

地面摄影测量测定地质结构面产状 和几何要素方法的研究

朱宜萱 邵巨良 王树根

摘要

本文详细叙述了用地面摄影测量方法确定露岩地质结构面的产状和几何要素的具体方法，包括摄影、控制，象片上节理面特征点的选取和量测，节理面的拟合和产状要素的算计以及精度评定等，并提出平差计算时采用选权迭代法以剔除粗差、保证成果质量。所编制的产状要素计算软件应用于某矿区的实际计算后证明是成功的，所获结果倾向中误差： $m_{\alpha_0} = \pm 1.0^\circ$ ，倾角中误差 $m_{\beta_0} = \pm 1.47^\circ$ ，较好地满足用户提出的小于 $\pm 5^\circ$ 的要求。

【关键词】 地面摄影测量；空间前方交会；地质结构；节理面；倾角和倾向；选权迭代法

1 地面摄影测量基本公式

1.1 概述

地面摄影测量的方法有模拟法、解析法、数字化测图、机助测图等，本文采用解析法进行研究。其方法如下：

(1) 外业实测摄站点地面坐标，经内业进行系统改正，求出摄影中心的外方位元素 $X_s, Y_s, Z_s; \varphi, \omega, \kappa$ 和 $X'_s, Y'_s, Z'_s; \varphi', \omega', \kappa'$ ；

(2) 内业立体或单片量测同名点像片坐标 $\bar{X}_1, \bar{Z}_1; \bar{X}_2, \bar{Z}_2; \dots; \bar{X}_u, \bar{Z}_u$ 和 $\bar{X}'_1, \bar{Z}'_1; \bar{X}'_2, \bar{Z}'_2; \dots; \bar{X}'_u, \bar{Z}'_u$ ；

(3) 空间前方交会地质结构面上各节理组上的地面坐标 $X_1, Y_1, Z_1; X_2, Y_2, Z_2; \dots; X_u, Y_u, Z_u$ ；

(4) 确定每个节理面的产状和几何要素倾向 α_0 、倾角 β_0 、节理间距 ΔD ，然后计算中误差 m_{α_0} 和 m_{β_0} 。

收稿日期：1990—012—2.8

1.2 地面坐标系中像片的内外方位元素

图中, $G-X_G Y_G Z_G$ 为地面坐标系; $S-XYZ$ 为摄影测量坐标系; $S-XYZ$ 为像空间坐标系。

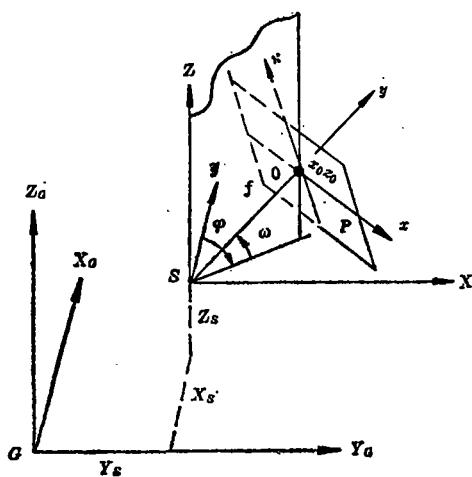


图 1 地面摄影测量坐标系示意图

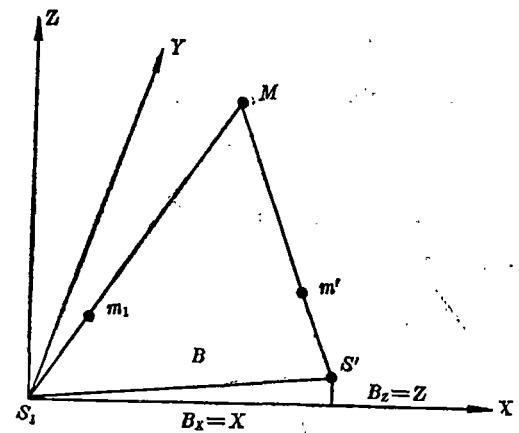


图 2 像点坐标与测摄坐标关系图

$X_s, Y_s, Z_s, \varphi, \omega, \kappa$ 为摄站点中心 S 在地面坐标系中的三个直线元素和三个角元素即外方位元素。 O 为像片主点, f, x_0, z^0 为像片 P 的内方位元素。

