基于四旋翼无人机的宁夏羊场湾煤矿采煤沉陷量监测

高冠杰¹,侯恩科¹,谢晓深¹,徐友宁²,魏启明³,刘江斌³ GAO Guanjie¹, HOU Enke¹, XIE Xiaoshen¹, XU Youning², WEI Qiming³, LIU Jiangbin³

1.西安科技大学地质与环境学院,陕西西安710054;

2.中国地质调查局西安地质调查中心,陕西西安710054;

3.神华宁夏煤业集团宁煤羊场湾煤矿,宁夏灵武751400

1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Yangchangwan Mine, Shenhua Ningxia Coal Mining Group, Lingwu 751400, Ningxia, China

摘要:小型无人机遥感技术具有成本低、操作灵活便利等优点,在地质调查中的作用愈来愈重要。采煤地表沉陷量变形监测是 掌控采煤地表岩移变形规律和治理塌陷的关键性工作。重点探索四旋翼无人机遥感技术监测在羊场湾煤矿Y120212工作面 采煤沉陷量的监测研究,通过野外踏勘与控制点布设、无人机航线规划与执行、4D产品制作的工作程序和监测方法,探索无人 机遥感技术监测在矿山地质塌陷监测的应用。研究结果表明,通过对无人机遥感技术生成的DSM处理,经过多期地面高程的 对比,得到Y120212工作面最大沉陷量达6.5m。结合分析、对比,无人机遥感技术可以实现采煤塌陷区地表沉陷变形监测,进 而形成和发展了煤矿地面塌陷新的监测技术。

关键词:无人机遥感;地面塌陷;沉陷量监测;羊场湾煤矿

中图分类号:P618.11;X141 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2018)12-2264-06

Gao G J, Hou E K, Xie X S, Xu Y N, Wei Q M, Liu J B. The monitoring of ground surface subsidence related to coal seams mining in Yangchangwan coal mine by means of unmanned aerial vehicle with quad-rotors. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(12):2264–2269

Abstract: The small UAV is an important tool in geological survey with the advantages of low cost and flexible operation. The monitoring of surface subsidence and deformation is a key to controlling the surface movement and deformation related to coal seams mining and subsidence. This paper focuses on the investigation of coal mining subsidence monitoring in the Y120212 working face in Yangchangwan coal mine, by the process of field reconnaissance and controlling point layout, UAV route planning and execution, 4D product production process and monitoring methods, so as to apply unmanned aerial vehicle remote sensing technology to monitoring the mine geological collapse. The research shows that the maximum subsidence value of the Y120212 working surface reaches 6.5m by comparison of the DSM processing of unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing technology and multi period ground elevation. A comparative study of the unmanned aerial vehicle remote sensing technology shows that it can monitor the surface subsidence deformation related to coal mining subsidence area. The technology is also a new means for monitoring the ground subsidence of the coal mine. **Key words:** UAV remote sensing; surface collapse; surface subsidence monitoring; Yangchangwan coal mine

作者简介:高冠杰(1992-),男,在读硕士生,从事煤炭地质和煤矿地质灾害防治研究工作。E-mail:527515795@qq.com

通讯作者: 侯恩科(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事煤炭地质、矿区地质灾害和矿井水害防治方面的教学与科研工作。 E-mail: houek@xust.edu.cn

收稿日期:2018-01-10;修订日期:2018-06-20

资助项目:中国地质调查局项目《秦岭及宁东矿产资源集中开采区地质环境调查》(编号:DD20160336)和国家自然科学基金项目 《煤层顶板突水机理及突水危险性分区预测方法研究》(1批准号:41472234)

因采煤造成的地面塌陷问题始终困扰着矿区 的资源开发、环境保护和安全生产的可持续发展。 随着中国加强生态文明建设的要求,矿山环境保护 压力加大,高强度的煤炭开采造成的地面塌陷问题 更加突出,所以采用快速、高效、自主的矿区地面塌 陷监测手段对于矿区环境监测显得尤为重要。传 统采煤沉陷监测多通过水准测量、GPS测量等方法 进行,但存在费时、费力、成本高的问题,且难以对 矿区进行大面积监测^[1-3]。诸多研究人员通过DIn-SAR、GPS/In-SAR、三维激光扫描、近景摄影测量 技术及其他3S技术手段对矿区地面塌陷进行监测, 但因存在时间分辨率、空间分辨率、精度等问题的 限制,此类方法也需进一步验证^[4-8]。

