

# 利用数字摄影测量进行钢结构挠度的变形监测

徐 芳<sup>1</sup> 于承新<sup>2</sup> 黄桂兰<sup>3</sup> 刘友光<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘科学与技术学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 山东建筑工程学院科研处, 济南市和平路 47 号, 250014)

(3 广州市规划局自动化中心, 广州市吉祥路 80 号, 510030)

**摘 要:** 钢结构的异常变形或局部损坏可通过荷载-挠度曲线以及纵轴线的挠度曲线反映出来。利用数字摄影测量方法进行钢结构的变形监测是传统测量方式的变革, 可实现半自动的实时监测。本文介绍了相应的测量方法并给出了实验结果。

**关键词:** 荷载-挠度曲线; 受压形变曲线; 中心线; 目标点识别; 目标点定位

中图法分类号: P231.5; TB3

钢结构在土木工程中有着广泛的应用。钢结构的强度和刚度以及稳定性直接关系到它的应用和安全, 因而对钢材及钢结构性能的测定进行研究极其重要。钢材在外力作用下所表现出来的各种特性称为力学性能指标, 这些指标主要是靠实验来测定的<sup>[1]</sup>。钢结构上任何部位的异常变形或局部损坏都会在杆件变形上得到反映, 杆件变形的量测反映了钢结构的整体变形, 可概括其总的工作性能。通过杆件变形测定, 可了解钢结构的刚度及其变化情况, 还可区分其结构及弹性和非弹性性质。钢材在受压时的工作特性通常以荷载-挠度曲线( $N-v_m$ )来表示, 某特征点的荷载-挠度曲线以及各特征荷载值下构件纵轴线的挠度曲线是杆件变形测量的主要内容<sup>[2]</sup>。在荷载一开始作用时就有挠度产生, 且挠度随荷载增大达到无穷大时, 荷载值可趋近欧拉临界力, 即杆件丧失承载力, 遭到破坏, 这时的钢结构就不再安全。

作为摄影测量学的一个分支, 工程与工业摄影测量是研究对各类工程目标物进行摄影, 以确定其形状、大小、几何位置及其变化的理论和技术<sup>[4]</sup>。随着计算机技术与图像处理技术的发展, 实时摄影测量成为一种趋势, 使测量的作业方式发生了革命性的变化。在钢结构施工和生产运转阶段, 利用数字摄影测量技术进行半自动或全自动的实时监测是今后进行钢结构安全监测的一个发展方向。

## 1 挠度变形监测的数字摄影测量方法

该方法用数字相机获取的影像(如图 1(a))进行二值化、滤波等预处理, 接着对边缘点进行跟踪, 得到每一目标的边界; 对每一条边界进行目标识别, 判断其是否是目标——圆; 然后对其进行定位。当把一幅图像中所有的目标点找到后, 记录下来并进行纠正, 纠正后的点与其他一系列图像中纠正后的相应的目标点进行比较, 得到目标点的变形值——挠度, 将这些挠度值绘成图表得到需要的成果。

### 1.1 影像预处理

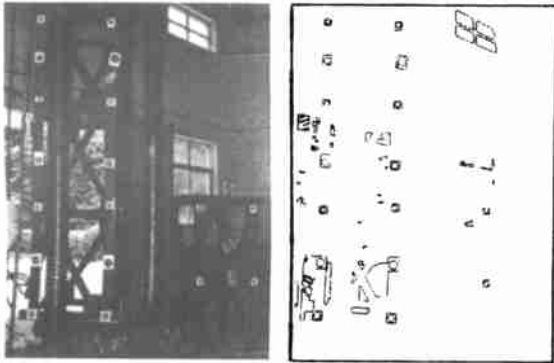
为了得到钢结构的挠度, 必须提取感兴趣的目标点。由于原始影像有许多不必要的信息, 首先应对其进行一些必要的预处理, 摒弃无用的信息。文中对图像进行二值化, 突出目标边界特征。