有了内外方位元素值, 在解析计算中就可以恢复摄影时的光束形状和确定摄影目标在地面坐标系中的正确位置。

1.3 像点的像空间坐标与摄影测量坐标的关系式

(见图 2), 设摄站为 S_1, S' , B 为空间基线, 若以 B_x 为 X 轴, 以 S_1 为原点, 则右摄站 S' 在 S_1-XYZ 坐标系中就是空间基线的三个分量 B_x, B_y, B_z , 图二中 $B_x = XB, B_y = OB_z = Z$, 也可以以 S' 为原点建立以 $S'-X'Y'Z'$ 坐标系, 使它与 S_1-XZY 坐标系平行, 目标点 M 在两个摄测坐标系中的坐标分别为 X, Y, Z 和 X', Y', Z' 。

左右像片的像空间坐标与摄影测量坐标之间的转换是用下式实现的:

$$\text{左片: } \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} = R \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = R \begin{vmatrix} x \\ f \\ z \end{vmatrix}, \quad \text{右片: } \begin{vmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{vmatrix} = R' \begin{vmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{vmatrix} = R' \begin{vmatrix} x' \\ f' \\ z' \end{vmatrix} \quad (1)$$

式中 R, R' 为左右像片相对于设定的统一空间坐标系的旋转矩阵、其中左片 R 为:

$$R = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix} = R_\varphi R_\omega R_\kappa$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{vmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos\kappa & 0 & -\sin\kappa \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin\kappa & 0 & \cos\kappa \end{vmatrix} \\
&= \begin{vmatrix} \cos\varphi\cos\kappa - \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa & \sin\varphi\cos\omega & -\cos\varphi\sin\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ -\sin\varphi\cos\kappa - \cos\varphi\sin\omega\sin\kappa & \cos\varphi\cos\omega & \sin\varphi\sin\kappa - \cos\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ \cos\omega\sin\kappa & \sin\omega & \cos\omega\cos\kappa \end{vmatrix} \quad (2)
\end{aligned}$$

(2) 式中 a_i 、 b_i 、 c_i ($i = 1, 2, 3$) 为 9 个方向余弦，同理可求出 R' 。

1.4 像点量测坐标值的仿射变换

为了把量测的像点的仪器坐标 \bar{x} 、 \bar{z} 变换为像点坐标，并改正底片变形，采用如下公式：

$$\begin{cases} x = a_1 \bar{x} + a_2 \bar{z} + a_3 \\ z = b_1 \bar{x} + b_2 \bar{z} + b_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中 \bar{x} 、 \bar{z} 为在坐标仪上量测的像点坐标值； x 、 z 为经过仿射变换后的值； a_i 、 b_i 为六个仿射变换系数（由已知推算的 8 个坐标理论值与量测值通过平差计算得出）

1.5 空间前方交会

要得到地面点的空间位置，可由立体像对中左、右两条同名光线空间前方交会得出、计算公式如下：

$$\begin{cases} X_M = NX = B_x + N' X' \\ Y_M = NY = B_y + N' Y' \\ Z_M = NZ = B_z + N' Z' \end{cases} \quad (4)$$

式中， N 、 N' 分别为某点的投影放大系数，左片为 N ，右片为 N' 。

B_x 、 B_y 、 B_z 由外业求得的摄站坐标算出

$$\begin{cases} B_x = X_{s1}' - X_s \\ B_y = Y_{s1}' - Y_s \\ B_z = Z_{s1}' - Z_s \end{cases}$$

