

# 用非量测相机测定地质结构面 的自然特性<sup>①</sup>

严韶华 靳奉祥 曾卓乔

(中南工业大学)

## 摘 要

提出了应用非量测相机(即普通照相机)数据处理新方案测定地质结构面自然特性的新方法。阐述了非量测相机所摄像片的数据处理新方案,研究了结构面自然特性的确定方法并给出了一次试验的结果。理论与实践表明新方法(简称单相机光束法)比传统量测方法的野外工作量小,作业简便,精度较高,具有广阔的应用前景。

**关键词:** 近景摄影测量 非量测相机 地质结构面 自然特性测定

地质结构面是指地质发展历史中,在岩体内形成具有一定方向、规模、形态和特性的面、缝、层、带状的地质界面<sup>[1]</sup>。很久以来人们一直沿用地质罗盘、皮卷尺、钢直尺等传统工具在现场直接量测这些地质结构面的自然特征,而近代地质调查与测量又常要拍摄它们的像片留作资料保存,如能对普通照相机(120或135型)拍摄的像片进行内业技术处理,用摄影测量方法取代传统的直接量测法来确定地质结构面自然特性定量值,那将一举两得。

从七十年代起,国内外学者开始研究用摄影测量方法测定地质结构面产状的问题<sup>[2-5]</sup>,但所采用的方案不外乎是量测相机(摄影仪)立体摄影测量法(简称立体法)或者是非量测相机单像空间后方交会法(即直接线性变换处理法,简称DLT法),而且仅限于测定产状。此外,这两种方法都必须依靠贵重的坐标量测仪获取象点坐标。因此,研究一种只用普通相机、内外业简便、通用性强、适用面广的地质结构面自然特性测量新方法是很有必要的,也很有意义,它将有利于推动摄影测量技术在地质行业中的

应用。

## 1 非量测相机数据处理新方案

非量测相机由于价格便宜、重量轻、使用简便,在摄影测量中应用有其特殊优越性。但由于非量测相机内定向元素不稳定、没有框标、缺乏压平装置和不规则的镜头畸变等,所以非量测像片的解析处理是非量测相机应用的关键问题。迄今为止,人们一般都是以直接线性变换(DLT)为基础,而这种方法需要在摄影现场空间分布着六个以上控制点,因而难于实施。此外,该方法的精度在很大程度上取决于控制点的精度与分布状况,因此精度往往不高。理论与实践已证明,当控制点分布不理想时,相应解算精度很差;当控制点近似分布在一个平面上时,计算不收敛而得不到结果。

本文提出的解析处理非量测像片方案是按相对定向、模型连接、绝对定向和光束平差过程处理,全部计算由ZEBUND程序完成<sup>[6]</sup>。

### 1.1 相对定向

① 1992年12月12日收到初稿

按连续像片衔接法依次进行各像片对的相对定向，构成各像对的独立模型。在相对定向计算中引入 Pope—Hiusken 算法(简称 P-H 法)，这样可有效地克服旋转矩阵中三角函数的多值性所造成的迭代计算不收敛情况。P-H 法的要点是用四个代数参数  $d, a, b, c$  代替旋转阵  $R$  中的角量元素， $R$  的具体形式为<sup>[7]</sup>

$$R = \begin{bmatrix} d^2 + a^2 - b^2 - c^2 & 2(ab + cd) & 2(ac - bd) \\ 2(ab - cd) & d^2 - a^2 + b^2 - c^2 & 2(bc + ad) \\ 2(ac + bd) & 2(bc - ad) & d^2 - a^2 - b^2 + c^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{并存在 } d^2 + a^2 + b^2 + c^2 = 1 \quad (2)$$

相对定向时，共面条件式为

$$F = \begin{bmatrix} B_x & B_y & B_z \\ x_l & y_l & z_l \\ p & q & r \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

