文章编号：1003-1421(2026)04-0034-08
引用格式：邵泽展，侯晓鹏，姜璐，等. 基于无人机倾斜摄影的编组站驼峰线路平纵断面测量方法研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(4)：34-41.
SHAO Zezhan，HOU Xiaopeng，JIANG Lu，et al. Study on Measurement Method for Horizontal and Vertical Profiles of Hump Lines in Marshalling Stations Based on UAV Oblique Photogrammetry[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(4)：34-41.

基于无人机倾斜摄影的编组站驼峰线路平纵断面测量方法研究

邵泽展[1]，侯晓鹏[2]，姜　璐[2]，全一明[3]，沃华欧[2]，陈文君[4]，陈世安[3]

(1.中国铁路西安局集团有限公司 新丰镇车站，陕西 西安　710600；2.中国铁道科学研究院集团有限公司 通信信号研究所，北京　100081；3.宁波市天一测绘设计研究有限公司，浙江 宁波　315100；4.国图测绘科技(浙江)有限公司，浙江 宁波　315100)

摘　要：保持驼峰平纵断面的良好状态，是编组站驼峰作业高效、安全进行的基础条件。为解决驼峰线路传统水准测量效率低、干扰大且难以捕捉短距坡度变化的问题，开展基于无人机倾斜摄影三维重建的驼峰平纵断面高效测量方法的研究。通过无人机倾斜摄影采集新丰镇编组站驼峰场区域的数据，并结合24个像控点构建实景三维模型，从中提取轨道数字线划图，生成驼峰连续平纵断面及坡度曲线。结果表明：该方法可精准捕捉传统离散测量遗漏的局部坡度波动，在无遮挡条件下，控制点平面与高程精度分别达到1.8 cm和0.9 cm；与同期地面激光扫描点云数据对比，其高程测量中误差为2.7 cm，验证了该方法具备良好的测量一致性。此外，与传统方法相比，该技术使实地数据采集效率显著提升5~10倍。本研究为编组站驼峰线路高频次、非接触式监测提供了技术支撑，同时可为驼峰控制系统参数动态优化提供现势性数据基础。

关键词：无人机倾斜摄影；编组站；驼峰场；平纵断面测量；铁路信息化
中图分类号：U212.24^{+}1　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250805002

Study on Measurement Method for Horizontal and Vertical Profiles of Hump Lines in Marshalling Stations Based on UAV Oblique Photogrammetry

SHAO Zezhan[1]，HOU Xiaopeng[2]，JIANG Lu[2]，QUAN Yiming[3]，WO Huaou[2]，CHEN Wenjun[4]，CHEN Shian[3]

(1. Xinfengzhen Station, China Railway Xi'an Group Co., Ltd., Xi'an 710600, Shaanxi, China; 2. Communication and Signal Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 3. Ningbo Tianyi Design Research of Surveying & Mapping Co., Ltd., Ningbo 315100, Zhejiang, China; 4. Geotron Surveying and Mapping Technology (Zhejiang) Co., Ltd., Ningbo 315100, Zhejiang, China)

Abstract: Maintaining the good condition of horizontal and vertical profiles of the hump is the fundamental condition for efficient and safe hump operations in marshalling stations. To address the problems of low efficiency, high interference, and difficulty in capturing short-range gradient changes in traditional leveling measurement of hump lines, research on an efficient measurement method for horizontal and vertical profiles of humps based on three-dimensional (3D) reconstruction

收稿日期：2025-08-05
基金项目：中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2022YJ217)

from unmanned aerial vehicle (UAV) oblique photogrammetry was conducted. Data of the hump area at Xinfengzhen Marshalling Station was collected through UAV oblique photogrammetry, and a real-scene 3D model was constructed in combination with 24 image control points. Railway track digital line graphs (DLGs) were extracted from the model to generate continuous horizontal and vertical profiles and gradient curves. The results show that this method can accurately capture local gradient fluctuations missed by traditional discrete measurements. Under unobstructed conditions, the accuracy for control points reaches 1.8 cm in plane and 0.9 cm in elevation. Comparison with concurrent ground laser scanning point cloud data shows an elevation root mean square error of 2.7 cm, verifying the method's strong measurement consistency. In addition, compared with traditional methods, fieldwork efficiency is significantly improved by 5~10 times. This paper provides technical support for high-frequency and non-contact monitoring of hump lines in marshalling stations and provides a current data basis for dynamic optimization of hump control system parameters.