将人工标志点贴在实验钢架的横梁、竖梁及相应节点上, 依结构力学分析可知, 这些点是受压变形最大和最小处, 即最能显示出钢结构的挠度点位。量测以上标志点之间的两两相对距离, 达到亚毫米级精度。这些量测值作为真值保存。

利用两台数码相机, 从两个角度同时进行拍摄, 即分别拍摄钢架相互垂直的两个侧面(A面和B面), 从而形成了一时间序列的影像, 记录了

钢架在不同荷载作用下连续变形的整个过程。

由于实验中目标点是白底黑色的圆, 目标点本身的灰度反差大, 所以可只取一简单的阈值(如 200)对图像进行二值化。对二值化图像中的边缘点进行跟踪, 得到图像中景物的边界, 因目标点具有一定的尺寸, 所以当边界点数少于某一阈值(如 30)时, 认为此边界不可能是目标点边界, 应舍弃。结果如图 1(b)所示。



(a) B 面荷载为 17.5t 时的原始影像 (b) 二值化图

图 1 影像预处理

Fig. 1 Image Preprocessing

### 1.2 目标点识别与定位

目标点的识别与定位是得到钢结构挠度的基础, 在图像的预处理中得到了每一物体的边界, 对每一条边界进行识别与定位得到目标点的坐标。

对上述跟踪出的每一条边界进行圆的识别。根据圆具有良好的对称性, 可以排除图像中的直线和不规则曲线。将子图按从左到右、从上到下的顺序进行扫描。图中的每个边界点  $(i, j)$ , 若存在另一点  $(k, j)$ , 则取中点  $(u, j) (u = (i+k)/2)$ , 对所有中点进行 Hough 变换, 提取垂直直线作为圆的候选垂直对称轴  $l_v$ , 再将子图按从上到下、从左到右的顺序进行扫描。图中的每个边界点  $(i, j)$ , 若存在另一点  $(i, k)$ , 则取中点  $(i, v) (v = (j+k)/2)$ 。对所有的中点进行 Hough 变换,

提取水平直线作为圆的候选水平对称轴  $l_n$ 。取  $l_v$  和  $l_n$  的交点  $O(u, v)$ , 这时子图中的点组成的图形都具有水平和垂直方向上的对称性, 图形可能是圆, 也可能是矩形、正多边形等。根据圆上的点到圆心  $O$  距离相等的特性, 可排除矩形、正多边形等图形, 从而将整幅图中的圆保留下来, 见图 2(a)。接着是圆心定位, 可采用最小二乘准则, 利用多余观测值进行平差, 找到圆心位置, 见图 2(b)。

设圆以  $(x_0, y_0)$  为圆心,  $r$  为半径,  $(x_i, y_i)$  是圆上任一点, 圆的方程式为:

$$f(x, y) = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r_i^2 = 0$$

则 
$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$$

假设  $r_i$  为观测值,  $(x_0, y_0)$  为未知数, 初值  $(x_0^0, y_0^0)$  可由圆上的已知点  $(x_i, y_i)$  求均值得到, 则误差方程式为:

$$v_i = f(x_0^0, y_0^0) + \frac{\partial f}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial f}{\partial y_0} \delta y_0 - r_i = - \frac{x_i - x_0^0}{\sqrt{(x_i - x_0^0)^2 + (y_i - y_0^0)^2}} \delta x_0 - \frac{y_i - y_0^0}{\sqrt{(x_i - x_0^0)^2 + (y_i - y_0^0)^2}} \delta y_0 + f(x_0^0, y_0^0) - r_i$$

设  $R_0 = f(x_0^0, y_0^0)$ , 它由已知圆上点  $(x_i, y_i)$  到  $(x_0^0, y_0^0)$  的距离求均值得到, 则

$$v_i = - \frac{x_i - x_0^0}{\sqrt{(x_i - x_0^0)^2 + (y_i - y_0^0)^2}} \delta x_0 - \frac{y_i - y_0^0}{\sqrt{(x_i - x_0^0)^2 + (y_i - y_0^0)^2}} \delta y_0 + R_0 - r_i$$

