

# 试验模型变形测量数码照相装置研究

汤伏全

(西安科技大学 测绘科学与技术学院 陕西 西安 710054)

## Study of Digital Photographic Device to Observe Deformation for Test Model

TANG Fuquan

**摘要:** 针对矿山开采沉陷相似材料模型试验的特点, 提出适合小变形体高精度位移测量的普通数码照相方法, 通过在测点周围设置独立的控制格网并进行单点数码照相来获取模型测点的变形量, 最后用试验验证该方法的实用性。

**关键词:** 试验模型; 数码照相; 变形测量; 影像纠正

### 一、引言

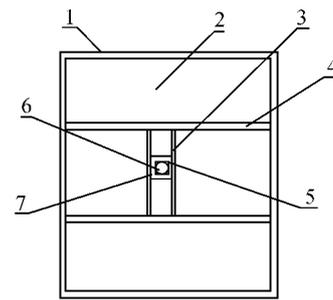
室内相似材料模型试验是研究矿山开采和地质(岩土)工程问题的重要手段, 且试验模型往往是按原型缩小数百倍制作而成的, 因此试验中对于模型位移测量的精度要求达到  $\pm 0.1$  mm 左右。而现有的模型位移观测方法, 如经纬仪或全站仪法、精密水准仪法、透镜放大法、百分表法等, 其精度往往难以达到上述要求。近年来, 虽然近景摄影测量和三维激光扫描技术也开始应用于模型试验的数据采集, 但这些方法需要使用大型测量设备<sup>[1]</sup>, 而且后者对实体坐标的测定精度也难以满足要求<sup>[2-3]</sup>。若采用普通数码相机对整个模型进行全剖面一次摄影, 由于相似材料模型长度一般在 2 ~ 5 m, 因此影像分辨率较低, 使得像点量测精度不能满足模型试验要求。为此, 本文提出一种基于单点普通数码照相的模型变形测量方法。

### 二、数码照相测量装置

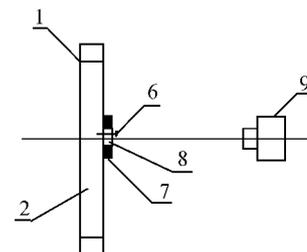
试验模型变形测量装置如图 1 所示。模型支架内装置相似材料平面模型, 纵梁和横梁固定在模型支架上; 标准参照体固定在纵梁和横梁上, 它是中心为空心圆且四周为带标准刻画的正方形格网, 且正方形格网与空心圆同心同面, 是变形测量的固定参照或控制坐标系; 测量标志透过空心圆垂直插入相似材料平面模型内。

在模型试验中, 为了获得高精度的位移测量值, 在每个测点标志周围设置独立的控制格网, 采用普通数码相机对每个测点标志和标准参照体进

行近距离拍照, 利用测点四周的控制格网的角点坐标分别对每个测点的数码影像进行畸变纠正和坐标变换处理, 从而获得测点在独立控制格网中的高精度坐标值, 并以此计算各测点的动态移动变形量。



(a) 模型侧面



(b) 模型剖面

图 1 模型测量系统示意图

注: 1——支撑架; 2——相似材料模型; 3——纵梁; 4——固定梁; 5——正方形控制格网; 6——初始测量标志; 7——标准参照体; 8——空心圆; 9——数码相机

### 三、模型试验测量方案

在模拟西部黄土山区开采沉陷变形的试验研究中, 笔者基于铜川某矿 905 工作面的地质采矿条件制作了相似材料模型。为了获取地下煤层开采

收稿日期: 2011-11-08

基金项目: 陕西自然科学基金(SJ08D01)

作者简介: 汤伏全(1966—), 男, 湖南湘潭人, 博士, 副教授, 主要从事变形监测与分析方面的工作。

引起的黄土层地表和内部的移动变形规律,试验中需要高精度地测量模型的动态变形量。由于模型比例尺为1:200,若实地测量精度为±10 mm,则模型的测定精度不能低于±0.05 mm。为此,笔者采用上述数码照相装置来测定模型位移。

所制作的相似材料平面模型长度为2.1 m,高度为0.96~1.05 m。模型地表起伏不平,模拟地层分为10层。各分层模型材料以砂子、石膏、云母为主,并按相似理论来计算其材料配比,各分层之间以云母粉隔开,试验模型全景如图2所示。