Keywords: UAV Oblique Photogrammetry; Marshalling Station; Hump Yard; Horizontal and Vertical Profile Measurement; Railway Informatization

0　引言

铁路货运在我国货物运输中占据着重要地位，其技术装备正持续向自动化、智能化方向发展[1-2]。编组站驼峰场作为铁路货运的核心作业节点，其平纵断面保持良好的设计状态，是保障作业安全与效率的基础[3-4]。然而，在长期运营荷载作用下，轨道几何形变难以避免，导致设计坡度发生变化，进而影响驼峰调速效果并带来安全隐患。因此，对驼峰的平纵断面进行定期、精确地测量，对于维持线路设计状态和优化驼峰控制系统参数至关重要[5-6]。传统的水准测量方法虽然精度较高，但需要花费大量的时间，且对运输生产的干扰较大。对一个中能力驼峰进行一次平纵断面测量往往耗时数周，高成本和长周期导致测量工作常常被拖延或取消。这导致驼峰控制系统时常缺乏现势性数据支撑，控制参数只能依据设计坡度设置[7]，影响系统调试效果与最终控制精度。近年来铁路智能化发展迅速，探索高效、精准、非接触式的驼峰平纵断面测量技术已成为迫切需求。

无人机摄影测量技术已经在铁路线路规划选线、测量监测、缺陷检测等领域得到了诸多应用。在铁路勘察领域，无人机航空摄影相比传统勘察方法，在安全性、精度和效率方面存在显著优势[8]。洪英杰等[9]基于无人机影像数据，利用自适应动态规划算法实现了铁路多目标智能选线及优化。王广帅[10]利用无人机倾斜摄影对铁路轨道进行高精度重建，可以达到2 cm左右的平面和高程绝对定位精度。从无人机影像数据生成的稠密点云，可提取钢轨候选点建立轨道的三维模型[11]，也可以用于标定轨道轴线[12]，这些应用可达到2~3 cm的精度，满足铁路技术监测和测量制图等应用需求。Wu等[13]提出一种基于无人机影像的轨道点云分割与BIM模板匹配方法，用于精确测量轨道几何参数。利用无人机影像，Bojarczak等[14]提出一种基于深度神经网络的钢轨劈裂缺陷检测方法，对宽度≥6.9%轨头的缺陷识别率达81%。

上述研究充分证明了无人机摄影测量技术在铁路轨道信息获取方面的巨大潜力与应用价值。然而，这些成果主要集中于常规铁路线路或站场普速区段。对于编组站驼峰场这一特殊场景，其线路特别是溜放部分坡度变化剧烈、道岔结构复杂密集且测量作业受运输生产严格限制。目前利用无人机倾斜摄影技术针对该场景进行系统性测量研究与实践相对缺乏，尤其在复杂驼峰环境下捕捉微小坡度变化的精度与可靠性有待深入验证。

为克服传统水准测量的局限，本研究提出了一种基于无人机倾斜摄影的驼峰线路三维重建与断面高效测量方法。该方法旨在显著提升测量效率、降低安全风险与作业成本，并为驼峰控制系统提供高精度、现势性强的平纵断面基础数据支撑。研究以中国铁路西安局集团有限公司新丰镇编组站上行驼峰为案例，该驼峰为双推双溜作业模式，设计峰高约为4.16 m，设有2条推送线、1个峰顶平台，峰下分为6个线束共47条调车线，是中国铁路网中典型的双向纵列式三级七场编组站核心作业区。该驼峰曾因纵断面原因存在车组溜放不到位的问题。随着普速铁路装备不断升级改造，新丰镇站作为全国最

大的路网性编组站之一，日均办理辆数已突破4万辆。驼峰现场环境场地开阔、无大型建筑物或植被遮挡，符合无人机航测对地表可视化的要求，为验证本研究的方法在理想条件下的精度提供了可靠场景。

本研究的主要创新在于：①系统地将无人机倾斜摄影技术应用于结构复杂的编组站驼峰场；②构建了从数据采集、三维重建到纵断面提取的全流程方法；③验证了该方法高效捕捉连续坡度变化方面的优势，为驼峰调速系统的精细化管理提供了新的技术方案。

