

# 洞室摄影地质编录原理及其精度

李 浩<sup>1</sup> 张友静<sup>1</sup> 华锡生<sup>1</sup>

(1 河海大学土木工程学院, 南京市西康路特 1 号, 210098)

摘 要: 阐述了摄影地质编录原理及其系统工作流程, 并研究了洞室的摄影地质编录的精度。研究表明, 洞室数字影像展示图足以满足作为编录底图的精度要求; 摄影测量能够达到测定地质产状要素的精度要求。

关键词: 地质编录; 近景摄影测量; 洞室; 精度

中图法分类号: P234. 1; P623. 3

地质编录是对洞室、边坡、基坑等岩石开挖断面进行地质观察和描述, 记录地质层产状及其地质特性的技术过程。20 世纪 70 年代以来, 像片被用以辅助地质编录, 但通常只供目视判读和解译。近年来, 数码相机的出现解决了在工作现场快速获取目标影像的问题, 但由于普通数码相机为非量测相机, 因而基于数码相机的地质编录方法不具量测性。笔者结合生产实践研究开发的基于数码相机的摄影地质编录系统, 不但实现了编录的几何精度控制, 而且大大提高了地质编录的自动化、信息化技术水平。

## 1 洞室的摄影地质编录原理

洞室摄影地质编录的作业流程为: 数字影像获取→影像预处理→影像几何校正→影像增强→影像镶嵌制作洞室数字影像展示图→机助地质编录(信息提取与特征描述)→空间数据库管理(图形、图像、属性)→成果输出。洞室摄影地质编录的关键是制作洞室影像展示图, 即将像片影像投影至目标柱面后的影像展示图, 使其成为摄影地质编录的底图; 其次是以影像展示图为底图进行机助编录。

### 1.1 洞室影像展示图的制作

洞室横截面多为圆形、矩形、城门形或马蹄形等。地质编录的作业面是沿洞轴伸展的某种柱面, 洞室地质编录图是目标柱面沿柱轴线剖切后的平面展示图。

#### 1.1.1 影像几何校正

洞室摄影时, 数码相机由专门的支架连接至经纬仪上, 构成摄影经纬仪。像片外方位元素即可通过安置确定。影像几何校正就是将像片影像投影至目标柱面上获取洞室柱面影像, 再将柱面影像变换至展示平面的影像处理过程。以城门形洞为例, 设洞宽  $W$ , 洞壁高  $H$ , 拱高  $T$ , 拱半径  $R$ , 如图 1 所示。若投影中心的物方坐标为  $(X_s, Y_s, Z_s)$ , 像点  $a$  的像空间辅助坐标为  $(u, v, w)$ , 则投影光线  $sa$  的直线方程式为:

$$\frac{X - X_s}{u} = \frac{Y - Y_s}{v} = \frac{Z - Z_s}{w} = \lambda \quad (1)$$

洞壁所在的平面方程为:

$$Y = W/2 \quad (2)$$

联立式(1)、式(2), 解得物点  $A$  的空间坐标为:

$$\begin{cases} X = (\frac{W}{2} - Y_s) \frac{u}{v} + X_s \\ Y = \frac{W}{2} \\ Z = (\frac{W}{2} - Y_s) \frac{w}{v} + Z_s \end{cases} \quad (3)$$

进而可确定物点  $A$  在洞室展示图上的坐标  $(X_{op}, Y_{op})$ 。点位如图 2 中  $A$  点所示:

$$\left. \begin{aligned} X_{op} &= X \\ Y_{op} &= (H - Z) + \left[ \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \left( R - \frac{W}{2} \right) / \left( \frac{W}{2} \right) \right) \right] \cdot R \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