式中

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

$x_l, y_l, z_l$ —左像片的象坐标;  
 $x_r, y_r, z_r$ —右像片的象坐标;  
 $B_x, B_y, B_z$ —基线分量

对(3)式线性化并经一系列推导得<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} F &= F_0 + dF \\ &= (pz_l - rx_l)dB_y + (qx_l - py_l)dB_x \\ &\quad + [r(B_zx_l - z_l) - q(y_l - B_yx_l)]W_1 \\ &\quad + [p(y_l - B_yx_l) - r(B_yz_l - B_zy_l)]W_2 \\ &\quad + [q(B_yz_l - B_zy_l) - p(B_zx_l - z_l)]W_3 + F_0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中

$$\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} = \frac{2}{d} \begin{bmatrix} d^2 + a^2 & ab + dc & ac - bd \\ ab - dc & d^2 + b^2 & bc + da \\ ac + bd & bc - da & d^2 + c^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_a \\ \Delta_b \\ \Delta_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 1.2 模型连接及绝对定向

相对定向后将各独立模型依次进行变换，联合成统一的模型。具体包括如下四个工作：  
 (1) 求各独立模型的统一长度比例因子。这个工作由连接边来完成，在此，连接边可为已知

边或未知边；(2) 将独立模型的旋转阵变换到统一模型中去；(3) 将各摄站点坐标由独立模型系统变换到统一模型系统；(4) 计算物方控制点在统一模型中的坐标。

以三个控制点进行模型绝对定向，求出各摄站点在物方坐标系中的坐标，像片的旋转阵，以及未知点坐标起始值。

### 1.3 光束平差及粗差检验

平差时采用的误差模型为<sup>[3]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \Delta_x &= \frac{r}{y}(K_1xy + K_2r^3) \\ \Delta_y &= \frac{y}{r}(K_1xy + K_2r^3 + k_3r) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中  $r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$ ;  
 $x, y$ —像点坐标;  
 $x_0, y_0$ —主点坐标;

$K_1, K_2, K_3$ —待定对称性物镜畸变系数

光束平差后即进行粗差检测，程序中采用 Barrad 数据探测法进行粗差定位，算出每个象点坐标观测值的  $W_i = V_i/\hat{\sigma}_{v_i}$ ，此处  $V_i$  为改正数， $\hat{\sigma}_{v_i}$  为由单位权估值计算的改正数误差。据此判断是否有粗差，如有，剔除后再进行平差计算。

## 2 地质结构面自然特性的确定

### 2.1 确定产状的基本原理

摄影测量确定结构面产状的基本思路是把结构面看作为空间平面，在其上取三个以上的点，由其物方坐标按最小二乘原理拟合一个平面，然后由平面参数计算该平面的产状要素。

空间平面的一般形式为

$$P_1X + P_2Y + P_3Z = 1 \quad (8)$$

按测量学习惯， $X, Y, Z$  轴取左手系， $X$  轴正向为正北(N)， $Y$  轴正向为正东(E)，则根据图 1 可推证倾向  $\alpha$  和倾角  $\beta$  的计算式为

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \text{tg}^{-1} |P_2/P_1| \\ \beta &= \text{tg}^{-1} | \sqrt{P_1^2 + P_2^2}/P_3 | \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

结构面的规模是指沿走向和倾向的大小，有了边缘点的坐标便可求得，即是求两空间点

的距离, 公式为

$$S = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (10)$$

结构面的密度由其间距来表达, 设一结构面的方程为(8)式, 而另一结构面上的点坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , 则这两个结构面的距离  $d$  为

$$d = \frac{|1 - P_1 X_0 - P_2 Y_0 - P_3 Z_0|}{\sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2}} \quad (11)$$