1　基于倾斜摄影测量的驼峰线路断面测量方法

1.1　数据采集

无人机航测数据采集流程如图1所示，主要包含航线规划、像控点布设、像控点测量、无人机航摄等步骤。为适应编组站有限的维护天窗时间，像控点测量与无人机航摄同步进行。

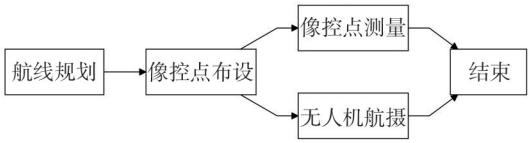


图1　无人机航测数据采集流程

Fig.1　Aerial survey data collection workflow of UAV

数据采集采用大疆Matrice 350 RTK无人机平台，搭载禅思P1全画幅航测云台相机。该组合可同步获取正射与倾斜影像，高分辨率采集地物侧面纹理，满足复杂轨道结构三维重建需求。本研究设计地面采样距离(GSD)为1 cm。为满足该精度，本研究采用理论计算与工程经验结合的方式制定航摄方案。基于f=35 mm焦距与像元尺寸p=4.38 μm的传感器参数，通过航高计算公式$H=(f\times GSD)/p$确定设计航高H为80 m。航摄规划设定航向重叠度80%与旁向重叠度70%，采用一组平行的航线方案，通过无人机云台在飞行中周期性摆动镜头，分别拍摄前、后、左、右、下5个视角的影像，实现测区全域覆盖，确保峰顶、道岔群等轨道关键区域的多视角影像冗余度。像控点布设遵循“分区均匀、重点加密”原则，在测区内按航向和旁向间隔≤130 m的标准布设像控点。测区像控点分布如图2所示，实际布设时为保证像控点的可视性，尽可能避让了股道内停留的车辆。像控点平面与高程坐标采用华测X12 RTK测量仪采集。实地数据采集于2025年5月12日12:00至16:00实施，当天为多云天气，光照均匀，风速<4 m/s，满足航测需求。为获取地面参考数据用于模型精度验证，本研究在无人机航摄间隙，同步使用了其域灵光L2Pro手持式三维激光扫描仪(测量精度1 cm)对驼峰关键坡段进行了扫描。该设备无需设站，操作员可手持进入测区快速作业。扫描作业覆盖了加速坡、中间坡以及部分道岔区段，确保了与航测数据在时空上的一致性。

1.2　驼峰线路三维重建与断面测量方法

数据处理流程如图3所示。首先对获取影像数据进行质量筛查，剔除因运动模糊、镜头眩光等因素导致的无效影像。完成预处理后，采用大疆智图软件进行空中三角测量(以下简称“空三”)，其核心基于运动恢复结构(Structure from Motion，SFM)算法。SFM是一种从无序多视角影像中自动恢复相机位姿和场景三维结构的计算机视觉方法[15-16]。其典型流程为：首先从每张影像提取局部特征点，通过特征匹配建立影像间的对应关系；随后利用增量或全局优化方法估计相机的位姿和稀疏点云；最后，通过光束法平差优化重建结果，最小化重投影误差。在本研究中，SFM算法处理倾斜摄影获取的多视角影像，实现了相机位姿和场景点的稳健解算，为后续密集三维重建奠定了高精度基础。在获得优化后的

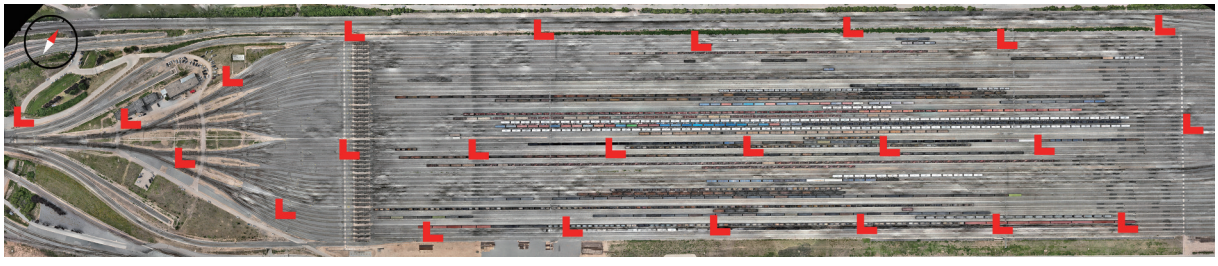


图2　测区像控点分布

Fig.2　Ground control point distribution in survey area



图3　数据处理流程

Fig.3　Data processing workflow

相机参数与稀疏点云后，即可进行密集三维重建。基于空三结果，采用多视图立体(Multi-View Stereo，MVS)生成三角网模型，再映射纹理生成OSGB格式的实景三维模型。最后在三维模型基础上，通过专业测图软件(如南方CASS)绘制含高程信息的轨道线，绘制的驼峰线路数字线划图输出为DXF格式。