近年来,随着无人机技术的发展,无人机遥感 技术开始广泛应用于地质工作中,如滑坡¹⁹、矿山 三维模型¹⁰⁹、矿山地质灾害¹¹¹等研究。由此可见, 无人机遥感技术正以其低成本、高时效、应用范围 广、灵活、易操作等优点广泛应用于地质工作的各 个方面,但前人在无人机应用于矿山沉陷监测方 面的研究较少。本文通过四旋翼无人机对宁夏羊 场湾煤矿 Y120212 工作面采煤沉陷量进行监测研 究,探索无人机遥感技术在矿山地质塌陷监测中 的应用。

1 工作面概况

羊场湾煤矿位于宁夏宁东煤炭基地灵武矿区, 其Y120212工作面位于羊场湾井田中部,该综采工 作面于2016年8月开始回采,2017年7月回采结束, 采用走向长壁综合机械化放顶煤方式开采,开采煤 层为2煤,煤层平均厚度为7.7m,一次性开采3.4m, 放顶煤3.3m,采厚6.7m,平均倾角25°。工作面走向 长约480m,倾斜长约215m,平均垂深595.3m。煤层 伪顶为炭质泥岩,平均厚度0.5m,直接顶为粉砂质 泥岩,平均厚度为3.12m。该工作面西北侧为已回 采完毕3年的120211工作面(图1),两工作面相距 约50m。工作面地表被沙丘覆盖,地形由东向西逐 渐变缓,整体起伏不大,相对平缓。

2 遥感系统及数据获取

2.1 无人机遥感系统

无人机遥感系统(UAV remote sensing system, UAVRSS)是一种以UAV为平台,以各种成像与非





成像传感器为主要载荷,飞行高度在几千米以内, 能够获取遥感影像、视频等数据的无人机遥感与摄 影测量系统^[12]。目前,成熟完备的民用UAVRSS主 要包括飞行平台系统、轻小型多功能对地观测传感 系统、遥感空基交互控制系统、地面数据快速处理 系统、数据传输链路、综合保障系统与装置、地面后 勤人员等^[12]。本次研究采用四旋翼无人机 MD4-1000(图2),传感器为SONY A7R 数码相机,数据处 理软件为Pix4D Mapper 2.0 无人机处理软件。无人 机和相机的主要参数见表1。

2.2 数据获取及预处理

基于四旋翼无人机的采煤沉陷量监测一般由 前期准备、数据采集、数据处理与分析3个步骤组 成。在前期准备阶段中,主要对工作面所处地形地



图 2 MD4-1000 无人机 Fig. 2 MD4-1000 UAV

	表1 无人机与相机参数
Table 1	Main performance indexes of UAV and camera

无人机		相机(SONYA7R)		
飞行时间	<50min/电池	有效像素	3640万	
飞行高度	1000m	最大像素	3700万	
飞行半径	5000m	传感器	全画幅(35.9*24mm)	
遥控距离	5000m	最高分辨率	7360*4912	
机身自重	2650g	续航能力	340张	
任务载荷	2000g(最大)	焦距	35mm	
抗风能力	<12m/s	像元大小	4.88um	

貌进行踏勘,地裂缝进行实地测量,根据工作面的 实际情况选择合适的起飞点及控制点;数据采集阶 段,主要根据前期实地踏勘情况,合理绘制航线,在 满足飞行条件及数据采集条件下,完成无人机的飞 行任务,并对采集数据进行检查;数据处理与分析 阶段主要包括4D产品的制作、DOM(数字正影像) 的解译及DSM(数字表面模型)数据的校正,具体流 程如图3所示。

本次研究对羊场湾煤矿Y120212工作面进行了 3期无人机数据的采集,时间分别为2016年8月10 日、2017年3月20日及2017年8月28日。其中,第一 期航线沿工作面走向布置,航线高度100m,分两架次 完成工作任务,共得到286张航片;第二期航线沿工 作面走向布置,航线高度150m,分两架次完成工作任



