

数字矿山摄影测量系统关键技术的研究

赵 群^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京); 2. 北京农学院)

摘 要 应用摄影测量原理,使用数码相机对矿山地表和地下进行拍摄,对矿山进行监测,快速获取矿山空间数据,形成大比例尺影像图,对地表变化和地下采空区状况变化进行测量,同时可以利用拍摄影像检测矿山爆破眼位置的合理性,并依据数据做出调整。

关键词 射影重建 三维建模 数值模拟

Research on Key Technology of Photography Measurement System of Digital Mine

Zhao Qun^{1,2}

(1. China University of Geosciences (Beijing); 2. Beijing Agricultural College)

Abstract With the principle of photogrammetry, the digital camera is adopted to take photography for mine surface and underground to monitor the mine. Then the mine spatial data can be quickly obtained, forming a large-scale survey map. So the surface changes and the underground mined-out variation can be measured. At the same time, the reasonableness of position of blasting hole can be checked and adjusted based on the data by the shooting video.

Keywords Project rebuild, Three-dimensional modeling, Numerical simulation

数字矿山建设已成为世界各国共同关注的课题。根据国家“十五”计划对企业信息化的要求,当前矿业发展的重要任务是发展数字矿山信息系统。

因矿山在开采过程中矿柱变形,采空区顶板变形,相邻作业区采场和巷道的维护,井下大面积冒落、岩移及地表塌陷等现象发生,给矿山安全生产构成严重威胁。如何在矿山信息化建设中解决和处理好安全监测与预防工作,成为矿山生产中的热点问题。因此建立数字矿山信息实时快速获取系统,能够为数字矿山建设提供快速、实时地表和地下数据信息,为矿山安全监测与预防提供有力的工具^[1-4]。

1 矿山地表测量理论与关键技术

矿山地表空间数据获取采用普通数码相机,根据近景摄影测量原理,求解相机内外方位角元素,利用影像匹配技术,对拍摄的影像进行求解,获取矿山地表三维空间数据,利用地表三维坐标,生成矿山三维模型。在拍摄范围内,如果不能布设许多控制点,利用短基线多个影像来进行拍摄。首先采用直线线性变换模型(DLT)求解内外方位元素的初值,通过确定方位元素的初值,进行相对定向和绝对定向,最后利用独立模型法进行平差,对拍摄区域进行统一的平差计算,求解所需目标的物方坐标。

1.1 普通数码相机检校

近景摄影测量是利用获取的图像,计算物体三维空间坐标。图像与地面相应点的对应关系是由相机参数决定的,而相机参数为 (x_0, y_0, f) ,相机参数是未知的,因此要内定向求出相机参数^[5-8]。

1.2 内外方位元素测定

内方位元素采用直线变换的方法解算,解算内方位元素过程如下^[9-10]。

利用量测得到三维控制场各控制点的像方坐标求得畸变系数,按式(1)进行畸变差改正,再根据共线方程推导直线线性变化(DLT)模型:

$$\begin{cases} x - x_0 + \Delta x = -f \cdot \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 + \Delta y = -f \cdot \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, X, Y, Z 是物方点的物方空间坐标; X_s, Y_s, Z_s 是摄站点的物方空间坐标; x, y 为像点的像平面坐

赵 群(1973—),女,中国地质大学(北京),博士研究生;北京农学院,讲师;100037 北京市海淀区学院路29号。

标; x_0, y_0, f 是影像的内方位元素; $\Delta x, \Delta y$ 是像点坐标自身引进某种系统误差的改正值; $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3)$ 是 3 个外方位元素组成的 9 个方向余弦,

$$a_1 = \cos\varphi\cos\kappa - \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa,$$

$$a_2 = \cos\varphi\sin\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa,$$