需要指出的是，对于钢轨这类光滑、弱纹理的狭长目标，基于影像的三维重建技术在其顶面局部区域可能出现噪点或锯齿状变形。这主要是因为该类地物缺乏丰富的视觉特征，导致多视角影像间的密集匹配存在不确定性。为规避此类局部变形对最终测量精度的影响，本研究在提取轨道线划图时，采用人工辅助的半自动矢量化方法。钢轨三维模型局部变形与线划图采集方法如图4所示。操作员在三维模型上勾画轨道线时，可主动规避存在凹陷、锯齿等重建质量不稳定的区域，转而选择几何结构更稳定、清晰的轨顶区域进行绘制。这样可以有效地隔离模型局部缺陷，确保线划图的精度主要取决于空三整体精度、像控点精度以及操作员采集精度。当然，从根本上改善钢轨顶面的模型质量(比如融合激光点云数据)仍将是未来的研究方向。



图4　钢轨三维模型局部变形与线划图采集方法

Fig.4　Local deformation of rail 3D model and DLG collection method

基于提取的轨道线，采用下列步骤即可获取轨道中线的断面图。①使用动态时间规整方法(DTW)[17]匹配2条轨道多段线的所有节点；②计算匹配线段的中线，生成轨道中心线；③计算中心线各线段的长度，通过累加节点间距获取各节点对应的里程；④根据里程和高程序列，计算各坡段的坡度。

2　坡度计算及结果分析

驼峰线路测量的核心是精确获取轨道中线的平面位置与高程，其精度直接关系到溜放车的安全与效率。根据《铁路工程测量规范》(TB 10101—2018)[18]，驼峰平面和高程测量的控制精度需要达到CPⅢ控制网的要求，平面和高程测量中误差通常需要控制在≤20 mm。为满足这一要求，传统上主要依赖全站仪与水准测量，而本研究采用的无人机倾斜摄影测量技术与传统方法相比，在多个方面存在显著差异，无人机倾斜摄影测量与传统全站仪/水准测量方法对比如表1所示。

本次实验结果充分印证了该方法的理论优势，成功获取了新丰镇编组站上行驼峰区域的高精度三维实景模型及轨道数字线划图。空三解算结果显示，控制点的平面位置均方根误差为1.8 cm，高程均方根误差为0.9 cm，表明其几何精度可以满足驼峰控制≤2 cm的测量要求。编组站三维模型及线路数字线划图如图5所示，该结果包含了47条溜放线双轨的平面位置与高程信息，充分体现了该方法高效、全面的数据获取能力。基于数字线划图，可清晰辨识线路的平面几何特征，包括直线段、曲线段(及其半径)、道岔位置及其连接关系等关键要素，可以为后续的断面测量提供基础数据。

在平面测量方面，实验高效获取了整个驼峰场

表1　无人机倾斜摄影测量与传统全站仪/水准测量方法对比

Tab.1　Comparison between UAV oblique photogrammetry and traditional total station/leveling methods

对比维度	无人机倾斜摄影测量	传统全站仪/水准测量
测量效率	极高，采集大量数据，外业时间不超过1 d	极低，逐点测量，外业时间通常需要数周
作业成本	低，主要为设备与后期数据处理(内业)人力投入	高，需要大量数据采集(外业)人力投入
安全性	高，非接触式测量，基本不影响铁路运营	低，人员需上线作业，安全风险高，需申请天窗点
数据连续性	连续，可获得轨道表面的连续三维模型	离散，仅能获得预设测点处的离散数据
绝对精度	受像控点、航高、相机等因素影响，可达厘米级	高，理论上可达到毫米级
抗遮挡能力	弱，受车辆、构筑物遮挡影响大	强，可通过设站方式灵活规避遮挡