(X, Y, Z) 、 (X', Y', Z') 由 (1) 式求出代入 (4) 式得：

$$\begin{cases} N = \frac{B_x Z' - B_z X'}{X Z' - X' Z} \\ N' = \frac{B_x Z - B_z X}{X Z' - X' Z} \end{cases} \quad (6)$$

将求得 N 、 N' 代入 (6) 式可得到 M 点的摄测坐标

$$\left\{ \begin{array}{l} X_M = NX \\ Y_M = [NY + BY + N'Y'] / 2 \\ Z_M = NZ \end{array} \right. \quad (7)$$

1.6 摄影机偏心改正

本文研究属困难目标地区，采用了许多长距离，大倾角、大偏角立体摄影，因此有必要顾及摄影机偏心所产生的系统误差，并对其进行了改正，见图 3。

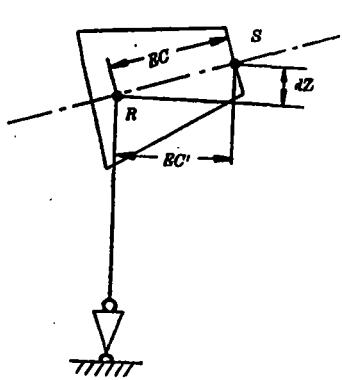


图 3 摄影机偏心示意图

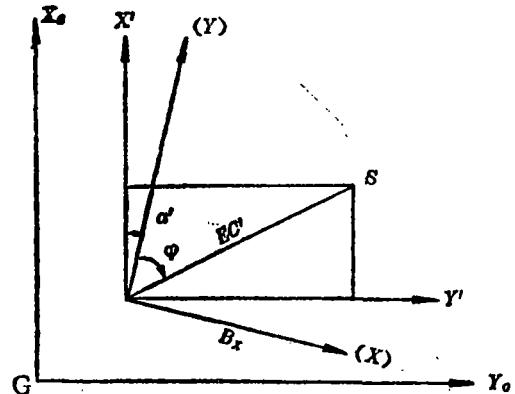


图 4 S 点偏心改正平面投影图

S 为摄影机物镜中心；R 为摄影机旋转中心；EC 为摄影机偏心；EC' 为 EC 水平分量；dZ 为 EC 垂直分量；其差值为：

$$\text{平面: } CE' = EC \cdot \cos \omega$$

$$\text{交差: } dZ = EC \cdot \sin \omega \quad (8)$$

由图 3、图 4 可推导摄站点 S 的偏心改正公式：

$$\left\{ \begin{array}{l} X_s = X + EC \cdot \cos \omega \cdot \cos(\alpha_1 + \varphi) \\ Y_s = Y + EC \cdot \cos \omega \cdot \sin(\alpha_1 + \varphi) \\ Z_s = Z + EC \cdot \sin \omega \end{array} \right. \quad (9)$$

式中 α_1 为摄测坐标系 (Y) 轴与真北方向的坐标方位角， φ 、 ω 的定义同图 1 所示。

1.7 摄影测量坐标与地面坐标关系式

经过以上计算可得到如图 2 的坐标 X_M 、 Y_M 、 Z_M ，它们是摄测坐标系中的坐标，纳入到大地坐标系后才能运算地质结构面的产状和几何要素：

$$\left\{ \begin{array}{l} X_G = X_{s1} - X \sin \alpha_1 + Y \cos \alpha_1 \\ Y_G = Y_{s1} - X \cos \alpha_1 + Y \sin \alpha_1 \\ Z_G = Z_{s1} + Z \end{array} \right. \quad (10)$$

式中， $\alpha_1 = \alpha_0 - 90^\circ$ ， α_0 为基线坐标方位角

2 地质结构面产状和几何要素的确定

2.1 节理面的拟合过程

获得了大量的地质结构面上点的地面坐标数据之后，即可运用下述理论和公式求其产状和几何要素。

已知空间平面上的一些点，用它们求得过这些点平面方程，然后，利用平面方程的参数求得空间平面的产状要素，考虑到节理面本身有起伏，且上面覆盖有碎石，故采用多于四点的测量平差方法来拟合平面。使它尽量客观反映节理面。

