以控制点空间坐标作为绝对约束进行迭代优化观测误差,并求解物方靶标点的空间坐标(见图11)。

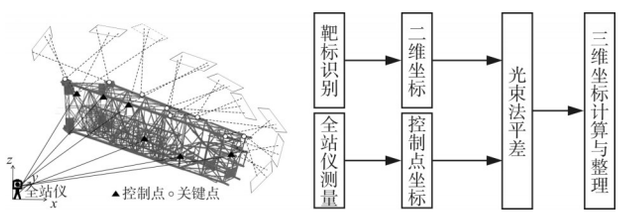


图11　导管架靶标三维坐标计算

Fig. 11　Measurement Process of Jacket Targets

3　实验验证与结果分析

3.1　靶标识别率验证

实验使用的靶标尺寸为20 cm×20 cm。真实场景、虚拟场景下的靶标图像共12 000张,每张图像包含6~10个靶标。使用CVAT开源标注工具[20]进行人工标注。数据集按照7:2:1的比例随机划分为训练集、验证集和测试集。实验分别选取本文方法与常见的摄影测量靶标识别软件Agisoft Metashape[21]及目标检测算法Faster-RCNN进行对比(见图12)。实验评价体系综合检测精度、召回率。



图12　不同场景编码靶标识别效果

Fig. 12　Effect of Coded Target Recognition in Different Scene

从不同观测距离的测试结果来看,在10~30 m范围内,本文方法的召回率始终高于其余方法。尤其在30 m远距离场景中,本文方法召回率达到85.10%,较Metashape软件提升13.5%,较Faster-RCNN提升14.9%。这表明本文方法对于靶标有着较好的提取能力(见表1)。

表 1 不同距离下识别精度统计表

Tab. 1 Statistical Table of Recognition Accuracy at Different Distances

距离	方法	精确率/%	召回率/%
10 m	Metashape	99.50	85.55
	Faster-RCNN	92.14	72.43
	本文方法	99.01	96.80
20 m	Metashape	98.65	75.71
	Faster-RCNN	88.72	79.40
	本文方法	99.36	87.80
30 m	Metashape	99.56	71.60
	Faster-RCNN	83.85	70.20
	本文方法	98.90	85.10

3.2 无人机摄影测量精度验证

由于现场施工对测量的影响，在中国广东某型深水导管架建造场地选取一块 300 m×5 m 的测区进行精度验证（见图 13、图 14），布置了两行 10 m 间隔的圆形靶标，共 60 个待测点靶标及 4 个控制点靶标使用 20 m 及 40 m 航高、60% 的航向及旁向重叠率，通过正射、倾斜两个架次进行了摄影测量，通过靶标提取和光束法平差解算 64 个靶标的三维坐标。使用全站仪获取了 64 个靶标的坐标值作为真值，使用首尾 4 个控制点靶标进行坐标转换。对 20 m 航高的图像解算结果进行坐标转换后同全站仪的测量结果进行统计分析，如图 15 所示。

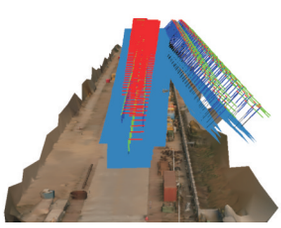


图 13 300 m 范围影像

Fig. 13 Schematic Diagram of Image Matching Within a 300 m Range



图 14 300 m 范围摄影测量实验场景

Fig. 14 Photogrammetry Experimental Scene Within a 300 m Range

对于 300 m×5 m 的测区范围内，不同次测量结果的误差均在 4 mm 以内，表明本文方法在靶标增强的摄影测量有着较高的精度，相对精度达到了 5 mm/300 m。