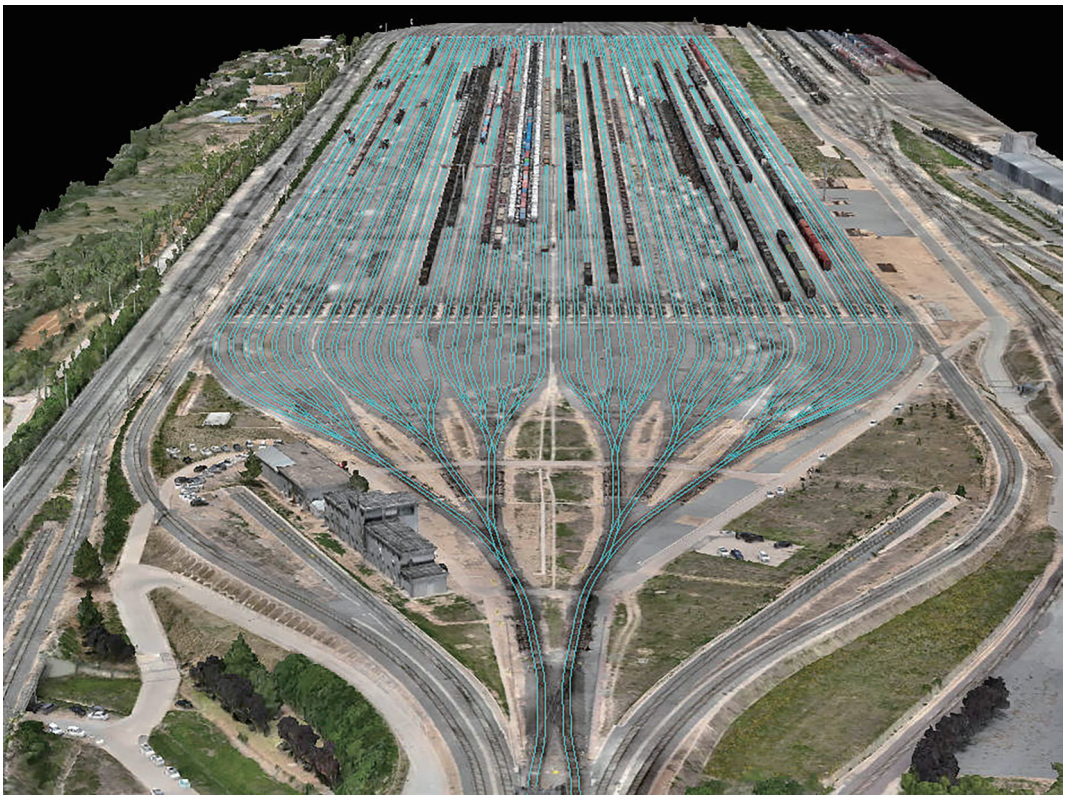


图5　编组站三维模型及线路数字线划图
Fig.5　3D model of marshalling station and railway DLG

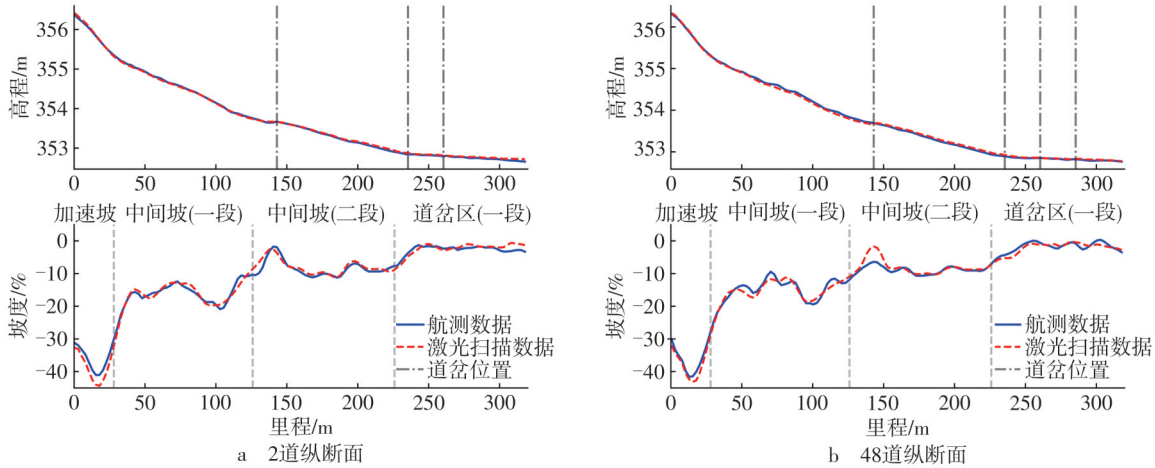
区所有溜放线路的平面坐标。从生成的三维模型和数字线划图中地物边缘的清晰度、几何结构的连贯性，以及空三解算得到的平面位置均方根误差(1.8 cm)来看，该方法能够提供满足驼峰线路平面测量精度要求的数据。获取的平面信息为分析线路走行曲线、道岔布置的几何精度以及线路间距等参数提供了关键依据。结合纵断面数据，本方法为全面掌握驼峰线路的空间几何状态提供了完整支撑。