显然, 依据坐标  $(X_{op}, Y_{op})$  及像点  $a$  的灰度值进行图像重采样即可生成洞室影像展示图。

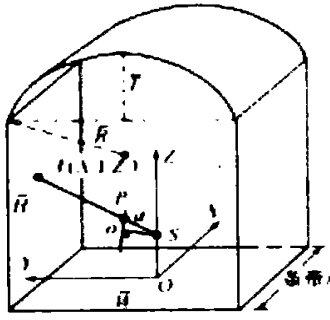


图 1 像点在目标面上的投影

Fig. 1 Projection of Image Point on Object Surface

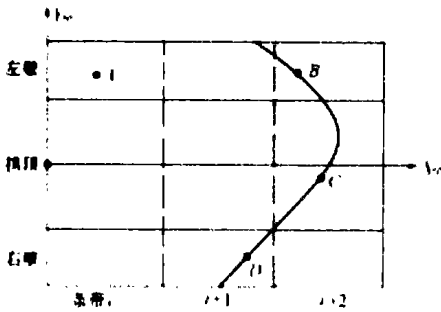


图 2 硐室影像展示图

Fig. 2 Orthophotomosaic of an Excavated Section

必须指出的是,不同硐型的目标柱面方程是不相同的,同一硐型不同部位的目标面方程也不相同,故计算式(2)、式(3)、式(4)时须视具体硐型及部位而定。

### 1.1.2 影像辐射校正

硐室摄影采用人工照明,故由不同原始影像制作的影像展示图在色调上常存在着较大差异。影像辐射校正就是对影像展示图进行辐射度处理,

$$\begin{cases} X_B = X_{op}^B; Y_B = \frac{W}{2}; Z_B = \tan^{-1}[\frac{W}{2(R-T)}] R + H - Y_{op}^B \\ X_C = X_{op}^C; Y_C = R \sin(\frac{Y_{op}^C}{R}); Z_C = R \cos(\frac{Y_{op}^C}{R}) + (H + T - R) \\ X_D = X_{op}^D; Y_D = -\frac{W}{2}; Z_D = \tan^{-1}[\frac{W}{2(R-T)}] R + H + Y_{op}^D \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $(X, Y, Z)$  为点的物方空间坐标;  $(X_{op}, Y_{op}, Z_{op})$  为点的展示图坐标;其余的为硐形参数。

显然,根据构造线上三个以上点的空间坐标即可建立岩层平面方程式,从而算得层面产状要素,即倾角、倾向或走向。

使各张校正后的图像色调均匀,反差适中,为影像镶嵌提供良好基础,且更适宜于对地质要素的判读与量测。

### 1.1.3 影像镶嵌

影像镶嵌即是经几何校正及辐射校正后的多张局部的影像展示图自动拼接成完整的硐室影像展示图的影像处理过程。由于各张影像展示图均以硐室展示平面为投影面,故影像拼接的依据是图像坐标  $(X_{op}, Y_{op})$ 。顺便指出,在硐室摄影时,每个摄站在硐室横截面内以不同倾角拍摄若干张影像形成一个条带覆盖一段硐室,不同摄站所摄条带衔接覆盖整个硐室。所以,影像镶嵌亦是先作条带内镶嵌形成条带影像,然后作条带间镶嵌得到整幅的硐室展示影像。

### 1.2 基于影像的机助编录

硐室影像展示图以影像形式客观、详尽、准确地记录了硐室开挖面上的地质信息,地质编录只需以影像展示图为底图描绘出构造线,标注相应的产状要素及岩层特性即可。在信息管理系统的支持下,可十分方便地实现对地质编录的图像、图形、属性等信息的编辑、管理、输出。就岩层产状要素而言,除了现场实测标注外,更方便的是利用影像展示图或立体像对量测并自动标注。

#### 1.2.1 影像展示图量测岩层产状

目标柱面上呈现的岩层构造线实际上是岩层面与目标柱面的交线。影像展示图形式上是平面图,但其像点与硐室的目标柱面上物点之间存在一一对应关系,故可通过在影像展示图上量测构造线上若干点来确定岩层面的空间姿态,进而求得层面产状。仍以拱形硐为例,设在影像展示图上量测了某构造线上的三点  $B, C, D$ ,如图 2 所示,其在目标柱面上的相应点位如图 3 所示。

由点  $B, C, D$  在展示图上所处位置容易得到其相应的物方空间坐标为:

#### 1.2.2 立体像对量测岩层产状

根据硐室的地质状况和开挖情况,若有需要,拍摄时可使相邻条带影像之间保持 50% 以上的重叠度,即可采用立体像对来量测岩层产状。

作业时,只需在影像展示图上确定被量测的

岩层露头,系统将根据露头空间位置自动调出覆盖该露头的立体像对。量测岩层面上三个以上同名像点坐标,经空间前方交会得到相应的物方空间坐标后,即可建立岩层面方程式,算出产状要素。与影像展示图量测产状相比,立体像对量测产状只需观测小块的岩层露头。