3.3 导管架关键点三维坐标测量应用

如图 16，选取广东某地真实深水导管架进行测试，导管架整体长约 120 m，顶部宽度约 60 m，底部

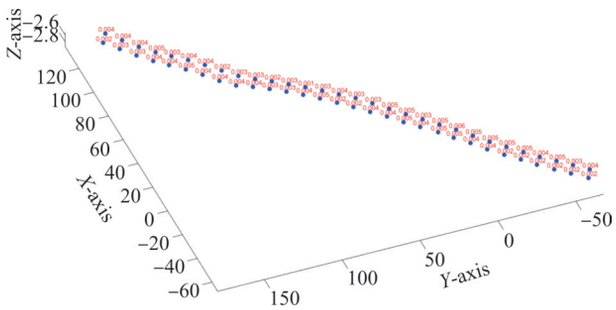


图 15 300 m 区域摄影测量精度验证结果

Fig. 15 Results of Accuracy Verification for Photogrammetry Within a 300 m Range

约 30 m。测量前在导管架上布设靶标，使用徕卡 TS60 全站仪[22]（精度为 ±2 mm+ 2 mm/1 000 m）测量多个靶标中心的三维坐标，作为控制点和检查点。使用大疆 M300 RTK 搭载 P1 相机进行外部摄影测量，采用大疆 M3E 无人机沿内部航线飞行补拍。通过控制点与影像联合平差算法解算靶标中心的三维坐标，并与检查点对比评价测量精度[23-33]。

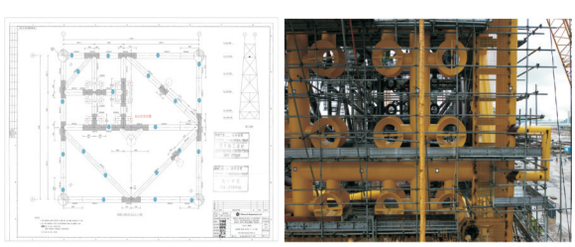


图 16 导管架图

Fig. 16 Jacket Diagram

3.3.1 导管架现场测量

分别对两个导管架的桁架连接点及拐点按照 7～10 m 的间隔及井口中心位置进行了靶标的布设（以图 17 为例），根据导管架的桁架结构特点，对导管架进行了内部和外部的航线规划。



（左图蓝色标志为摄影测量靶标）

图 17 靶标布设示意图

Fig. 17 Schematic Diagram of Target Placement

为了验证摄影测量的精度，使用高精度全站仪徕卡 TS60 获取了靶标在工程坐标系下的坐标值。图像数据采集使用大疆 M300 RTK 无人机（搭载大疆禅思 P1 相机）及 M3E 无人机。其中 P1 相机视点

距离目标约 30 m,对导管架整体采集了正射、倾斜影像,对各层井口按照圆柱航线采集影像(见表 2)。

表 2　导管架数据采集概况

Tab. 2　Overview of Jacket Data Collection

外部航线摄影测量			内部航线摄影测量			控制点测量
测量方式	采集时间/min	影像数量/张	测量方式	采集时间/min	影像数量/张	测量方式
DJI M300	120	2 084	DJI M3E	25	366	全站仪

为了对比全站仪测量靶标坐标真值与本文摄影测量方法所得靶标坐标值,使用本文方法对导管架影像进行预处理。首先,使用全站仪实测的控制网作为工程坐标系,通过布设的摄影测量靶标作为过渡点建立共线方程与空间相似变换模型,结合特征匹配算法实现影像匹配(见图 18、图 19),采用光束法平差优化空间坐标,最终解算得到工程坐标系的井口点的三维坐标。

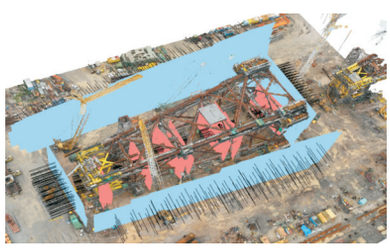


图 18　导管架影像

Fig. 18　Schematic Diagram of Jacket Image Matching

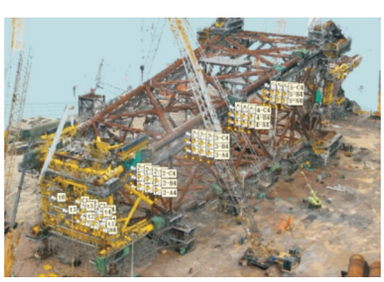


图 19　导管架井口点

Fig. 19　Jacket Wellhead Point

3.3.2　测量结果及精度分析

导管架井口共五层,每层 12 个井口。本文通过导管架的六个控制点,对各个井口靶标关键点进行了摄影测量解算和坐标转换,随后将摄影测量提取的关键点与全站仪获取的 32 个检查点坐标进行了对比分析,残差分布见图 20。从表 3 中可以看出,本文所使用的摄影测量方法的误差不超过 5 mm。