图2 黄土山区开采沉陷试验模型

根据试验要求布设测点。将一玻璃梁直接固定在模型侧面的支撑架挡板上,在测点设计位置钻直径为10~20 mm的圆孔。在整个试验过程中保持玻璃梁位置不动。

独立控制格网尺寸为10 mm、20 mm、40 mm、60 mm等。测点为带“十”字形标志的大头针或长针,“十”字标志规格为2 mm×2 mm。控制格网和测点标志均采用普通相纸打印,线型宽度为0.07~0.1 mm。将控制格网中心的相纸剪掉,形成带空心园或空心方格的格网标志。控制格网最小刻度为0.5 mm,控制格网及测点安置如图3所示。

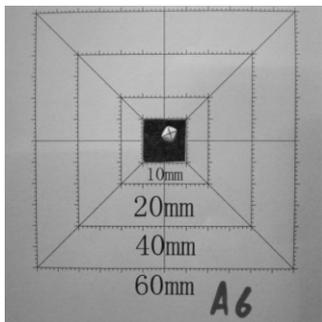


图3 控制格网与测点标志

固定控制格网时,要使空心格网中心与玻璃横梁上的圆孔中心对应,并将一端粘贴有“十”字形标志的长针从玻璃孔靠近顶部的位置垂直插入模型

内侧面,以使测点有足够的向下移动空间。测点标志顶部露出模型表面,与固定在玻璃横梁上的控制格网纸处在同一铅垂面内。试验模型的测点分布如图4所示。



图4 试验模型测点布置

在地表山坡起伏方向和表土层内部靠近基岩面附近各布设一排测点,测点间距为10 cm(相当于实地20 m),共布设40个测点。

采用700万像素的奥林巴斯FE-280型普通数码相机,在近距离拍摄模式下,针对单个测点进行拍照。在保证图像清晰的条件下,尽可能靠近被拍摄测点,拍摄距离为250~300 mm左右,并尽量使控制格网布满整个影像。拍照时将镜头取景框中心大致对准测点标志,以减小影像畸变改正后的残余误差。在开采前和各次开采后均对所有测点进行照相。

#### 四、数码影像处理

##### 1. 像平面坐标与屏幕量测坐标的变换模型

在计算机上量测数码影像的屏幕坐标 $(x', y')$ ,采用仿射变换将 $(x', y')$ 转化为像平面坐标 $(x, y)$

$$\begin{cases} x = d_1 + d_2x' + d_3y' \\ y = d_4 + d_5x' + d_6y' \end{cases} \quad (1)$$

式中,变换参数 $d_i (i=1, \dots, 6)$ 是通过影像4个控制角点的框标理论坐标及其相应的屏幕坐标解算得到的。数码相机的理论框标距可在立体量测仪中量测。由于框标距误差引起的像平面坐标误差属于比例误差,因此可在物方坐标解算中得以消除。像平面坐标和物方坐标系原点设在控制格网对角线交点 $O$ 上,如图5所示。

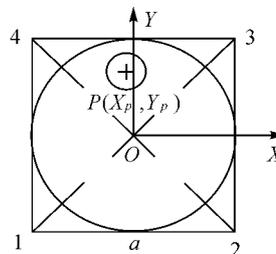


图5 独立坐标系

### 2. 畸变差改正与内、外方位元素解算的数学模型

数码相机的畸变差可用下式表示<sup>[4]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy \\ \delta y &= y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1 xy \end{aligned} \right\} (2)$$

式中  $k_i$  为径向畸变参数;  $p_i$  为偏心畸变参数;  $\delta x$ 、 $\delta y$  为畸变差, 与像平面坐标  $(x, y)$  和径向距离  $r$  有关, 其中  $r^2 = x^2 + y^2$ 。

将式(2)代入单像空间后方交会的共线方程<sup>[5]</sup>, 建立考虑畸变差  $\delta x$ 、 $\delta y$  的数码相机畸变检测与内、外方位元素解算的数学模型

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 - \delta x &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 - \delta y &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \right\} (3)$$