图 4 地表裂缝直接解译标志 Fig. 4 Direct interpretation key



图 3 无人机遥感监测技术流程 Fig. 3 The flow chart of UAV remote sensing monitoring technology

务,共得到162张航片;第三期航拍时,因工作面设计 变动,根据实际情况,航线沿工作面倾向布置,航线高 度150m,分两架次完成飞行任务,共得到170张航 片。3次航拍的空间分辨率均在2cm以内。影像处理 采用Pix4D Mapper 无人机图像处理软件,将无人机 飞行POS (飞行位置数据)数据、航摄照片导入软件, 经过像控点加密处理,即可由软件自动完成畸变校 正、空三加密、DEM(数字高程模型)制作、DOM制 作等一系列流程。



图5 地表裂缝间接解译标志 Fig. 5 Indirect interpretation key

第37卷第12期

3 工作面地表裂缝解译

不同的地形地貌区,采煤地面塌陷类型不同, 一般包括裂缝、崩塌、滑塌、滑坡、地面沉陷等^[13]。本 次研究的主要监测对象为采煤塌陷造成的地表裂 缝,通过对生成的DOM进行目视解译获取地裂缝 及其分布特征,并结合野外地质调查结果验证解译 结果的准确性。目视解译的标志可以分为直接标 志和间接标志,其中直接标志主要包括深浅不一的 色调,呈线状或条带状分布的影像^[14](图4);间接标 志主要包括因填埋地表裂缝造成的条带状掩埋痕 迹(图5)。

羊场湾煤矿Y120212工作面地表裂缝图像的解 译结果如图6所示。结合野外实地踏勘资料可知, 该工作面采煤诱发的地面塌陷类型主要有地面沉 陷与地表裂缝。2016年8月(图6-a),采煤工作面 刚开始进行回采,其工作面内已经存在平行切眼裂 缝和平行顺槽裂缝,其中平行顺槽裂缝发育较多且 宽度较大,平行切眼裂缝发育很少。结合野外调查 资料,平行顺槽裂缝主要出现在工作面机巷一侧, 裂缝间距10~15m,呈条带状分布,裂缝最大宽度达 0.5m。但由于该时间内,Y120212工作面刚开始采 动,所以分析认为,造成这些裂缝的原因是Y120211 工作面的采动所致。从2017年3月和2017年8月影 像中以间接解译标志为基础的解译结果可知(图6b、c),该区域因Y120211工作面产生的裂缝基本已 经稳定,且由于人工填埋的原因,地表裂缝的连续 性也明显强于2016年8月(图6-a)。在2017年8月 的解译结果中,在距离Y120212工作面机巷顺槽约 120m处,出现宽约20m、裂缝宽度小于0.05m的地 裂缝群,为Y12012面开采引起的地面裂缝。

Y120211工作面和Y120212工作面作为相邻工作面,地表裂缝发育情况产生较大的差异,原因在于Y120211工作面埋深为468.1m,较Y120212工作面埋深(595.3m)浅,且Y120211工作面已于2014年5月回采完毕,地面塌陷已经相对稳定,Y120212于2017年7月回采完毕,地面塌陷还未稳定。

4 基于无人机遥感的地面沉降量计算

基于无人机遥感的地面沉降计算主要是采集 不同采动时期的地表高程值,通过对同地点不同时 期的高差对比来获得地面沉陷数据。本文采用



图6 Y120212工作面裂缝分布

Fig. 6 The schematic diagram of crack distribution of Y120212 working face
a—2016年8月地裂缝分布;b—2017年3月地裂缝分布;
c—2017年8月地裂缝分布

表2	DSM(XYZ格式)成果
Table 2	DSM (XYZ format) results

点	ゴビ <i>X/</i> m	东 Y/m	大地高H』/m
\mathbf{D}_1	4204574.1	36379920.514	1404
D_2	4204574.1	36379930.514	1404
D_3	4204574.1	36379941.514	1405
	•		
D ₅₂₃₂	4203694.1	36379761.514	1423

2017年8月份无人机飞行数据,进行基于无人机遥感的地面沉陷量计算。具体步骤为^[15]:①对无人机遥感影像进行处理获得研究区点云数据(XYZ格式);②获得坐标校正点的数据并进行异常值计算; ③对点云数据(XYZ格式)进行 GPS 高程拟合校正; ④进行地表沉降量的计算与成图。