写成矩阵形式为:

$$V = AX + L$$

式中,  $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]^T; X = \begin{bmatrix} \delta x_0 \\ \delta y_0 \end{bmatrix}$

$$L = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T;$$

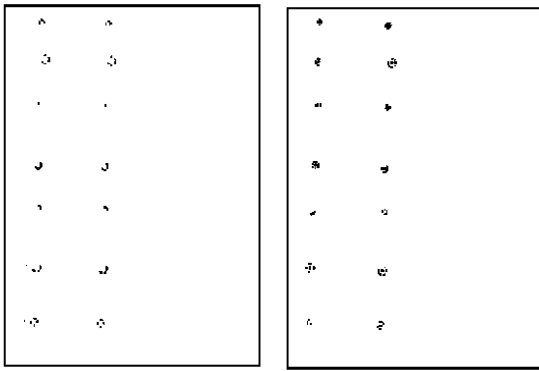
$$A = \begin{bmatrix} -\frac{x_1 - x_0^0}{\sqrt{(x_1 - x_0^0)^2 + (y_1 - y_0^0)^2}} & -\frac{y_1 - y_0^0}{\sqrt{(x_1 - x_0^0)^2 + (y_1 - y_0^0)^2}} \\ \dots & \dots \\ -\frac{x_n - x_0^0}{\sqrt{(x_n - x_0^0)^2 + (y_n - y_0^0)^2}} & -\frac{y_n - y_0^0}{\sqrt{(x_n - x_0^0)^2 + (y_n - y_0^0)^2}} \end{bmatrix}$$

由于观测值是等精度的, 所以权阵  $P = E$ 。根据误差方程组成法方程并解之, 得未知数:

$$\begin{aligned} A^T AX &= A^T L \\ X &= (A^T A)^{-1} L \end{aligned}$$

将未知数代入误差方程计算观测值的改正数  $V$ , 则目标点的测定中误差为:

$$m_i = \pm \sqrt{\frac{V^T V}{r}}$$



(a) 圆的识别 (b) 圆心定位

图2 圆的识别及定位

Fig. 2 Circle Detection and Circle Location

式中,  $r$  为多余观测个数,  $r = n - t$ ;  $n$  为观测值个数, 即  $(x_i, y_i)$  的个数;  $t$  为未知数个数,  $t = 2$ 。

### 1.3 挠度测定

利用以上处理手段, 可以得到钢架  $A$  面和  $B$  面在任意荷载瞬间目标点的影像坐标值(以像素为单位)。而需要的竖平面坐标, 可根据墙面上固定点及备用钢架上的标志, 对每一幅影像上的目标点坐标进行平移、旋转、缩放等工作, 使之成为统一方向, 并以左下角目标点为原点的坐标序列, 根据各张影像上的坐标值可以得到以下图形。

#### 1.3.1 中心线形变曲线

针对每一荷载瞬间所有目标点的坐标值, 计算左右两根竖梁上相应的两目标点(竖坐标相近)的中心点坐标, 并将这些中心点坐标连接成线, 可得到  $A$  面及  $B$  面的中心线形变曲线, 见图 3。由于实验是用 200t 液压机对钢架进行偏心加压, 即在一个角上加压, 主要受力竖梁为  $A$  与  $B$  面相交的竖梁, 受压变形面为  $A$  面和  $B$  面。当得到  $A$  面与  $B$  面的中心线形变曲线  $aa'$ ,  $bb'$  后, 由  $aa'$ ,  $bb'$  取均值(见图 4(a)), 得到钢架整体中心线形变曲线  $oo'$ , 即将两个面上相应的 4 个目标点(竖坐标相近)取坐标平均值, 将这些坐标平均值连接成线得到钢架整体中心线形变曲线, 见图 4(b)。