设过 n 个已知点的平面方程为：

$$q_1 X_i + q_2 Y_i + q_3 Z_i = 1 \quad (11)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n$, q_1, q_2, q_3 为平面在 X, Y, Z 轴上的截距的倒数。

由于地面摄影测量过程中， Y 方向的误差最大，可以不直接对(11)式求解，而是将(11)式转化为下面的形式：

$$Y_i = a + bX_i + cZ_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

根据 n 个已知点的地面坐标，由(14)式可得到一组误差方程式：

$$V_i = a + bX_i + cZ_i - Y_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

考虑所选地面点是否确实在节理面上，所以给每个点一个相应的权，如果所选的点在节理面上，其权应自动变大。如果所选点不在节理面上，其权应自动变小，以保证所求节理面参数 q_i 的正确性，也就是说所求参数 q_i 不受含有粗差的地面点的影响，用矩阵表示误差方程式：

$$V = B \cdot Q - Y \quad P \quad (P \text{ 为权阵}) \quad (14)$$

由(11)、(12)式可求得：

$$\begin{cases} q_1 = -b/a \\ q_2 = 1/a \\ q_3 = -c/a \end{cases} \quad (15)$$

2.2 粗差探测及定位

由于解在节理面参数之前，并不知道哪些地面点在节理面上，所以用一般方法不能发现粗差，必然降低解参数的精度，甚至于超过限差。为此采用选权迭代法来进行粗差的探测和定位。

所谓选权迭代法是在反复迭代计算过程中根据残差 V 的大小来不断地修改地面点坐标的权，残差越大，说明该点偏离所求的节理面越远，因此它的权应当越小；残差越小的点，则愈靠近节理面，所以其权相应增大。这就是粗差自动探测和定位的原理。本文研究所用的权函数为：

$$p_i^{v+1} = \frac{1}{(V_i^2)^v + C} \quad (16)$$

由(16)式可以看出：(1)权 P_i 与残差 V_i^2 成反比；(2) $v+1$ 以计算中地面点的 P_i^{v+1} 是由该点在第 V 次平差计算中的残差 V_i 所决定的；(3)分母中之 C 值为一小的正数，其作

用是防止 v 等于 0 时计算溢出，此时 P^{v+1} 将很大。

用上述方法有效地剔除了由于各种原因（如地面点坐标粗差，节理面选点粗差，像点坐标观测粗差，突起在节理面上的碎石点，转刺像点的粗差等等）产生的粗差点，从而获得了令人满意的高精度的地质结构面产状的几何要素。

2.3 空间平面产状要素的确定

当已知一空间平面方程后，其空间产状要素也是非常容易确定的，由图 5 可知，如果已知空间平面在三个坐标轴上的截距，则该平面的产状可表示为它们的函数即空间结构面倾向^[4]

$$\alpha_0 = \operatorname{arctg}^{-1} \left| \frac{q_1}{q_2} \right| = \operatorname{arctg} |b| \quad (17)$$

空间结构面的倾角

$$\beta_0 = \operatorname{arctg} \left| \sqrt{q_1^2 + q_2^2} / q_3 \right| \quad (18)$$