$$a_3 = -\sin\varphi\cos\omega,$$

$$b_1 = \cos\omega\sin\kappa,$$

$$b_2 = \cos\omega\cos\kappa,$$

$$b_3 = -\sin\omega,$$

$$c_1 = \sin\varphi\cos\kappa + \cos\varphi\sin\omega\sin\kappa,$$

$$c_2 = -\sin\varphi\sin\kappa + \cos\varphi\sin\omega\cos\kappa,$$

$$c_3 = \cos\varphi\cos\omega.$$

x_0, y_0, f 用来确定投影中心在像空间坐标系中对像片的相对位置; $X_s, Y_s, Z_s, \varphi, \omega, \kappa$ 称为像片外方位元素,用来确定一张像片和投影中心在物方坐标系中的方位。

2 多基线影像迭代法相对定向

将上述直线线性变换(DLT)求解的方位元素初值代入,进行相对定向。

相对定向的目的是为了恢复构成立体像对的两张像片的相对方位,建立被摄物体的几何模型。它是以共面方程为基础的:

$$F = \begin{vmatrix} b_u & b_v & b_w \\ u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f_1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

地面点 A 在 $D - XYZ$ 坐标系中的坐标为 (X, Y, Z) ;地面点 A 在第 1 张和第 2 张像空间辅助坐标系 $S_1 - U_1V_1W_1$ 和 $S_2 - U_2V_2W_2$ 中的坐标分别为 (U_1, V_1, W_1) 和 (U_2, V_2, W_2) ; A 点相应的像点 a_1, a_2 的空间坐标是 $(x_1, y_1, -f), (x_2, y_2, -f)$, 像点的像空间辅助坐标为 $(u_1, v_1, w_1), (u_2, v_2, w_2)$; $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ 是由外方位元素计算的左右像片的旋转矩阵;摄影基线 B 的 3 个分量为 b_u, b_v, b_w 。

相对定向以后,各个立体像对就归在统一的坐标系。

独立模型法区域网空中三角测量是基于单独法

相对定向建立单个立体模型,再由一个个模型相互连接组成一个区域网。利用各单模型彼此间的公共点连成一个区域。根据最小二乘法准则对全区域网实施整体平差,求解每个模型的 7 个绝对定向参数,从而求出所有待定点的地面坐标。

3 矿山坑道测量理论与关键技术

矿山井下常规空间数据的采集主要是采用经纬仪、水准仪、测距仪等传统测量仪器实地施测,测量后再按照空间解析几何学来确定点的三维坐标,按照传统测量方法获得矿山井下整体测量图^[11-13]。

3.1 摄像机的自检校

对立体像对采用自检校方法。在矿井下作业时,为了获取高清晰度的影像,采用摄像机。由于井下作业条件限制,控制点相对较少,在拍摄过程中,由于焦距和广角的变换,主距会变化,因此采用立体像对自检校方法。自检校方法无需布设控制场,无需标定物,只要从不同角度拍摄物体,获得同一物体的几张相片,就能计算出内方位元素,可以方便地进行实时检校。

3.2 基于 Kruppa 方程的摄像机自检校算法

设 Ω 是处于无穷远处平面上二次曲线,方程为

$$x^2 + y^2 + z^2 = 0.$$

它在两个像平面的投影分别是 ω, ω', Ω 在图像平面的投影不随摄像机位置变化而变换,只与摄像机内参数有关。设 \mathbf{B} 为表示二次曲线 ω 的矩阵,那么 $\mathbf{B} = [\mathbf{A}^{-1}]^T \mathbf{A}^{-1}$, 则任意一点 y 与极点 e 连线时二次曲线 ω 的切线的充要条件为

$$(e \times y)^T \mathbf{K}(e \times y) = 0,$$

式中,

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}\mathbf{A}^T = \begin{pmatrix} u_0^2 + \frac{a_u^2}{\sin^2\theta} & u_0v_0 - a_u a_v \frac{\cot\theta}{\sin\theta} & u_0 \\ u_0v_0 - a_u a_v \frac{\cot\theta}{\sin\theta} & v_0^2 + \frac{a_v^2}{\sin^2\theta} & v_0 \\ u_0 & v_0 & 1 \end{pmatrix}.$$