式中  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $f$  为影像的内方位元素;  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为物方点的物方空间坐标;  $X_s$ 、 $Y_s$ 、 $Z_s$  为摄站的物方空间坐标, 即外方位线元素;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为影像的3个外方位角元素  $\omega$ 、 $\varphi$ 、 $\kappa$  组成的9个方向余弦。考虑到模型试验中物方坐标  $Z=0$ , 因此可将式(3)转化为直接线形变换方程

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 - \delta x &= \frac{A_1 X + A_2 Y + A_3}{C_1 X + C_2 Y + 1} \\ y - y_0 - \delta y &= \frac{B_1 X + B_2 Y + B_3}{C_1 X + C_2 Y + 1} \end{aligned} \right\} (4)$$

在解出坐标转换参数  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  后, 可由式(4)反演直接进行像平面坐标和物方坐标之间的转换。

### 3. 数学模型的解算方法

由于式(4)中的变换参数和式(2)中的畸变参数之间存在相关性, 若将两式联合直接解算, 所组成的方程很可能因出现病态而无法求解<sup>[6]</sup>。为此, 采用序贯法<sup>[4]</sup>求解上述两组方程。先将式(4)变换为

$$\left. \begin{aligned} x - A/C &= x_0 + \delta x \\ y - B/C &= y_0 + \delta y \end{aligned} \right\} (5)$$

式中  $A = A_1 X + A_2 Y + A_3$ ;  $B = B_1 X + B_2 Y + B_3$ ;  $C = C_1 X + C_2 Y + 1$ 。将式(4)中  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $\delta x$ 、 $\delta y$  视为已知量,  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  为未知量, 对式(4)线性化组成第1组误差方程; 将式(2)中  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $p_1$ 、 $p_2$  视为未知量,  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  为已知量, 对式(2)线性化组成第2组误差方程; 将第1组方程解算的初步解作为第2组方程求解的基础, 再将第2组方程解算结果代入

第1组方程, 并反复迭代计算直至两组未知变量收敛到限差内, 即得坐标转换参数和畸变参数的正确解。上述计算过程由自编的 VB 程序进行解算。

### 4. 物方坐标测定的精度分析

采用上述普通数码相机对同一控制格网进行两次拍照, 并根据两次独立照相结果的较差计算点位测定中误差, 然后再根据对应点百分表测量与数码照相法测定结果的互差计算下沉测定中误差, 如表1所示。

表1 模型试验测量精度对比 mm

| 测定方法 | 数码照相法  |        | 百分表法   |        |
|------|--------|--------|--------|--------|
|      | 煤柱上方   | 采区上方   | 煤柱上方   | 采区上方   |
| 测点位置 | X      | Y      | X      | Y      |
| 中误差  | ±0.011 | ±0.012 | ±0.018 | ±0.017 |
|      |        |        | ±0.020 | ±0.026 |

数码照相测定中误差平均 ±0.023 mm, 相当于实地 ±2.3 mm 的偏差, 这说明单点数码照相法能满足模型试验要求。

## 五、模型变形测量结果

### 1. 垂直移动

根据测点的各次测定坐标之差计算模型垂直和水平移动值。根据最后一次测量结果, 绘出地表、土层深部两排测点的垂直移动(下沉)曲线, 如图6所示。

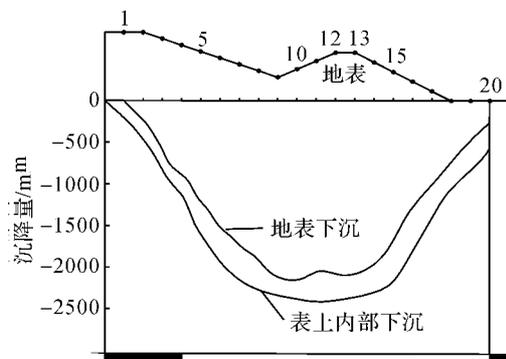


图6 模型测点的下沉曲线

地表下沉量均小于相应的土层深部下沉量, 表明黄土层中下沉呈衰减趋势。土层深部下沉曲线以采空区中心为对称, 在采空区中央正上方达到最大值, 为 2316 mm(化为实地下沉值)。地表下沉曲线的平底区正好处于地形坡度变化较大的山坡和沟谷位置, 由于地表滑移影响, 使该处下沉曲线呈现横“S”型分布, 出现了两个下沉极值点。而这种变化在土层内部和基岩中表现很微弱。这反映了