设结构面的组数为  $k$ , 则密度  $D$  为

$$D = \frac{d}{k} \quad (12)$$

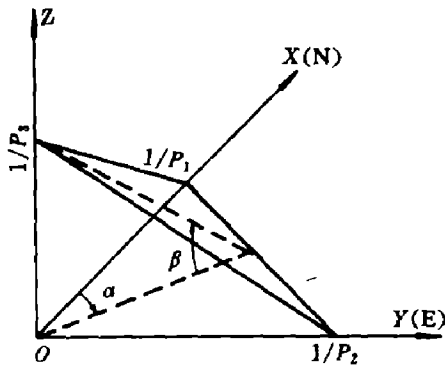


图1 结构面的倾向  $\alpha$  和倾角  $\beta$

### 2.2 倾向方位的判定

由(9)式求得的  $\alpha$  是倾向的绝对数值, 其方位可由(8)式中的  $P_1, P_2, P_3$  的符号来判定, 参照文献 [2、4] 的思路, 根据图 2 所示, 得倾向方位的判定准则为

$$P_1 > 0 \begin{cases} P_2 > 0 \begin{cases} P_3 > 0 \text{ 倾向NE} \\ P_3 < 0 \text{ 倾向SW} \end{cases} \\ P_2 < 0 \begin{cases} P_3 > 0 \text{ 倾向NW} \\ P_3 < 0 \text{ 倾向SE} \end{cases} \end{cases}$$

$$P_1 < 0 \begin{cases} P_2 > 0 \begin{cases} P_3 > 0 \text{ 倾向SE} \\ P_3 < 0 \text{ 倾向NW} \end{cases} \\ P_2 < 0 \begin{cases} P_3 > 0 \text{ 倾向SW} \\ P_3 < 0 \text{ 倾向NE} \end{cases} \end{cases}$$

按地质学习习惯, 倾向  $T$  为从磁北顺时针旋角, 于是有:

$$\begin{aligned} \text{NE} & T = \alpha \\ \text{SE} & T = 180 - \alpha \\ \text{SW} & T = 180 + \alpha \\ \text{NW} & T = 360 - \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

### 2.3 平面拟合与显著性检验

通过结构面上的点拟合平面时, 通常都把(8)式写成如下误差方程式

$$V = a + bX + cZ - Y \quad (14)$$

式中  $a = 1/P_3$ ;  $b = -P_1/P_2$ ;  $c = -P_3/P_2$

$n$  个点有  $n$  个误差方程式, 矩阵表示为

$$V = B \cdot F - Y \quad (15)$$

式中  $V = (V_1, V_2, \dots, V_n)^T, Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$ ;

$$F = (abc)^T;$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Z_1 \\ 1 & X_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_n & Z_n \end{bmatrix}$$

由最小二乘法得法方程

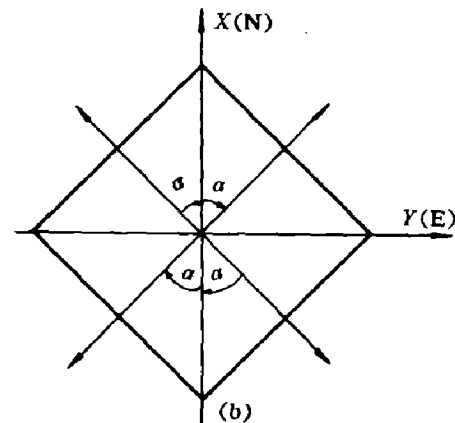
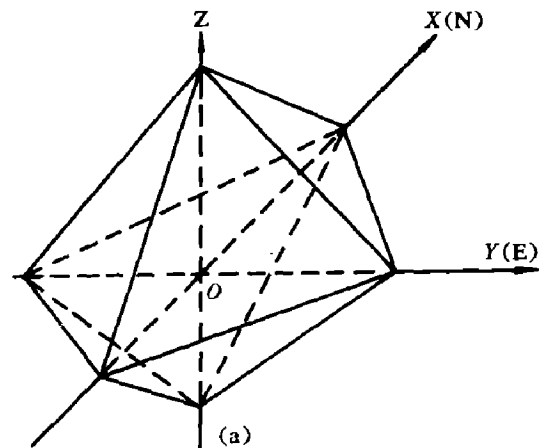


图2 倾向方位判定图

$$B^T B \cdot F - B^T Y = 0 \quad (16)$$

于是便可解出  $a, b, c$ , 则

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= -ab \\ P_2 &= a \\ P_3 &= -ac \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