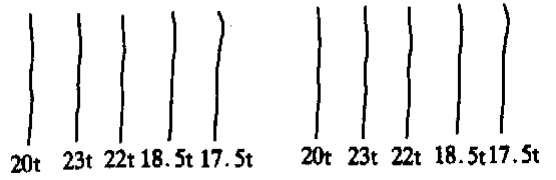
#### 1.3.2 纵轴线形变曲线

实验时采用偏心加压, 即在架顶某一角上加压, 则有一根竖梁的变形显著。测出每一荷载情况下的竖梁上的目标点坐标, 将坐标连成挠度曲线, 并与未加荷载时目标点连线相比较, 可得到每一目标点形变值——挠度。图 5(a)、5(b)分别为  $A$  面、 $B$  面荷载为 23t 和 17.5t 时的挠度曲线。

#### 1.3.3 某特征点处的荷载-挠度曲线

将某特征点在所有荷载时的变形值连接成曲线。图 6(a)、6(b)分别为  $A$  面、 $B$  面最大变形点

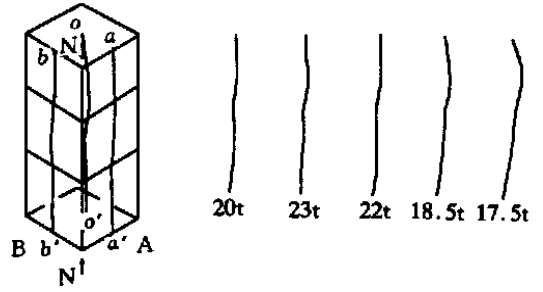
处的荷载-挠度曲线, 横轴为挠度, 纵轴为荷载值,  $N_u$  为荷载最大值。



(a)  $A$  面 (b)  $B$  面

图3 中心线形变曲线

Fig. 3 Deformation Curve of Central Line



(a) (b)

图4 整体中心线形变曲线

Fig. 4 Deformation Curve of Integral Central Line

## 2 实验结果

实验采用试验钢架进行, 试验钢架由实际钢架按比例进行缩小制成。钢架采用  $\varnothing 45$  角钢制成, 见图 1(a)。每面布设 14 个目标点, 相机距试验钢架约为 2.8m 与 3.0m。用 200t 液压机对钢架进行偏心压力实验, 荷载以 5t, 10t, 15t, 20t, 23t 逐步加压, 当钢材达到屈服点后又减压为 22t, 18.5t 及 17.5t。整个试验连续一次完成。每达到上述一荷载, 两台相机同时拍摄瞬间的钢架状态。在进行本实验之前, 对相机进行了量测精度检验, 摄影距离在 5.0m 以内时, 满足原设计要求的 1/1 000 的相对量测精度要求。本实验对挠度测定的最大误差为 0.28 pixel, 最小误差为 0.039 pixel, 中误差为 0.1 pixel, 每一像素对应的实际距离为 1.43mm。

实验结果表明, 钢框架偏心受压时, 杆件的稳定极限承载力为 23t。数据结果见表 1, 表中压缩显著部位一列中, “上”、“下”指钢架在偏心受压后, 竖梁变形的显著部位在竖梁的上部或下部。

力学结构分析认为, 钢材在屈服点之前应变很小, 屈服点之后应变急剧增长, 钢材暂时耗尽了承载能力<sup>[3]</sup>。钢材受压力小于极限承载力时, 钢材变形是弹性的, 具有自恢复能力, 钢架是安全的, 仍具有实用性。本试验钢架在承载力小于极