通过三维重建与断面测量方法提取轨道中心线并计算对应里程，获取所有线路的纵断面及坡度后，为系统评估航测结果的可靠性，本研究从精度验证与历史对比2方面展开分析。为直接验证航测模型的高程精度，选取典型的2道(推1线)和48道(推2线)，驼峰2道(推1线)和48道(推2线)平面位置示意图如图6所示。将基于航测模型提取的纵断面与同期手持激光扫描点云数据提取的纵断面进行对比。驼峰2道和48道航测及激光扫描纵断面如图7所示。结果表明，两者在高程方向的偏差均值为0.4 cm，均方根误差为2.7 cm，尽管该精度略低于传统测量规范中CPⅢ控制网的精度要求(≤20 mm)，但考虑到



图6　驼峰2道(推1线)和48道(推2线)平面位置示意图
Fig.6　Schematic diagram of plan position of Track 2 (Push Line 1) and Track 48 (Push Line 2) in hump

航测技术的特点及驼峰调速系统的实际需求，此精度水平仍可满足工程应用的要求。对比中发现，在48道第1个道岔区段，航测数据与激光扫描数据存在一定差异：激光数据显示该处坡度约为−2‰，与2道情况基本一致；而航测数据则显示为−6‰，曲线相对平滑。这一差异可能与道岔区复杂的几何结构及现场条件有关。道岔区域轨道线型变化复杂，可能对影像的纹理特征提取与三维重建精度造成影



a　2道纵断面
a　Vertical profile of Track 2

b　48道纵断面
b　Vertical profile of Track 48

图7　驼峰2道和48道航测及激光扫描纵断面

Fig.7　Vertical profiles from aerial survey and laser scanning for Hump Track 2 and Track 48

响，从而导致局部坡度提取结果存在偏差。

在此基础上，进一步将航测坡度值与2023年第1季度基于水准测量的复测设计值结果[19]进行对比，来分析坡度状态的历时变化。纵断面航测与复测设计对比如表2所示。整体来看，航测坡度值变化趋势与复测设计值基本吻合，但在具体坡段存在一定差异。例如，在加速坡段，推1线航测最陡坡度为−40‰，推2线为−42‰，而推2线历史设计值为−42.2‰。推2线航测数据与历史值高度吻合表明，结合点云数据，推1线该处−40‰的测量值可能存在一定的测量误差。此外，在中间坡(一段)和中间坡(二段)，航测最陡坡度均大于复测设计值(−14.8‰和−9.4‰)。这些差异既可能源于测量间隔期内线路结构的自然沉降或维护调整，也可能反映了航测方法在局部区域可能存在精度波动。尽管如此，航测方法在捕捉连续坡度变化方面仍展现出显著优势。

航测结果的精度受多种因素影响，其中现场遮挡物是主要影响因素。现场临时停放的车辆对线路的测量造成遮挡如图8所示，股道内停留的车辆会导致其下方轨道无法测量，并可能对邻近轨道造成遮挡。这些遮挡直接导致对应区域数据缺失或精度下降。需要强调的是，本次测量所验证的精度水平是在空旷无遮挡的理想测区条件下取得的。密集的接触网、大型建筑物或大量停放车列等复杂环境会显著降低数据质量和可用性。因此，本方法在编组站应用时需优先选择运营间隙或线路空闲时段进行航测。

与传统水准测量方法相比，无人机倾斜摄影测量展现出显著的效率优势。本次无人机测量总耗时统计如下：外业飞行(含起降、换电池)耗时3.5 h，投入1组人员(飞手和观察员)，计4组工时；像控点布设与测量耗时4 h，计4组工时；内业空三与三维重建处理耗时6 h(硬件环境：AMD Ryzen 5800X CPU，NVIDIA RTX3070 GPU)。传统水准测量方法对同等规模的站场进行纵断面测量，通常需多组测绘人员协作，外业工作往往持续数周。