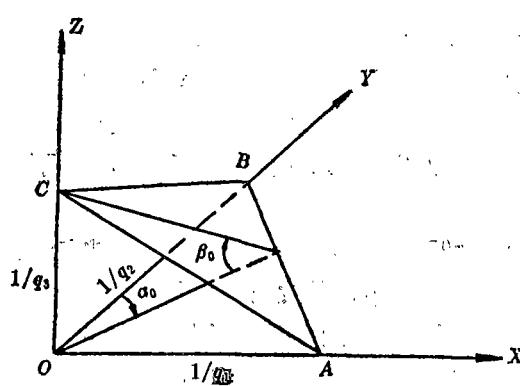


图 5 空间结构面在三个坐标轴上的截距

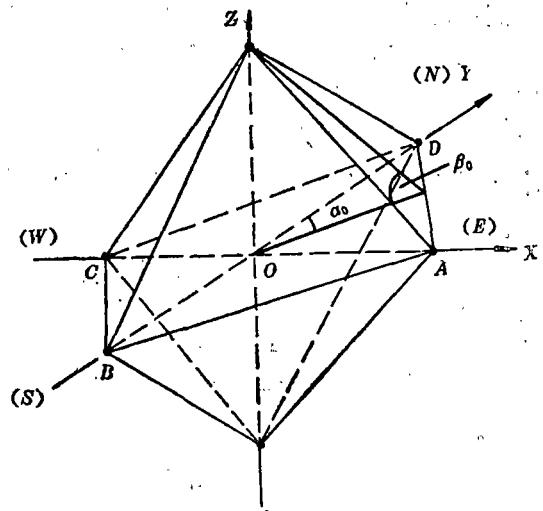


图 6 节理面倾向示意图

(17)、(18) 两式仅确定了结构面产状，为此可根据 q_1 、 q_2 、 q_3 的符号确定出真产状。首先假设 Y 轴为南北轴，其正向为北 (N)。X 轴为东西轴，其正向为东 (E)。由 (17) 式计算出的 α_0 是以 Y 轴为起始轴的，如图 6，其中 α_0 、 β_0 在 NE 区域内，可以得出如下的断定准则，其倾向：

$$q_1 > 0, q_2 > 0, q_3 > 0 : \text{NE}$$

$$q_1 > 0, q_2 > 0, q_3 < 0 : \text{WS}$$

$$q_1 > 0, q_2 < 0, q_3 > 0 : \text{ES}$$

$$q_1 > 0, q_2 < 0, q_3 < 0 : \text{NW}$$

$$q_1 < 0, q_2 > 0, q_3 > 0 : \text{NW}$$

$$q_1 < 0, q_2 > 0, q_3 < 0 : \text{ES}$$

$$q_1 < 0, q_2 < 0, q_3 > 0 : \text{WS}$$

$$q_1 < 0, q_2 < 0, q_3 < 0 : \text{NE}$$

若以Y轴的正方向为倾向的起始轴，由图

7 可得知四个象限中的区域分别是

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{NE: } \alpha_0 = \alpha_1 \\ \text{ES: } \alpha_0 = 180^\circ - \alpha_2 \\ \text{WS: } \alpha_0 = 180^\circ + \alpha_3 \\ \text{NW: } \alpha_0 = 360^\circ - \alpha_4 \end{array} \right. \quad (21)$$

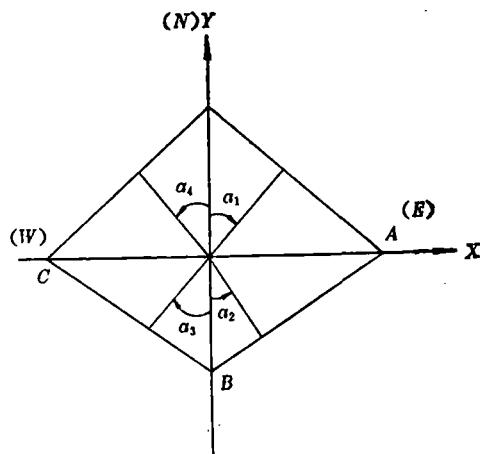


图 7 倾向方位角示意图

3.1 误差来源与提高精度的措施

影响摄影测量精度的因素很多，主要有：

控制点的数量与分布状况，摄影机性质，参数

与目标间的匹配情况，摄影材料的质量，摄站与被摄目标间距离大小，摄影基线与摄影距离的比值大小，摄影交会角形状、被摄目标照明状况，目标表面结构特征，内业仪器精度等级，工作人员技术水平，数据处理的方法和软件的优化程度，地球曲率及大气折射因素等。本文用地面摄影测量技术确定地质结构面产状和几何要素时，针对上述情况采取了如下措施：