\mathbf{K} 是如假设像主点位于图像中心, Kruppa 方程可简化为

$$\begin{cases} a_1x_1^2 + b_1x_1x_2 + c_1x_1 + d_1x_2 + e_1 = 0, \\ b_1x_2^2 + a_1x_1x_2 + c_2x_2 + d_2x_1 + e_2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

u_0, v_0 为像主点坐标; $x_1 = a_u^2, x_2 = a_v^2; a_1, b_1, \dots, e_1$ 为与 u_0, v_0, f 有关的系数。上式可化简为二元一次方程的求解。

对影像处理完以后,采用影像匹配技术,并根据像对定向过程中解算出来的定向元素以及模型非线性变形改正系数,解算同名像点在地面物方坐标系中的三维坐标。利用三维坐标值生成 DEM 模型模块的功能是根据立体重建计算的结果建立观测对象的数字模型。

4 采空区稳定性数值模拟

从力学的角度,对矿山采空区受力情况进行分析:地下矿山开采时,应力平衡受到破坏,采空区顶板会因重力作用而下移,塌陷的过程是采空区围岩破坏、松动、崩落,并波及到地表的动态过程,因此综合地表和地下三维模型,并用 FLAC^{3D}进行了数据模拟^[14-17]。

此处采空场模拟分析的岩体为含铁泥灰岩、含铁石英岩、混合岩和矿体,这些介质均属于弹性材料,因此采用 Mohr - Coulomb 破坏准则。

4.1 FLAC^{3D}破坏准则

Mohr - Coulomb 模型的破坏包络线由 Mohr - Coulomb 准则确定。

塑性增量理论假定岩石的应变增量可分解为弹性应变增量 e_i^e 和塑性应变增量 e_i^p , 即

$$\Delta e_i = \Delta e_i^e + \Delta e_i^p. (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

由相关流动法则

$$g = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{(1 + \sin\phi)}{(1 - \sin\phi)}, \quad (7)$$

式中, g 为塑性势面; ϕ 为膨胀角; σ_n 为剪切面上的法向应力。

塑性应变增量

$$\Delta e_i^p = \lambda^s \frac{\partial g}{\partial \sigma_i},$$

式中, λ^s 为确定塑性应变大小的函数, 为非负的塑性因子。

$$\Delta \sigma_i = \Delta \sigma_i^N - \Delta \sigma_i^O,$$

式中, N, O 分别表示新的和原来的应力状态。

令

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_1 &= \sigma_1^0 + E\Delta e_1 + \gamma(\Delta e_2 + \Delta e_3) \\ \sigma'_2 &= \sigma_2^0 + E\Delta e_2 + \gamma(\Delta e_1 + \Delta e_3) \\ \sigma'_3 &= \sigma_3^0 + E\Delta e_3 + \gamma(\Delta e_1 + \Delta e_2) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

则

$$\lambda^s = \frac{f(\sigma'_1, \sigma'_3)}{(E - \gamma N_\phi) - (\gamma - EN_\phi)}, \quad (9)$$

式中, $N_\phi = (1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$, ϕ 为膨胀角。

4.2 应用 FLAC^{3D}进行数值模拟

图 1 是一个剖面,从开挖的地方剖开,开挖后的竖向位移沉降,很形象地看出开挖过后,地表向下沉降,另外底板向上突起。

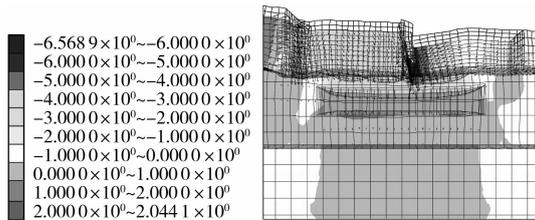


图 1 剖面

分析计算的结果表明,采空场的顶底板区域以拉应力为主,应力集中最明显的区域是采空场顶底板的中心位置,最大拉应力出现在采空场顶板的中间处,它超过岩体的抗拉强度值,导致在顶板中心位置出现塑性破坏区。