4.1 点云数据生成

无人机遥感影像的处理主要在 Pix4D mapper2.0 中进行,在4D产品输出时将点云数据设置为 以*XYZ*格式,按10m×10m的网格进行产品生成,其 中数据主要为网格点D₁、D₂、D₃····D₅₂₃₂的平面坐标 *X*、Y和大地高程*H*₄,结果如表2所示。

4.2 控制点布置与高程异常值计算

根据现场踏勘结果,结合无人机监测区域地形 地貌特点,选择5个地面高程控制点 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 ,其布置的具体位置如图7所示。对设计的5个控 制点进行放样,并对控制点使用RTK进行测量,得 到各控制点的正常高程 $H_{\rm II}$ 数据。

在进行高程异常值 ζ_i 计算中,将控制点K₁、K₂, K₃、K₄、K₅和点云数据生成的网格点D₁、D₂、D₃··· D₅₂₃₂展布在相同图幅内,寻找距离控制点最近的网 格点数据,并将控制点的高程数据赋值给相应网格

表 3 公共点高程异常值 Table 3 Elevation anomaly of common points

ь	-lk V/m	t-V/m	大地高	正常高	高程异常	台里
迅	- [<i>\</i> /m	尓 I/m	$H_{\rm d}/{ m m}$	$H_{\rm IE}/{ m m}$	值 ζ _i /m	卫星
G_1	36379930.51	4204454.1	1412.484	1409.15	3.334	工作面四周
G_2	36380090.51	4204061.1	1435.898	1432.517	3.381	工作面四周
G_3	36379930.51	4204234.1	1413.055	1408.886	4.169	工作面中心
G_4	36379780.51	4204394.1	1407.01	1402.866	4.144	工作面四周
G_5	36379930.51	4203994.1	1422.497	1418.447	4.05	工作面四周



点。可根据公式(1)计算得到临近网格点对应的高 程异常值,结果如表3所示。

$$\zeta_i = H_d - H_{\mathbb{H}}(i=1,2,3,4,5) \tag{1}$$

4.3 GPS 高程拟合校正

根据公共点坐标的高程异常值,采用平面4参数拟合模型对无人机遥感数据进行坐标拟合校 正。其中,根据公式(2)可计算得到参数*a*₀、*a*₁、*a*₂、*a*₃的值。

$$\zeta_i = a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i + a_3 X_i Y_i, (i = 1, 2, 3, 4, 5)$$
(2)

其中, ζ_i 为各公共点的高程异常值(m); X_i 、 Y_i 为各公共点对应的平面X、Y坐标(m)。

本次研究得到的*a*₀、*a*₁、*a*₂、*a*₃的参数值分别为 7614412.4、-0.209479466、-1.846715959、5.08×10⁻⁸。 将其带入公式(2),即可求得所有网格点的高程异常 值*ζ_i*(*i*=1,2,3,…,5232),将其带入公式(1)可得到研 究区所有网格点的校正后高程*H*_k,结果见表4。

4.4 沉降量计算与成图

将经过高程拟合校正的Y120212工作面数据在 ArcGIS 中采用插值方法生成 10m×10m 的栅格 S₁, 同时对矿区 2016 年地形地貌图上相同地点的等高 线按 10m×10m 进行栅格化处理得到栅格 S₂。在栅

表4 GPS高程拟合校正结果 Table 4 Results of GPS elevation after fitting and correcting

点	北 <i>X/m</i>	东 Y/m	大地高H』/m	拟合后结果 H_{k}/m
G_1	36379930.51	4204454.1	1412.484	1409.007
G_2	36380090.51	4204061.4	1435.898	1432.477
G_3	36379930.51	4204234.1	1413.055	1409.242
G_4	36379780.51	4204394.1	1407.01	1402.823
G_5	36379930.51	4203994.1	1422.497	1418.317