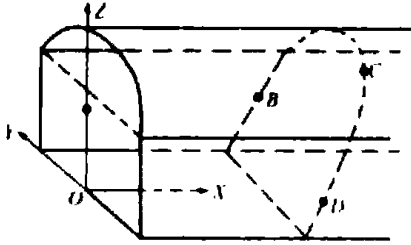


图3 目标柱面上的岩层构造线

Fig. 3 A Geological Construction Line on Object Surface

## 2 洞室摄影地质编录的精度

洞室通常长达数百 m 至数千 m, 拍摄影像可能多达上千张。因此,应尽量减小洞室影像展示图的数据量。另一方面,洞室摄影纵距通常只有数 m, 因此,利用中低分辨率影像即可取得作业所需精度。故洞室摄影宜采用存贮数据量较小的中低分辨率的影像拍摄。系统试验中,使用 Fuji Mx-2900 数码相机,选择像幅为 640 像元×480 像元。

### 2.1 像点构像精度

构像精度取决于构像畸变残差及内方位元素误差。格网成像试验表明,在设法改正物镜成像对称性和非对称性变形后,构像畸变残差中误差为 1 个像元,内方位元素误差则受内方位元素检测精度及内方位稳定性的共同影响。根据控制场方法检定,相机内方位元素中误差约为 2 个像元。考虑构像畸变残差及内方位元素误差的联合影响,像点坐标中误差  $m_x = m_z \approx 22.5$  像元。

### 2.2 洞室影像展示图的精度

#### 2.2.1 像点在目标面上的投影精度

投影精度上,摄影距离相同时,平面目标面比圆弧面受影像倾角的影响更大。仍以直墙洞壁为例,由式(3)可导出投影点的物空间坐标中误差:

$$\begin{cases} m_x^2 = m_{x_s}^2 + \lambda^2 m_u^2 + u^2 m_\lambda^2 \\ m_z^2 = m_{z_s}^2 + \lambda^2 m_w^2 + w^2 m_\lambda^2 \\ m_y^2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $m_\lambda^2 = (1/v^2) m_{y_s}^2 + (\lambda^2/v^2) m_v^2$ ;  $m_u - m_v - m_w$  为像点的像空间辅助坐标中误差,可由像点在像空间坐标系及像空间辅助坐标系间的坐标变换式导出算式。

洞室拍摄时使用专门设计的影像定向装置,影像外方位元素设置中误差为  $m_\varphi = m_\omega = m_\kappa = \pm 2'$  及  $m_{x_s} = m_{y_s} = m_{z_s} = \pm 5$  mm。就上述构像精度的影像,取投影精度最差的像幅边缘像点为例,设其像平面坐标为  $X = 300$  像元、 $Z = 200$  像元。则对  $W = 6$  m 的洞室,当影像倾角  $\omega = 45^\circ$  时,由式(6)可算得  $m_x = \pm 16.2$  mm、 $m_z = \pm 24.6$  mm。由于投影精度随影像倾角而改变,故在数据处理中设置了若干物方空间过渡坐标系,  $45^\circ$  角是影像倾角的上限,即像点在目标面上的投影坐标中误差将不超过以上计算结果。当取最有利的投影条件,即倾角为零的影像上的中心像元投影时,同样可算得相应物方空间坐标中误差为  $m_x = m_z = \pm 12$  mm。

#### 2.2.2 影像展示图的精度

洞室正射影像的投影面是目标柱面,而实际开挖中存在超欠挖情况。超欠挖点在投影面(设计开挖面)上的投影位移估式为:

$$\delta = \Delta Y \cdot R / Y$$

式中,  $\Delta Y$  为超欠挖深度;  $R$  为超欠挖点偏离主光轴方向的距离。

像点在目标面上的投影误差与超欠挖投影位移的联合影响,决定了影像展示图的精度。按现有施工规范,若超欠挖深度中误差为 20 cm,则由式(7)算得上例中像幅边缘点的超欠挖投影位移的中误差  $m_\delta = \pm 113$  mm。可见,影像展示图的精度主要取决于超欠挖引起的投影差。当然,相对实地的最大为十几 cm 的位置偏差能够满足编录精度要求。

### 2.3 地质构造线的编录精度

构造线的编录精度为:

$$M_p = \pm \sqrt{m_x^2 + m_z^2 + m_\delta^2 + m_\lambda^2} \quad (7)$$

式中,  $m_\Delta$  的影像展示图上对构造线的描绘误差主要受影像质量、图层配准精度及鼠标操作定位精度的影响。

即使  $m_\Delta = \pm 3$  像元,由式(7)可算得上例中最不利精度  $M_p = \pm 118$  mm,而没有超欠挖投影位移的最有利精度  $M_p = \pm 22$  mm,实际编录精度应介于两者之间。