5 结 论

矿山开挖后采空场岩壁有较大的应力释放,采空场两侧岩壁水平应力部分区域释放为零,甚至出现拉应力,而竖向应力则有增加;与此相反,顶板及底板处竖向应力有较大释放,水平应力相应增加。由于空区面积较大,开挖后应力释放较大,易形成大范围的应力松弛区,原岩处于中等地应力水平,围岩应力随开挖变化较为显著。

参 考 文 献

- [1] 李德仁,关泽群. 空间信息系统的集成与实现[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,2000.
- [2] 汪云甲,郭达志,邓喀中. 我国矿山测量学科的发展与创新[J]. 测绘通报,2005(2):1-6.
- [3] 刘 勇,井文涌. 地理信息系统技术及其在环境科学中的应用[J]. 环境科学,1997,18(2):62-65.
- [4] 吴立新. 试论发展我国矿业地理信息系统的若干问题[J]. 矿山测量,1998(4):48-51.
- [5] Sloan S W. A fast algorithm for constructing delaunay triangulations in the plane[J]. Advanced Engineering Software,1987(9):34-55.
- [6] Chen Jun,Zhao Renliang,Li Zhilin. Voronoi-based k-order neighbor relations for spatial analysis[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2004,59:60-72.
- [7] Paul Siebert and Stephen Marshall. Human body 3D imaging by speckle texture projection photogrammetry [J]. Sensor Review. MCB University Press,2000,20(3):218-226.

(下转第 125 页)

in wastewater treatment plants, Antonie Van Leeuwenhoek Int [J]. J. Gen. Mol. Microbiol., 2002, 81: 681-691.

- [11] Akay G, Keskinler B, Cakici A, et al. Phosphate removal from water by RM using crossflow microfiltration [J]. Water Res, 1998, 32: 717-726.
- [12] Park J Y, Yun H B, Choi W H, et al. Cement paste column for simultaneous removal of fluoride, phosphate, and nitrate in acidic wastewater [J]. Chemosphere, 2008, 70: 1429-1437.
- [13] Galjaard G, Buijs P, Beerendonk E, et al. Pre-coating (EPCER) UF membranes for direct treatment of surface water [J]. Desalination, 2001, 139(3): 305-316.
- [14] Megat M M N, Fakhru R A, Thamer A M, et al. Performance of

flexible membrane using kaolin dynamic membrane in treating domestic wastewater [J]. Desalination, 2002, 147(2): 263-268.

- [15] Li Na, Liu Zhong-zhou, Xu Shu-guang. Dynamically formed poly (vinylalcohol) ultra-filtration membranes with good anti-fouling characteristics [J]. Journal of Membrane Science, 2000, 169(1): 17-28.
- [16] 卢进登, 李艳蕾, 康群, 等. 微网动态膜生物反应器对污染物的去除效果 [J]. 环境科学与技术, 2006(5): 93-94.
- [17] 武小鹰, 郑平, 徐红亮. 动态膜技术及其在环境工程中的应用 [J]. 膜科学与技术, 2003, 23(3): 49-53.