(1) 采用 T_2 ($1''$) 级经纬仪和 DI3S ($5\text{mm} + 10^{-6}\text{D}$) 红外测距仪施测摄站点坐标，对所测距离进行了四项改正(大气改正，倾斜改正、归算至海平面的改正、摄影改正)，使所测摄站点精度均小于 $\pm 10\text{mm}$ 以内。具体方法有导线测量，采用闭合环、附合导线等；

(2) 采用性能优秀的量测摄影机 WildP31，其物镜畸变差 $< \pm 4\mu\text{m}$ ，其摄影机参数精确完整；

(3) 采用红特硬型玻璃干版摄影和量测，以减少底片变形；

(4) 在避免出现死角的情况下加大摄影基线；

(5) 在避免强阳光下摄影，尽量利用薄云晴天摄影，并利用小光圈、长曝光改善影像质量；

(6) 采用精密的、性能优秀的 BC_2 解析测图仪放大 20 倍对玻璃干版进行像片坐标量测，二测回统计表明其量测精度小于 $\pm 4\mu\text{m}$ ；

(7) 对作业人员严要求，按规范进行作业；

(8) 尽量增加各量测值的多余观测数据以便进行高精度平差计算；

(9) 采用先进的数据处理方法，在加入多项系统误差改正后，采用选权迭代法进行粗差探测和剔除，通过试算多次改化软件，从而保证了计算成果的优秀精度。

由于本次研究目标距离仅在 5~213m 之间，受地球曲率和大气折光的影响甚微，故未考虑。

3.2 地质结构面产状的精度分析

在考虑上述诸多因素并予以限制和改正的前提下，主要误差来源乃是地质结构面自身的

因素，特别是不平度，直接对（19）、（20）两式运用误差传播定律，则可得下式：

$$\text{倾向中误差: } m_{\alpha 0}^2 = \frac{k^2}{(1+b^2)^2} m_b^2 \quad (20)$$

$$\text{倾角中误差: } m_{\beta}^2 = \frac{k^2}{(1+b^2+c^2)} \left[\frac{c^2+b^2}{b^2+1} m_b^2 + (b^2+1) m_c^2 \right]$$

式中 $k = 180/\pi$, m_b , m_c 由解（14）式时, $Q_{v,a} p$ 得出。

通过对误差的理论估算，分组统计结果得出 131 个节理面；

倾向中误差为：±1°；倾角中误差为±1.47°；

其中倾向中误差小于±3°的占 91.67%，小于±5°的占 100%；倾角中误差小于±3°的占 89.39%，小于±5°的占 100%。图 8 是本次研究目标地质结构面产状的误差正态分布图：