### 2.4 立体像对测定产状的精度

为了估算精度方便,设每个层面量测 4 个点,

且点的平面分布呈正方形, 如图 4 所示。

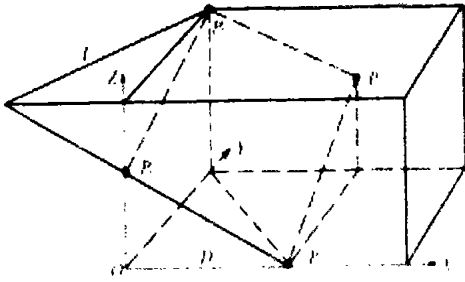


图 4 岩层面及其产状

Fig. 4 Rock Surface and Its Geological Attitude

各点物方坐标为  $P_1(0, 0, Z_1)$ 、 $P_2(0, D, Z_2)$ 、 $P_3(D, 0, Z_3)$ 、 $P_4(D, D, Z_4)$ 。层面所在平面方程式为  $Z = AX + BY + C$ , 则最小二乘平面系数为:

$$\begin{cases} A = -(Z_1 + Z_3 - Z_2 - Z_4) / 2D \\ B = -(Z_1 + Z_2 - Z_3 - Z_4) / 2D \end{cases} \quad (8)$$

由此得层面倾角  $\alpha$  及倾向  $\theta$  为:

$$\begin{cases} \alpha = \cos^{-1}(1 / \sqrt{A^2 + B^2 + 1}) \\ \theta = \tan^{-1}(A / B) \quad B \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

当设物点高程中误差均为  $m_Z$  时, 可得  $\alpha$  及  $\theta$  的测定中误差为:

$$\begin{cases} m_\alpha^2 = (A^2 m_A^2 + B^2 m_B^2) / [(A^2 + B^2 + 1)^3 \sin^2 \alpha] \\ m_\theta^2 = (B^2 m_A^2 + A^2 m_B^2) \cos^4 \theta / B^4 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $m_A^2 = m_Z^2 / D^2 + (Z_1 + Z_3 - Z_2 - Z_4)^2 m_D^2 / (4D^4)$ ;  $m_B^2 = m_Z^2 / D^2 + (Z_1 + Z_2 - Z_3 - Z_4)^2 m_D^2 / (4D^4)$ 。

立体测量中, 影响  $m_A$ 、 $m_B$  进而影响  $m_\alpha$ 、 $m_\theta$  的物点测定精度是相对于像空间辅助坐标系的, 即不含摄站误差  $m_{X_s}$ 、 $m_{Y_s}$ 、 $m_{Z_s}$ 。内方位误差对同一张影像的像点坐标影响是系统性的, 其对物点相对坐标的影响可忽略。此外, 对相机与定向装置的同一次连接而言, 影像外方位角元素误差不但小, 而且也是系统性的, 故所有角元素误差对物点相对坐标的影响亦可不计。

为了进一步了解  $\alpha$  及  $\theta$  的测定精度, 对上述硐室取一倾角、倾向均为  $45^\circ$  的层面为例。从实际考虑, 假设  $D = 150\text{mm}$ 。由正直等倾作业的精度估式可算得不利条件下物点坐标精度  $m_X = \pm 14.5\text{mm}$ ,  $m_Y = \pm 13.2\text{mm}$ ,  $m_Z = \pm 22.6\text{mm}$ , 有利条件下  $m_X = \pm 4.7\text{mm}$ ,  $m_Y = \pm 11.1\text{mm}$ ,

$m_Z = \pm 4.7\text{mm}$ 。由此根据式(10)可算得不利条件下  $m_\alpha = \pm 4.7^\circ$ ,  $m_\theta = \pm 9.5^\circ$ , 有利条件下  $m_\alpha = \pm 2.1^\circ$ ,  $m_\theta = \pm 4.3^\circ$ 。

当层面倾角、倾向改变时,  $m_\alpha$ 、 $m_\theta$  也会有所变化。从算例可看出, 立体像对测定产状通常都能达到编录精度要求。对大倾角摄影的不利情况, 则应选择面积较大的曝露层面量测, 因为  $m_\alpha$ 、 $m_\theta$  与  $D$  几乎成反比。