综合对比表明，无人机测量方法的整体效率可达传统水准测量方法的5~10倍。效率提升主要源于2个方面：无人机平台具备大面积快速覆盖能力，

表2　纵断面航测与复测设计对比

Tab.2　Comparison between aerial survey and verification survey design of vertical profiles

坡段名称	设计坡长/m	复测设计坡度/‰	航测坡度/‰	规范要求/‰
加速坡	28	−42.2	−30~−40	−40~−45
中间坡(一段)	98	−14.8	−12~−21	−14~−18
中间坡(二段)	100	−9.4	−2~−12	−8~11
道岔区(一段)	90~100	−2.1	−1~−3	−2~−3
道岔区(二段)	88~118	0~0.6	−1~0.6	≤0.6

注：复测设计数据和规范要求来源于文献[19]。



图8　现场临时停放的车辆对线路的测量造成遮挡

Fig.8　Obscuring of line measurement by temporarily parked vehicles on site

单次飞行即可采集海量数据；非接触式测量特性使其可在不影响编组站正常运营的情况下安全作业。该方法为编组站驼峰线路的高效、常态化监测提供了切实可行的技术路径。

3　结论

本研究系统性地探索了无人机倾斜摄影测量技术在编组站驼峰线路平纵断面测量中的应用。通过构建从数据采集、三维建模到轨道信息提取的全套技术流程，实现了对运营受限环境下大型站场轨道基础设施的快速、高精度数字化重建。该方法的核心优势在于其非接触式测量特性以及捕捉轨道几何连续变化的能力。基于新丰镇编组站上行驼峰场的实证研究，主要结论如下。

（1）无人机倾斜摄影技术能够高精度重建驼峰场的复杂线路结构。空三解算结果表明，控制点平面与高程精度分别达到1.8 cm和0.9 cm，满足驼峰控制的精度需求。该方法尤其擅长捕捉到传统离散点测量可能遗漏的局部坡度波动，为线路坡度优化提供了更精细的数据依据。

（2）在测量效率上，本方法优势显著。针对47条调车线的测量任务，外业(含航飞与像控)仅需7.5 h，内业处理约6 h，整体效率较传统测量提升5~10倍。其非接触、快响应的特性，为驼峰线路常态化监测提供了技术可行性。

（3）航测结果与2023年水准复测数据基本吻合，部分坡段的差异可能源于线路的自然沉降或维护调整。这既验证了本方法的可靠性，也凸显了实施高频次测量的必要性。本方法能有效解决传统测量数据滞后问题，支撑驼峰控制系统参数基于最新线路状态进行动态优化。

（4）本方法的有效性在理想空旷场景下得到了验证，但其数据完整性易受股道内停放车辆、密集接触网等遮挡物影响。因此，实际应用中应优先选择运营间隙或线路空闲时段作业，并需研究遮挡区域的补偿算法(如融合局部地面扫描数据)。复杂气象条件对航测精度的制约仍需系统评估[20]。

无人机倾斜摄影测量可为编组站驼峰场提供一套高精度、高效率、低干扰的平纵断面测量解决方案，不仅显著降低测量成本与安全风险，其生成的连续坡度曲线还可为驼峰调速系统参数优化、线路状态评估及预防性维护提供数据基础。随着铁路智能化发展，该技术有望成为驼峰数字化运维的核心环节，推动编组站作业从“定期检修”向“状态感知驱动”的转变。未来的研究可重点探索航测数据与驼峰控制系统的深度耦合，如基于连续坡度曲线的数据拟合方法、驼峰调速控制参数的自动优化算法，以期最终形成“测量–分析–控制”的闭环。

参考文献：

[1] 王　宇. 铁路货运区域联系及发展研究[J]. 铁路物流，2025，43(6)：1-5.
WANG Yu. Research on Regional Connection and Development of Railway Freight[J]. Railway Logistics，2025，43(6)：1-5.

[2] 邓　杰. 铁路智能化调车系统的研究[J]. 铁道运输与经济，2005，27(8)：61-63.
DENG Jie. Research of Railway Intelligent Shunting System[J]. Railway Transport and Economy，2005，27(8)：61-63.