4　结束语

1)针对传统无人机摄影采集数据缺失的问题,通过导管架多视角摄影测量航线规划对导管架外部和内部分别进行贴近航线和圆柱航线规划,能够在 3 小时内完成导管架多视角图像的采集,对导管架整体结构覆盖率符合指标,图像质量符合后续测量解算需求,能够实现复杂导管架高精度测量。

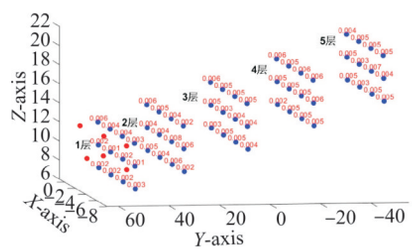


图 20　导管架单个井口距离精度

Fig. 20　Individual Wellhead Distance Accuracy of Jacket

表 3 导管架全站仪测量与摄影测量结果精度对比/mm

Tab. 3　Comparison of the Accuracy of the Total Station Measurement Results of the Jacket with the Photogrammetry Results/mm

	δX	δY	δZ	点位
中误差	3.1	2.8	2.7	4.9

2)针对导管架结构纹理重复、结构复杂、光照变化的特点,通过在导管架结构布设靶标,辅助影像匹配,并作为全站仪测量基准点能够实现导管架靶标的高质量数据采集和高精度坐标解算。

3)通过本文靶标点坐标测量方法,能够在导管架结构上实现高精度的靶标测量,随后进行密集图像匹配,以全站仪测量控制点作为基准,通过光束法平差,最终解算井口点坐标。经验证,无人机摄影测量结果精度与全站仪测量结果在 300 m 范围内达到 5 mm,满足实际测量需求。

本文方法对于导管架等大型工业设施快速高精度测量具有良好的推广应用价值。未来将进一步探索基于自主无人机的导管架等复杂工业设施快速精密测量方法。

参 考 文 献

[1]　许晨. 2024 年油气行业上游投资预计温和增长[N]. 中国石油报, 2024-03-26(007)