### 2.5 影像展示图测定产状的精度

设在影像展示图上量测了构造线  $l$  上的 4 个点, 点在岩层面上的空间分布形态亦如图 4 所示。显然, 仍由式(10)来估计岩层的产状量测精度。

但是必须注意到, 这时计算中所用到的物点坐标精度是编录构造线的精度。仍以倾角、倾向均为  $45^\circ$  的层面为例, 这里  $D = 6\text{m}$ 。按上述编录方法, 有最不利精度  $m_X = m_Z = M_P / \sqrt{2} = \pm 83\text{mm}$ ,  $m_Y = m_{\Delta Y} = \pm 200\text{mm}$ , 由式(10)算得  $m_\alpha = \pm 0^\circ 30'$ ,  $m_\theta = \pm 1^\circ 18'$ 。按没有超欠挖的有利精度  $m_X = m_Z = M_P / \sqrt{2} = \pm 15.6\text{mm}$ ,  $m_Y = m_{\Delta Y} = \pm 0\text{mm}$ , 同样算得  $m_\alpha = \pm 0^\circ 04'$ ,  $m_\theta = \pm 0^\circ 10'$ 。

产状测定精度随硐型、硐大、岩层构造线长度及测量点分布而改变。但无论怎样, 从式(10)及算例可看出, 用影像展示图测定岩层产状具有较高精度, 足以满足编录的精度要求。

## 3 结 语

对水电工程中不同硐型硐室的实际编录试验表明, 硐室影像展示图的精度、构造线编录精度及岩层产状量测精度均不超过理论限差。摄影地质编录在作业过程中具有的快速、准确、完整、安全的优点, 使之成为有推广前景的地质编录方法。数字摄影测量与空间信息系统相结合的摄影地质编录系统促进了地质编录的自动化发展, 亦为进行计算机地质统计分析 & 岩体稳定性分析创造了条件。

### 参 考 文 献:

- 1 黄世德. 航空摄影测量学(下). 北京: 测绘出版社, 1987. 200~222
- 2 张友静, 李 浩. 水电工程地质编录信息系统开发与应用. 水利水电科技进展, 1999, 19: 5~7
- 3 滕红燕. 应用数码相机进行隧洞施工摄影地质编录的研究:[学位论文]. 南京: 河海大学, 1998
- 4 刘友光. 工程数字地面模型的建立与应用及大比例尺

adaptive adjustment of learning rate) have turned to be more efficient in land use/cover change detection than BPNN because they take less ANN training time and have no local minimum.

The experiments based on TM satellite images of different time have shown that ANN method is practical and efficient for the change detection. The accuracy of it is higher than those of the traditional methods, and it can provide both changed areas and categories at the same time. Besides, it is easy to integrate multi source data because of low demand for data distribution.

**Key words:** land use/cover; dynamic monitoring; artificial neural network

---

**About the author:** XIAO Ping, senior researcher, Ph. D. He is engaged in the research on remote sensing and GIS and has taken part in many important projects including 'underwater image processing system' and 'development of land cover classification standards'. More than ten relative papers of his have been published.

E-mail: xiaopinggis@163.com

---

(上接第 581 页)

1999. 27~31

数字测图. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1997. 162  
~164

作者简介: 李浩, 副教授, 博士生。现主要从事摄影测量及 GIS 的研究。

5 张 勤. 岩土工程地质学. 南京: 河海大学出版社,

## Principle and Geometric Precision of Photo Geological Logging for Tunnel

LI Hao<sup>1</sup> ZHANG Youjing<sup>1</sup> HUA Xisheng<sup>1</sup>

(1 College of Civil Engineering, Hehai University, 1 Xikang Road, Nanjing, China 210098)

**Abstract:** This paper develops new methods to detect the adjusting parameters for digital image distortion, and to determine the elements of interior orientation of cameras. The mean square errors of photo coordinate is lower than 2.5 pixels. A new manner of digital photo geological logging and its principle are introduced, so is a practical system developed by the authors. This paper also discusses the geometric precision of photo geological logging for tunnels. Theory and practice prove that the precision of photo logging can be effectively controlled by use of a digital orientation camera based on a normal digital camera, that digital orthophotomosaic obtained from original photos can be used as logging base map, and that photogrammetry based on a normal digital camera can also be used to measure geological elements of attitude of layers.

**Key words:** geological logging; close range photogrammetry; tunnel; geometric precision

---

**About the author:** LI Hao, associate professor, Ph. D candidate. His major researches are photogrammetry and GIS.