[3] 吴家豪. 论21世纪中国铁路枢纽站场建设与研究设计方向[J]. 中国铁道科学，1999，20(4)：8-17.
WU Jiahao. The Development Direction of Construction，Research and Design of Railway Terminal and Yards of China in the 21 St Century[J]. China Railway Science，1999，20(4)：8-17.

[4] 姚振坤. 铁路危险货物运输安全风险分析及防范措施建议[J]. 铁路物流，2025，43(7)：40-43.
YAO Zhenkun. Safety Risk Analysis and Preventive Measures for Railway Dangerous Goods Transport[J]. Railway Logistics，2025，43(7)：40-43.

[5] 朱耀斌，孙晓楠，陈富宾. 驼峰平纵断面条件对脱轨安全性影响及整治方案研究[J]. 中国铁路，2015(8)：29-33.

[6] 侯晓鹏，秦晓光. 驼峰溜放过程控制系统及减速器建模仿真分析研究[J]. 铁道通信信号，2020，56(6)：5-9.
HOU Xiaopeng，QIN Xiaoguang. Research on Modeling and Simulation of Hump Rolling Process Control System and Reduce [J]. Railway Signalling & Communication，2020，56(6)：5-9.

[7] 汤百华. 自动化驼峰调速系统[M]. 北京：中国铁道出版社，1993.

[8] 王　栋，蒋良文，张广泽，等. 无人机三维影像技术在铁路勘察中的应用[J]. 铁道工程学报，2016，33(10)：21-24.
WANG Dong，JIANG Liangwen，ZHANG Guangze，et al. Application of Unmanned Aerial Vehicle 3D Imaging Technology in Railway Survey[J]. Journal of Railway Engineering Society，2016，33(10)：21-24.

[9] 洪英杰，高　岩，杨书生，等. 基于无人机数据和ADP算法的铁路线路多目标优化方法[J]. 铁道运输与经济，2025，47(4)：186-195，204.
HONG Yingjie，GAO Yan，YANG Shusheng，et al. Multi-Objective Optimization Approach for Railway Alignment Based on Unmanned Aerial Vehicle Data and Approximate Dynamic Programming Algorithm[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(4)：186-195，204.

[10] 王广帅. 无人机倾斜摄影铁路轨道线高精度自动重建[J]. 测绘通报，2022(5)：133-139，156.
WANG Guangshuai. High-Precision Automatic Reconstruction of Railway Line with UAV Oblique Photography[J]. Bulletin of Surveying and Mapping，2022(5)：133-139，156.

[11] SAHEBDIVANI S，AREFI H，MABOUDI M. Rail Track Detection and Projection-Based 3D Modeling from UAV Point Cloud[J]. Sensors，2020，20(18)：5220.

[12] BURDZIAKOWSKI P，SPECHT C，STATECZNY A，et al. Framework for Extracting Rails and Setting-out Railway Line Axis Based on UAV Photogrammetric Measurements[J]. International Journal of Rail Transportation，2024，12(1)：200-216.

[13] WU J J，PENG L M，SHENG W，et al. Track Gauge Measurement Based on Model Matching Using UAV Image[J]. Automation in Construction，2023，155：105070.

[14] BOJARCZAK P，LESIAK P. UAVs in Rail Damage Image Diagnostics Supported by Deep-Learning Networks[J]. Open Engineering，2020，11(1)：339-348.

[15] SNAVELY N，SEITZ S M，SZELISKI R. Modeling the World from Internet Photo Collections[J]. International Journal of Computer Vision，2008，80(2)：189-210.

[16] SCHÖNBERGER J L，FRAHM J M. Structure-from-Motion Revisited[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas：IEEE，2016：4104-4113.

[17] SAKOE H，CHIBA S. Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition[J]. IEEE Transactions on Acoustics，Speech，and Signal Processing，1978，26(1)：43-49.

[18] 国家铁路局. 铁路工程测量规范：TB 10101—2018[S]. 北京：中国铁道出版社，2018：76-77.

[19] 王玉梅，李缠虎. 新丰镇上行驼峰纵断面整修复测设计实践[J]. 西铁科技，2023(3)：31-33.

[20] 李启业，陈　耿，岑　铭，等. 机载激光雷达测量技术在冰川科学观测中的应用研究[J]. 广西水利水电，2024(4)：22-28.
LI Qiye，CHEN Geng，CEN Ming，et al. Research on Application of Airborne LiDAR Measurement Technology in Glacier Scientific Observation[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering，2024(4)：22-28.

(责任编辑　魏　然)