[2]　林天威, 胡智. 海基一号导管架总装方法选择与实践[J]. 装备制造技术, 2023(8): 204-207

[3]　张士舰, 杨青峰, 李小红, 等. 一种精确测量深水导管架井口导向空间位置的新方法[J]. 石油工程建设, 2019, 45(1): 88-92

[4]　张士舰, 杨青峰, 杨现阳, 等. 消除地球曲率对超大型导管架高程影响的方法[J]. 天然气与石油, 2022, 40

(1)：132-138
[5] 李景福，冯斌．番禺34-1油田导管架测量控制网的建立及应用[J]．中国海上油气，2014，26(3)：127-130
[6] 刘春杰，张士舰，李小红，等．一种导管架整体尺寸检测的方法[J]．测绘工程，2014，23(2)：39-44
[7] 刘荣坤，杨青峰，李家军，等．三维坐标控制网在大型模块尺寸控制中的应用[J]．海洋工程装备与技术，2018，5(4)：274-277
[8] 王洪．全站仪自由设站法精度分析及应用研究[J]．测绘与空间地理信息，2016，39(4)：82-85
[9] 赵鹏志，黄立涛．浅谈深水导管架井口同心度控制方法[J]．广东造船，2024，43(4)：70-72
[10] 刘彬，李学成，曾晋，等．水下三维激光扫描在导管架平台损伤测量中的应用[J]．广西科学院学报，2020，36(4)：434-440
[11] Siebert S，Teizer J．Mobile 3D Mapping for Surveying Earthwork Projects Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System [J]．Automation in Construction，2014，41：1-14
[12] James M，Robson S，d'Oleire-Oltmanns S，et al．Optimising UAV Topographic Surveys Processed with Structure-from-Motion：Ground Control Quality，Quantity and Bundle Adjustment[J]．Geomorphology，2017，280：51-66
[13] 杨硕洁，陈庭．一种基于无人机影像的高精度地表形变提取方法[J]．武汉大学学报(信息科学版)，2025，50(9)：1 928-1 938
[14] Bemis S P，Micklethwaite S，Turner D，et al．Ground-Based and UAV-Based Photogrammetry：A Multi-scale，High-Resolution Mapping Tool for Structural Geology and Paleoseismology [J]．Journal of Structural Geology，2014，69(A)：163-178
[15] 马晗，黄鹏飞．无人机倾斜摄影测量在竣工规划核实测绘中的应用[J]．现代测绘，2024，47(S1)：70-73
[16] 彭飞，王艳艳．无人机倾斜摄影与地面激光点云融合建模[J]．经纬天地，2025(1)：49-52
[17] 王文韫，李学军，陈安华．一种字符编码标志识别定位方法[J]．测绘科学，2020，45(3)：122-127
[18] Varghese R，Sambath M．YOLOv8：A Novel Object Detection Algorithm with Enhanced Performance and Robustness[C]//Proceedings of the 2024 International Conference on Advances in Data Engineering and Intelligent Computing Systems (ADICS)，2024：1-6，doi：10.1109/adics58448.2024.10533619
[19] 黄桂平．圆形标志中心子像素定位方法的研究与实现[J]．武汉大学学报(信息科学版)，2005，30(5)：388-391
[20] CVAT．CVAT Overview[EB/OL]．[2024-03-26]．https://docs.cvat.ai/docs/getting_started/overview/
[21] Agisoft．Agisoft Metashape[EB/OL]．[2024-03-26]．https://www.agisoft.com/
[22] Sukhovilov B M，Sartasov E M，Grigorova E A．Improving the Accuracy of Determining the Position of the Code Marks in the Problems of Constructing Three-Dimensional Models of Objects[C]//Proceedings of the 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering，Applications and Manufacturing (ICIEAM)．IEEE，2016：1-4，doi：10.1109/ICIEAM.2016.7911682
[23] Cera V，Campi M．Fast Survey Procedures in Urban Scenarios：Some Tests with 360° Cameras[J]．The International Archives of the Photogrammetry，Remote Sensing and Spatial Information Sciences，2022，48(2/W1)：45-50，doi：10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-45-2022
[24] Herban S，Costantino D，Alfio V S，et al．Use of Low-Cost Spherical Cameras for the Digitisation of Cultural Heritage Structures into 3D Point Clouds[J]．Journal of Imaging，2022，8(1)：13
[25] Janiszewski M，Torkan M，Uotinen L，et al．Rapid Photogrammetry with a 360-Degree Camera for Tunnel Mapping[J]．Remote Sensing，2022，14(21)：5494
[26] 陶聪，施云，张丽艳．基于卷积神经网络的汉字编码标记点检测识别[J]．仪器仪表学报，2019，40(8)：191-200
[27] 王文颖．工程与近景摄影测量[M]．北京：测绘出版社，1994
[28] Liu L，Xia X，Sun H，et al．Object-Aware Guidance for Autonomous Scene Reconstruction [J]．ACM Transactions on Graphics，2018，37(4)：1-12
[29] Zhou X，Zheng H，Xu X，et al．Predicting Grain Yield in Rice Using Multi-temporal Vegetation Indices from UAV-Based Multispectral and Digital Imagery[J]．ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing，2017，130：246-255
[30] 张祖勋．数字摄影测量与计算机视觉[J]．武汉大学学报(信息科学版)，2004，29(12)：1 035-1 039
[31] 张祖勋．从数字摄影测量工作站(DPW)到数字摄影测量网格(DPGrid)[J]．武汉大学学报(信息科学版)，2007，32(7)：565-571
[32] 韦春桃，张祖勋，张剑清，等．分层Fourier-Melin变换相位相关的影像匹配初始视差的自动获取方法[J]．武汉大学学报(信息科学版)，2015，40(4)：452-456
[33] Zhang Z，Ke T，Guo D，et al．The Appication of Digital Photogrammetry Grid in the Fast Response for Wenchuan Earthquake Rescue [J]．Engineering Sciences，2009，11(6)：54-62

修回日期：2026-06-09

第一作者：杨现阳，高级工程师，主要从事海洋工程精控制工作及研究。E-mail：yangxy22@cnooc.com.cn

通信作者：陈智鹏，特聘研究员，助理教授，主要从事精密工程测量工作及研究。E-mail：chenzp1990@szu.edu.cn