为了检验拟合效果, 在计算中引入  $F$  检验, 立原假设  $H_0: b = c = 0$ , 若

$$F = \frac{n-3}{2} \cdot \frac{R^2}{1-R^2} < F_{1-\alpha}(2, n-3) \quad (18)$$

接受  $H_0$ , 认为在显著水平  $\alpha$  上拟合无意义(结构面起伏差太大或测量误差太大的情形)。这里  $n$  为结构面上的点数,  $R$  为全相关系数:

$$R = \sqrt{U/L} = \sqrt{1-Q/L} \quad (19)$$

式中  $U$  为回归平方和;  $Q$  为残差平方和;  $L$  为离差平方和

由于我们采用的是手持普通相机任意交向拍摄被测结构面若干像片, 所以  $Y$  方向(东西方向)误差并非一定最大。因此, (8)式可写成

$$X = a + bY + cZ \quad (20)$$

式中  $a = 1/P_1; b = -P_2/P_1; c = -P_3/P_1$

及

$$Z = a + bX + cY \quad (21)$$

这时  $a = 1/P_3; b = -P_1/P_3; c = -P_2/P_3$

在过去的作业中<sup>[9]</sup>, 发现采用不同回归方程所得  $P_1, P_2, P_3$  有时差别较大, 因而倾向和倾角值也有较大差异。这是由于地质结构面的平整度与其上点的分差以及测量方法误差大所引起的。如果用完全同一平面上的点去拟合, 无论采用那个回归方程, 结果都是一样的。这样便产生结果选择问题。一般应该根据拟合效果来选用  $R$  值最大或  $F$  值最大者作为最好结果。

### 2.4 误差估计

由(16)式和(17)应用误差传播定律得倾向和倾角的中误差为

$$\left. \begin{aligned} m_a &= \pm \frac{K}{1+b^2} m_b \\ m_\beta &= \pm \frac{k}{1+b^2+c^2} \left[ \frac{b^2 c^2}{1+b^2 m_b^2} + (1+b^2) m_c^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中  $K = 180/\pi$

采用回归方程(20),  $m_a$  和  $m_\beta$  同(22)式。对

于采用(21)式,  $m_a$  和  $m_\beta$  为

$$\left. \begin{aligned} m_a &= \pm \frac{k}{b^2+c^2} (b^2 m_b^2 + c^2 m_c^2)^{1/2} \\ m_\beta &= \pm \frac{k}{1+b^2+c^2} \left( \frac{b^2}{b^2+c^2} m_b^2 + \frac{c^2}{b^2+c^2} m_c^2 \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

空间两点间距离中误差  $m_s$  为

$$m_s = \sqrt{2\left(\frac{\Delta X}{s}\right)^2 m_x^2 + 2\left(\frac{\Delta Y}{s}\right)^2 m_y^2 + 2\left(\frac{\Delta Z}{s}\right)^2 m_z^2} \quad (24)$$

## 3 试验工作与结果

在中南工业大学地质系有关人员的协助下, 我们在一个实验室内设计了一个模拟现场。地质结构面为四个有机玻璃教具, 控制架为可伸缩和拆卸的活动控制架, 其控制点坐标由精密空间前方交会测定, 经检验坐标中误差小于 1.0 mm。

A、B、C、D 四个结构面按一定方式放置, 其中 A、B 和 C 为走向大致相同的一组结构面。控制架安置时采用罗盘投影方法使其 X 轴朝正北。摄影前用笔在结构面上画上 4~6 个十字型标志, 摄影后用罗盘实测各结构面的产状, 用钢尺测量大小, 数据见表 1 和表 2。实验采用的相机为 YASHICA120 型, 其  $f$  为 80 mm, 数字化仪为 TG1017, 其分辨率即一次观测中误差为  $\pm 0.1$  mm。由于模具小和被摄范围小, 所以没有印制放大的正片(相片), 而对同底片大小的左右两正片数字化。整体模型用控制架水平架上两个点和竖直杆上一个点进行绝对定向。模型解算由光束平差程序 ZEBUND 完成。为了同时计算三个回归方程的结果以便选  $R$  值或  $F$  值最大者作为所需结果, 在计算结构面产状程序中, 通过调换坐标数组的办法, 使得三个拟合方程都可采用相同的子程序计算  $\alpha, \beta, R, F$  值以及判定倾向方位。计算所得结果见表 1 和表 2。