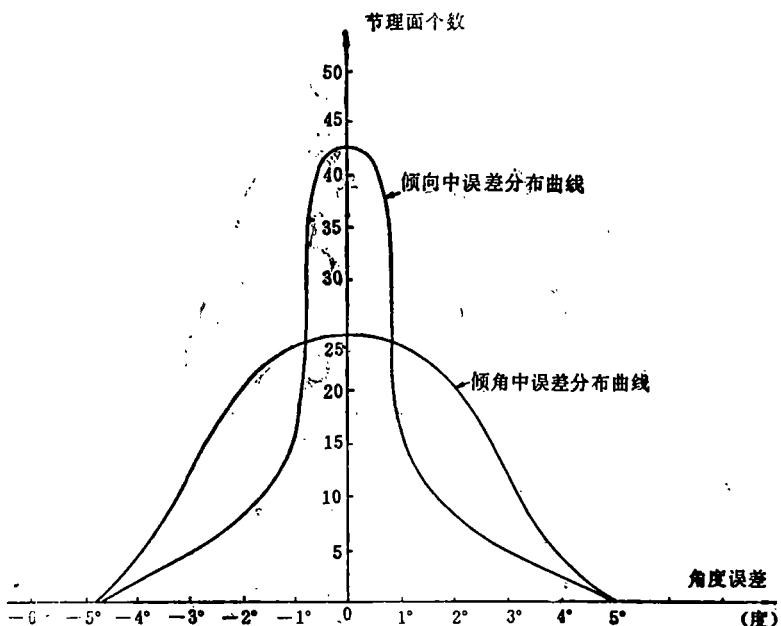


图 8 产状误差分布图

3.3 节理间距的测算

一组节理是由许多平行平面组成，故求其距离时，可采用点到平面的距离，即已知一节理面的几何要素和另一平行平面上的一点及其两平面间的节理面的几何要素和另一平行平面上的一点及其两平面间的节理层数次，可求得节理间距。

设平面方程为： $q_1 X + q_2 Y + q_3 Z = 1$

则点 (X, Y, Z) 则该平面的距离 d ：

$$d = \frac{|1 - q_1 X_1 + q_2 Y_1 + q_3 Z_1|}{\sqrt{q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}} \quad (21)$$

相应的节理间距 D ：

$$D = d / \text{节理层数} \quad (22)$$

(22) 式中的节理层数在解析测图仪上观测时从目标底片上数出。

4 结 论

- (1) 利用地面立体摄影技术测量地质结构面产状已由正摄影发展到任意交会角、大倾角的摄影;
- (2) 被测摄的地质结构面可以是任意困难地段和不可到达但可摄影的危崖表面;
- (3) 需要有一个精度十分高的控制测量系统;
- (4) 有一套完善的，适合处理节理面平度差的数据处理方法，即增加多余观测值、采用粗差探测与定位和优化的计算软件;
- (5) 有精干的技术力量、要求严肃细致的工作作风和克服困难的精神以及与多方面的良好合作;
- (6) 本次研究成果精度 $m_a = \pm 1^\circ$, $m = \pm 1.47^\circ$, 提出的限差要求为 $\pm 5^\circ$ 。可见研究是成功的。

参 考 文 献

- [1] 王之卓编著。摄影测量原理。测绘出版社, 1979年。
- [2] 黄世德主编。摄影测量学。测绘出版社, 1986年。
- [3] 冯文灏。非地形摄影测量。测绘出版社, 1985年。
- [4] 徐大成。地面立体摄影测量技术在露天矿边坡稳定性研究中的应用。长沙矿冶研究院, 1984年。
- [5] 李德仁著。误差处理和可靠性理论。测绘出版社, 1988年。
- [6] 周泽远, 张化敏编, 《精密测距》。武汉测绘学院, 1980年。
- [7] 《测量学》编写组编。《测量学》上下册。武汉测绘学院, 1979年。

注: 参加研究的人员有(按姓氏笔划)

马飞 王才诗 王树根 伍犬洲 朱宣萱 李平湘 李欣 邵巨良 汪治宏 杨先宏 周月琴 袁修孝 彭子风

Investigation of Determining the Appearance and Geometric Elements for Geological Structure Surface by Using Terrestrial Photogrammetry Method

Zhu Yixuan Shao Juliang Wang Shugen

Abstract

In this paper, a procedure of determining the appearance and geometrical elements

for geological structure of bare rock surface by using terestrial photogrammetry method is described in detail, which includes ground photography, control survey, choice and measurement of special feature points along structure plane on stereoscopic photographs, determination of cleavage surface and calculation of appearance elements as well as accuracy evaluation. A robust method with variable weight is used in order to detect the blunders and to assure the quality of resalts. The corresponding software of calculation rock appearance elements has been developed. Through the practical test using the real data in some mines, the RMSE of $m_{\alpha} = \pm 1.0^{\circ}$, $m_{\beta} = \pm 1.47^{\circ}$ for tilt direction and tilt angle are obtained, which can satisfy the need of users very well.

【Key words】 terrestrial photogrammetry; space forward in tersection; geological structure; Cleavage plane; Tilt angle and tilt direetion; variable weighted method