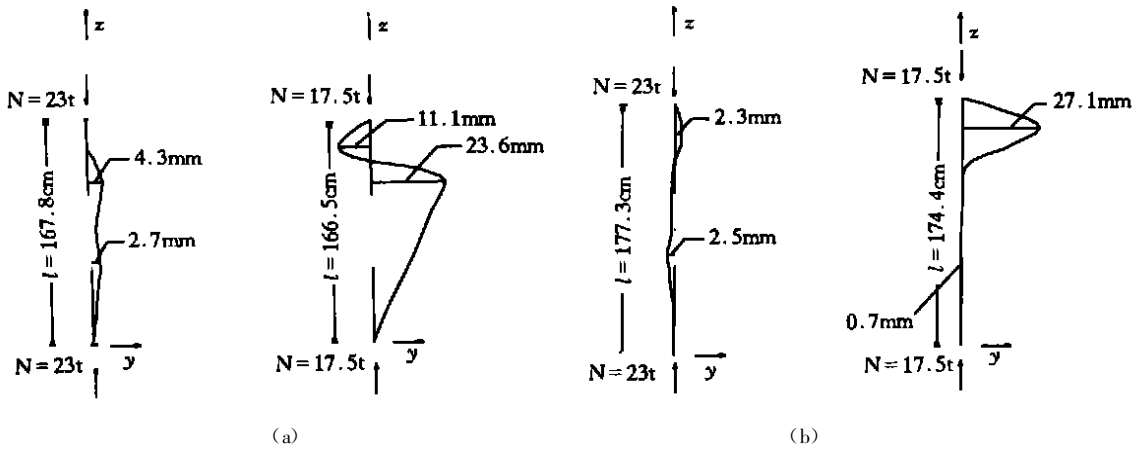


图 5 23t, 17.5t 时的挠度曲线

Fig. 5 Loading Curve

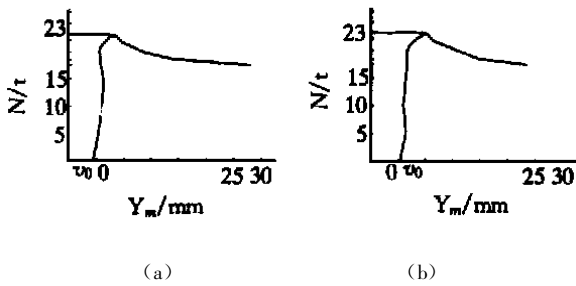


图 6 最大变形点处的荷载-挠度曲线

Fig. 6 Loading Curve of the Biggest Deformation

表 1 数据结果

Tab. 1 Data Result

荷载/t	面	最大挠度值/mm	杆件总长压缩量/cm	压缩显著部位/mm
10	A	0.6	0	下
	B	1.4	0	下
15	A	1.2	-0.1	下
	B	2.3	-0.2	下
20	A	1.4	-0.1	下
	B	2.1	-0.1	下
23	A	2.5	0.5	下
	B	4.0	0	上
22	A	3.7	0.5	上
	B	4.3	0.4	上
18.5	A	15.3	1.6	上
	B	14.7	1.1	上
17.5	A	27.1	3.0	上
	B	23.6	1.3	上

限承载力 23t 之前, 钢架变形的显著部位在钢架下部, 这时变形随荷载的增大而增大, 且变形较小, 可以恢复; 而在承载力达到 23t 后, 钢架承受的压力超过了极限承载力, 钢架的弹性遭到破坏, 变形急剧增加, 破坏部位发生在受力最大处, 即钢架的上部。从表中数据可以看出, 当荷载小于

23t 时, 钢架的变形值——挠度值较小, 且随荷载的增大而增大, 最大变体体现在钢架下部, 这时的变形可以恢复; 而当荷载达到 23t 后, 变形最大处已体现在钢架上, 变形处的最大挠度值急剧增大, 当荷载减至 17.5t 时, 挠度值达到最大不再改变, 此时钢架仍具备继续承载力, 但其变形不可恢复性使钢架已不再具备安全使用的性能, 不适于继续使用。

此实验结果与实际情况相符, 并与钢架力学结构分析相符, 即应变值在屈服点之前很小且随荷载的增大而增大, 而在屈服点之后, 应变值急剧增大达到某一最大值之后, 不再改变, 钢材耗尽了承载力。