由 C 面的拟合方程和 A 面上标志点的坐

标,解得A面与C面的距离 $d$ 为0.337 m,所以,A、B和C这一组结构面的密度为0.112 m/条。

由表1和表2可知倾向平均误差为 $0^{\circ}49'$ ,最大者 $1^{\circ}08'$ ;倾角平均误差为 $0^{\circ}40'$ ,最大者 $1^{\circ}18'$ ;长度平均误差为4.2 mm,可见精度是较高的,这与误差估计公式是相符的。总之,结果是令人鼓舞的。

表1 结构面倾向数据

产状	结构面号			
	A	B	C	D
新法	94 $\pm$ 59'	99 $\pm$ 25'	89 $\pm$ 08'	49 $\pm$ 43'
倾向 罗盘	96 $\pm$	99 $\pm$	88 $\pm$	49 $\pm$
差值	1 $\pm$ 01'	0 $\pm$ 25'	1 $\pm$ 08'	0 $\pm$ 43'
新法	19 $\pm$ 14'	33 $\pm$ 18'	30 $\pm$ 36'	34 $\pm$ 46'
倾角 罗盘	19 $\pm$	32 $\pm$	31 $\pm$	34 $\pm$
差值	0 $\pm$ 14'	1 $\pm$ 18'	0 $\pm$ 24'	0 $\pm$ 46'

表2 结构面大小数据

大小	结构面号			
	A	B	C	D
新法	34.3 $\times$ 32.5	39.0 $\times$ 35.8	34.6 $\times$ 29.0	29.9 $\times$ 26.3
钢尺	33 $\times$ 31.5	39.5 $\times$ 36	34.5 $\times$ 29	30 $\times$ 26.5
差值	1.3 $\times$ 1.0	0.5 $\times$ 0.2	0.1 $\times$ 0	0.1 $\times$ 0.2

## 4 总 结

下面给出单相机光束法测定地质结构面自然特性的步骤如下:

(1) 在现场用粉笔等工具在结构面上特征部位和代表性部位画上若干十字形标志(可尽量利用自然标志点如石英脉点、岩缝交叉点)。将活动控制架安置在被摄结构面附近。然后手持相机在合适位置进行交向摄影,保证相邻像

片有一定的重叠度;

(2) 在数字化仪上数字化正片标志点和控制点,然后应用ZEBUND在微机上解算模型特征点位置;

(3) 按有关公式或程序计算结构面自然特性要素值。

必须指出,该方法测定野外较大规模的地质结构面时,精度会稍低于本次试验的情况,这时,传统方法的精度往往也特别低。就一般情况,从理论分析,单相机光束法满足 $2^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 的工程应用要求是完全能做到的。

总之,单相机光束法野外工作量小,作业简便,不需昂贵设备,所得结果精度较高,有了结构面数字模型使得对结构面作深入的定量地质研究成为可能,所以单相机光束法在地质上具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- 1 谷德振. 岩体工程地质力学基础. 北京: 科学出版社, 1979, 198~214.
- 2 Brandow V D, Karara H M, Damberyer H H and Krausse. H F. The Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1976, 42(5).
- 3 Allam M. Optical Rock Face Deformations and Orientation of Geological Discontinuities in Open-pits Mines Using Analytical Photogrammetry. "ISP", 1975.
- 4 严韶华. 勘察科学技术, 1987(6), 56-58.
- 5 Zhu Yixuan et al. In: PC' 91 meeting and international symposium, FIG. Beijing, 1991, 655-664.
- 6 曾卓乔. 测绘学报, 1990, 19(4), 298-306.
- 7 Wang Xibo. PC' 91 Meeting and International Symposium, FIG. Beijing, technical Papers(I), 1991, 573-583.
- 8 陈道清等. 见: 中国测绘学会矿山测量综合性学术会议论文, 庐山, 1987年7月.