图8 Y120212工作面沉降等值线



格计算器中,采用公式(3),即可得到Y120212工作 面采动后地表沉降量 ΔH ,并绘制Y120212工作面 下沉量等值线图(图8)。

 $\Delta H = [S_2] - [S_1] \tag{3}$

式中,[S₂]为开采前由等高线插值形成的地形栅 格(m);[S₁]为经过高程拟合后经插值形成的地形栅 格(m)。

由图8可知,羊场湾煤矿Y120212工作面地面 沉陷值在工作面北部数值较大,据计算数据显示, 该地面最大沉降量为6.5m,同时该地区也是地表裂 缝解译结果中地裂缝出现的区域,原因在于相对于 工作面南部,工作面北部与Y120211工作面邻近。 分析认为,Y120212工作面北部沉降量是Y120211 工作面和Y120212工作面沉降共同所致。

5 结 论

(1)根据无人机遥感影像解译结果,结合野外 实地踏勘发现,深埋煤层条件下,工作面平行切眼 裂缝不发育,平行顺槽裂缝发育较少,平行顺槽裂 缝距离顺槽较远且裂缝宽度较小,一般在3cm以 内,裂缝弯曲方向朝向采空区。

(2)通过实践,总结得到一套确定飞行任务、资料收集及实地踏勘、航线设计、像控点布设与测量、 飞行任务执行及数据整理、4D产品制作与图像解 译、沉降计算的无人机沉陷量监测流程,且取得了 较好的监测效果。

(3)利用无人机遥感技术得到 Y120212 工作面最大下沉值约为 6.5m。原因为Y120212工作面处于因 Y120211 采动形成的下沉盆地中, Y120212的采动造成下沉盆地的又一次 下沉,导致了该面下沉严重的结果。计 算结果与实际地面塌陷情况较吻合,计 算结果较可靠。

致谢:地表裂缝的野外调查工作由 羊场湾煤矿地测科张仲杰等工作人员 协助完成,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]张飞. 基于 DIn-SAR 技术的淮南采煤沉陷区地 面沉降监测研究[D]. 南京大学硕士学位论文, 2012.
- [2]赵兵朝, 刘宾, 王建文, 等. 柠条塔煤矿叠置开采地表岩移参数分析[J]. 煤矿安全, 2016, 47(9): 213-216.
- [3]赵兵朝, 刘飞, 凡奋元, 等. 黄土沟壑区下斜交叠置开采地表下沉 系数研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(5): 54-57.
- [4]陈炳乾, 邓喀中, 范洪冬. 基于 DIn-SAR 技术和 SVR 算法的开采 沉陷监测与预计[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 880-886.
- [5]王小兵. 基于 DIn-SAR 技术的矿山开采沉陷监测研究现状[J]. 金属矿山, 2015, (S1): 65-71.
- [6]独知行, 阳凡林, 刘国林,等. GPS与In-SAR 数据融合在矿山开采 沉陷形变监测中的应用探讨[J]. 测绘科学, 2007, 1: 55-57, 162.
- [7]李强, 邓辉, 周毅. 三维激光扫描在矿区地面沉陷变形监测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):119-124.
- [8]杨化超,邓喀中,张书毕,等.数字近景摄影测量技术在矿山地表 沉陷监测中的应用研究[J].中国图像图形学报,2008,3:519-524.
- [9]曾跃. 基于无人机摄影测量的地质灾害监测[D]. 吉林大学硕士学 位论文, 2016.
- [10]张玉侠, 兰鹏涛, 金元春, 等. 无人机三维倾斜摄影技术在露天矿 山监测中的实践与探索[J]. 测绘通报, 2017, S1: 114-116.
- [11]魏长婧, 汪云甲, 王坚, 等. 无人机影像提取矿区地裂缝信息技术 研究[J]. 金属矿山, 2012, 41(10): 90-92.
- [12]李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉 大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513, 540.
- [13]蔡怀恩,侯恩科,张强骅,等.黄土丘陵区房柱式开采地表塌陷特征及机理分析——以陕北府谷县新民镇小煤矿为例[J].地质灾害与环境保护,2010,21(2):101-104.
- [14]马露. 采空地面塌陷遥感识别方法研究[D]. 西安科技大学硕士 学位论文, 2009.
- [15]侯恩科,首召贵,徐友宁,等.无人机遥感技术在采煤地面塌陷监 测中的应用[J].煤田地质与勘探,2017,45(6):102-110.