### 3 结 论

本文用数字摄影测量方法对钢结构挠度进行变形监测, 与经典钢架力学分析结果相符, 并可及时反映钢结构受力变形状况, 达到准实时监测。

利用上述方法比传统结构挠度测量方法和利用全站仪方法进行的变形监测的效率, 获取的信息量大, 它不仅能显示客观、真实的影像, 而且是在同一瞬间摄取多个目标点。利用相应软件进行识别定位, 得到目标点的物方坐标, 这是其他方法所不能做到的。今后若能将拍摄的影像实时传送至计算机进行处理, 及时反馈信息, 其对安全施工和生产运转更具有重要意义。

### 参 考 文 献

- 1 宗听聪. 钢结构. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991
- 2 王娟明. 建筑结构实验. 北京: 清华大学出版社, 1988
- 3 周绥平. 钢结构. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1997
- 4 丁睿纲, 刘友光, 张松波. 工程与工业摄影测量. 北京:

- 地质出版社, 1995
- 5 刘声扬. 钢结构. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1988
- 6 於宗侑, 鲁林成. 测量平差基础. 北京: 测绘出版社, 1984
- 7 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996
- 8 Wei Y, Marshall S. Circle Detection Using Fast Finding and Fitting (FFF) Algorithm. *Geospatial Information Science*, 2000, 3(1): 74~78
- 9 Kumar S, Rangnanthan N, Coldgof D. Parallel Algorithms for Circle Detection in Images. *Pattern Recognition*, 1994, 27(8): 1 019~1 028
- 10 Chun-ta ho, Chen K H. A fast Ellipse/ Circle Detection Using Geometric Symmetry. *Pattern Recognition*, 1995, 28(1): 117~124

作者简介: 徐 芳, 博士生. 现主要从事图像处理和数字近景摄影测量研究.

E-mail: xf-uang@263.net

## The Monitor of Steel Structure Bend Deformation Based on Digital Photogrammetry

XU Fang<sup>1</sup> YU Chengxin<sup>2</sup> HUANG Guilan<sup>3</sup> LIU Youguang<sup>1</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

(2 Department of Science Study Service Shandong Institute of Architecture and Engineering 47 Heping Road Jinan, China, 250014)

(3 Automatization Center, Guangzhou Design Bureau, 80 Jixiang Road, Guangzhou, China, 510030)

**Abstract:** The load-bend curve and vertical axis curve express the unusual deformation or part destroy of steel structure. The digital photogrammetry method used to monitor the deformation of steel structures is an innovation of tradition surveying method.

In order to prove the feasibility of using digital photogrammetry method in monitoring the deformation of steel structures, an experiment was conducted as follows. First, 26 circle signs were averagely placed on the testing steel frame which was made in one tenth size of the real one. Second, a pressure experiment for the testing steel frame was conducted with 200t hydraulic machine. A series of images were taken from the vertical side at pressing status and bowed point status. Then the images were transmitted to the computer. Third, we process the images. The coordinates of each sign were acquired. Finally, the deformation of the steel structure could be analyzed.

During image processing, we got the binary image and traced the edge's point. We detected and extracted the circle in the binary image. Each circle has just one horizontal symmetrical axis and one vertical symmetrical axis. The crossing point of the horizontal symmetrical axis and the vertical symmetrical axis is the circle centre. All possible horizontal and vertical axis can be extracted in the image. All the pixel symmetric to one pair axis could be grouped into one subimage. Thus all the isolated points, lines and other irregular curves are removed at this stage.

We got the image's coordinates of *A* and *B* at every load. The coordinates were horizontally moved, rotated, shrunk and enlarged. They became a series of coordinates of the same direction based on the left under side corner point as zero. The method mentioned above can achieve semiautomatic real-time monitor deformation. This paper introduces the surveying method, and presents the result of experiments.

**Key words:** load-bend curve; deformation curve by force; central line; object detection; object location