地表下沉曲线明显受到地形变化的影响,位于坡顶或坡体上测点(如图6中10、12、13号点)的下沉量有增大趋势,位于谷底(如图6中9号点)的测点下沉有减小趋势。

## 2. 水平移动

移动稳定后地表和土层内部测点的水平移动曲线如图7所示。其中,地表水平移动曲线明显不同于土层内部,水平移动绝对量远大于土层内部,在采空区中央附近的水平移动值均不为零。左侧指向采区中央的水平位移量远大于右侧,最大水平移动值为780 mm,位于5号测点,达到最大下沉量的0.47倍。在移动盆地右侧,指向采空区中央的水平位移量较小,在采空区边界上方20号点附近,水平位移量达到最大值。造成上述异常的原因是地表斜坡产生了指向下坡方向的滑移。左侧山坡滑移方向与开采水平位移方向相同,均指向采空区中央,两种位移叠加使左侧水平移动量增大。右侧山坡倾向与开采水平移动方向相反,两者叠加后水平位移量减小。试验结果反映了黄土山区开采沉陷变形的特殊性,与实际资料相符。

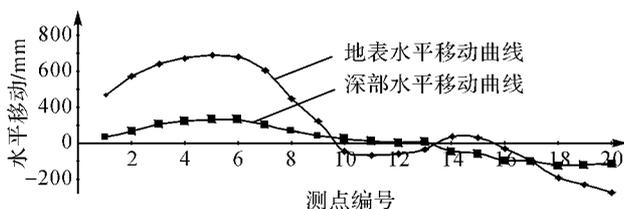


图7 模型测点的水平移动曲线

## 六、结束语

在室内模型试验中,采用普通数码相机近距离单点照相方法测定模型测点的位移变形,克服了全剖面一次摄影时分辨率低及量测误差大的缺陷,对单点数码影像进行常规图像处理 and 畸变纠正后,可获取高精度的测点坐标值,满足了模型试验对于小位移量测的高精度要求。其测量装置已获得实用新型专利(ZL200720031427.3),该方法可在类似条件下的小变形测量中推广应用。

## 参考文献:

- [1] TANG FUQUAN, Application of Close-range Photogrammetry to Observe Strata Movement of Similar Material Model[C]//The 18th International Conference of Geoinformatics. Beijing [s. n.] 2010.
- [2] 范海英. Cyra 三维激光扫描系统的工程应用研究[J]. 矿山测量 2004 26 (3): 16-18.
- [3] 李鹏, 张文兵, 李静. 三维激光扫描技术[J]. 科技信息 2009(31): 31-35.
- [4] 程效军, 胡敏捷. 数字相机畸变差的检测[J]. 测绘学报 2002 31(S): 113-117.
- [5] 张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社 2003: 12-20.
- [6] 卢秀山, 冯尊德, 王东, 等. 数码相机检校中的病态性及其解决措施[J]. 武汉大学学报: 信息科学版 2003, 28(S1): 44-47.

(上接第31页)

6) 报表打印模块: 对指定环号或里程的姿态数据进行打印。

## 六、结束语

为了适应更多的工作环境,本文从实际工程需要出发,开发了具有自主知识产权的盾构自动导向软件。该软件包含了3种姿态解算模型,其中,三点无角解算模型等同于德国海瑞克公司的VMT自动测量系统的工作原理;两点两角解算模型等同于日本小松集团的ROBOTEC自动测量系统的工作原理;三点两角解算模型是本软件的一个创新算法,它具有更高的解算精度。另外,该软件经过在实际工程试验中的使用,表明其精度可靠,运行稳定,界面

友好。

## 参考文献:

- [1] 李惠平, 夏明耀. 盾构姿态自动控制技术的应用与发展[J]. 地下空间 2003(3): 75-77.
- [2] 徐然, 潘国荣. 地铁智能导向系统研究[D]. 上海: 同济大学 2008.
- [3] 沈斌. “盾构之星软件”研究与开发技术综述[J]. 地下空间 2004 24(5): 741-747.
- [4] 唐争气. 盾构机掘进导向管理系统的研究及实现[D]. 昆明: 昆明理工大学 2006.
- [5] 陈义, 沈云中, 刘大杰. 适用于大旋转角的三维基准转换的一种简便模型[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004 29(12): 1101-1104.