(收稿日期 2010-07-22)

(上接第 73 页)

程的实质是 Ce 离子与 P—OH 置换, 遵循阳离子交换机制, 求得其萃取平衡常数 K_{Ce} 为 $10^{-1.63}$; 当 $0 < \text{pH} \leq 1$ 时, 萃取过程较为复杂, 柠檬酸的存在阻碍了 P_{204} 二聚体的形成, 萃取过程是由 P=O 基团与 P—OH 基团同时参与与 Ce 的配合作用, 其配合机制为阳离子交换机制和溶剂化配合双重机制, 该机制增强了对 Ce 的萃取能力, 使萃取容量提高, 求得其萃取平衡常数 K_{Ce} 为 $10^{0.13}$ 。

参 考 文 献

- [1] 闫英桃, 刘建. HDEHP—乙酸丁酯有机相萃取硫脲金的研究 [J]. 湿法冶金, 1997, 16(3): 8-11.
- [2] 谢安建, 沈玉华. 不同状态 HDEHP 和 DMHPA 的 FTIR 光谱研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 1997, 17(5): 64-66.
- [3] 姚淑心, 王笃金, 翁诗甫, 等. 皂化酸性磷酸酯萃取稀土离子过程中有机相的 FTIR 光谱表征 [J]. 高等学校化学学报, 1995, 16(1): 1664-1668.

- [4] 周乃扶, 吴瑾光, 俞致健, 等. 稀土与酸性萃取剂形成的溶液聚集态结构 [J]. 中国科学: B 辑, 1997, 27(3): 235-240.
- [5] 田彦文, 翟玉春, 翟秀静, 等. P_{204} 盐酸体系萃取铀的基础研究 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1998, 19(2): 162-164.
- [6] Sun X B, Wang J P, Li D Q. Synergistic extraction of rare earths by mixture of bis(2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid and Sec-nonylphenoxy acetic acid [J]. Separation and Purification Technology, 2006, 50(1): 30-34.
- [7] Palma L D, Ferrantelli P, Merli C, et al. Recovery of EDTA and metal precipitation from soil flushing solutions [J], Journal of Talanta, 2003, 103(1/2): 153-168.
- [8] Sun X B, Wang J P, Li D Q. Selective separation of yttrium by CA-100 in the presence of a complexing agent [J], Journal of Alloys and Compounds, 2006, 408-412: 999-1002.
- [9] Wang Y G, Xiong Y, Meng S L, et al. Separation of yttrium from heavy lanthanide by CA-100 using the complexing agent [J], Journal of Talanta, 2004, 63(2): 239-243.
- [10] 徐光宪, 袁承业. 稀土的溶剂萃取 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.

(收稿日期 2010-07-25)

(上接第 97 页)

- [8] Fraser. Design and implementation of a computational processing system for off-line digital close range photogrammetry [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 55(2): 94-104.
- [9] Hattori S, Akimoto K, Fraser C, et al. Automated procedures with coded targets in industrial vision metrology [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2002, 68(5): 441-446.
- [10] Coulthard M A. Applications of numerical modeling in underground mining and construction [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1999, 17(3,4): 373-385.
- [11] Vaziri H H, Jalali J S, Islam R. An analytical model for stability analysis of rock layers over a circular opening [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(21): 3735-3757.
- [12] Escuder Viurete J, Carbonell R, Jurado M J. Two-dimensional geostatistical modeling and prediction of the fracture system in the

Albala Granitic Pluton [J]. SW Iberian Massif Spain. Journal of structural Geology, 2001, 23: 2011-2023.

- [13] Siyka Zlatnaova. Alias abdul rahman and morakot pilouk terms in 3D GIS development [J]. Journal of Geospatial Engineering, 2002, 14(2): 71-80.
- [14] Zhang Zhiqing, Daniel Griffith. Integrating GIS components and spatial statistic analysis in DBMS [J]. Int. J. Geographical Information Science, 2000, 14(6): 543-566.
- [15] 赵晓东, 蒋宇静, 宋振骥, 等. 基于 GIS 平台开采沉陷预测模型的构建于应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 981-984.
- [16] 杨松林. 隧道断面数字近景摄影测量系统研究开发 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [17] 周拥军. 基于未检校正 CCD 相机的三维测量方法及其在结构变形监测中的应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.

(收稿日期 2010-07-21)