文章编号:1001-4179(2007)10-0048-03

近景摄影测量在特大型蜗壳变形监测中的应用

郑 敏[1] 张乾桢[2] 冯小磊[1]

(1.长江勘测规划设计研究院 空间公司,湖北 武汉 430010; 2.武汉大学 电子信息学院,湖北 武汉 430000)

摘要:用近景摄影测量方法对三峡右岸电站特大型蜗壳进行了施工期的变形监测。实践表明,采用基于图像的激光三角测量方法测定蜗壳本体变形及采用基于立体像对测量方法测定蜗壳座环(试压环)变形均可以达到毫米级的精度水平,并具有操作简便、适用恶劣环境等一系列优点,显示了近景摄影测量在蜗壳及洞室工程中的广阔应用前景。

关 键 词:近景摄影测量;变形监测;激光三角测量;立体像对

中图分类号:TV698.1+1 **文献标识码**:A

1 概 述

三峡 700 MW 水轮发电机组蜗壳的最大外径为 34.38 m,容积约 6 000 m^3,是目前世界上混流式水轮机最大的蜗壳,其埋设方式关系到机组安全稳定运行。为监测和研究右岸电站蜗壳在不同埋设方式条件下机组的运行情况,并为以后类似蜗壳埋设方式的选择提供科学依据,对在右岸电站选择了不同蜗壳埋设方式的 8 台机组蜗壳的变形情况进行了监测。

三峡电厂右岸电站机组蜗壳变形监测是与蜗壳施工同步进行的,最大监测断面直径约 14 m,最小监测断面直径约 5 m。蜗壳内部每隔 1 m 左右有密集的"米"字衬支撑,保压方案的蜗壳施工过程中还会充水保压,观测条件恶劣,常规的测量方法很难实现蜗壳变形监测。鉴于近景摄影测量方法的优势,决定采用近景摄影测量方法进行蜗壳的变形监测。

2 监测方案的确定

蜗壳变形监测属于精密测量的范畴,测量精度要求优于 1 mm。为满足精度要求,我们在标志设计、摄站选择、光源配置及观测方法等方案设计上采取了一系列措施,达到了预期效果。

2.1 标志设计及光源选择

在蜗壳摄影中,由于蜗壳表面光滑且缺少纹理,很难找到特征点位,为增大反差,提高影像的辨认与量测精度,需要布设一定数量的人工标志。我们采用反光力强的白色防水不干胶布制作环形标志。且根据监测断面的大小,制作的标志在 Ø30~60 mm 之间。

蜗壳摄影光源的选择随现场光线条件的不同而有较大的灵活性,所选光源在缩短曝光时间的同时保证摄影质量。

2.2 观测方法及摄站的选择

蜗壳监测分为蜗壳本体监测及蜗壳座环(或试压环)变形监测。根据不同的观测部位,设计了不同的观测方法。

(1) 蜗壳本体监测。也称蜗壳流道变形监测。在蜗壳内部沿流水方向每隔 45°布设 1 个监测断面,共布设 8 个监测断面。每个断面上从弧底开始每隔 45°布设 1 个监测点,并在上挡板、上座环、下座环、下挡板处加密设点。

蜗壳本体监测断面直径在 5~14 m 之间,每个断面上隔 45°布点,跨度相对较大,且有的蜗壳内部每隔 1 m 布设有"米"字衬支撑,观测条件恶劣。综合考虑监测精度、技术可行性、经济合理性及工作环境等因素,设计采用基于图像的激光三角测量系统进行蜗壳本体监测。该系统由旋转平台+激光测头+CCD 组成,并架设在断面中心附近的平台上。

激光三角测量原理如图 1。

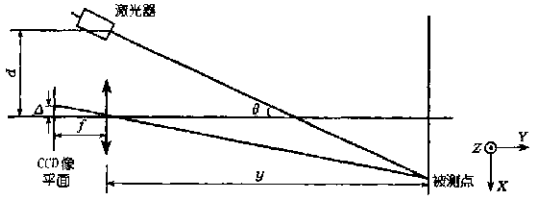


图 1 三角测量法测距原理

激光器和 CCD 摄像机在同一平面上,以 CCD 摄像机镜头光心为坐标原点,建立坐标系,平面 $X-Y$ 与水平面平行。CCD 摄像机的镜头焦距为 f,激光器和 CCD 摄像机之间的距离为 d,激光器轴线和 CCD 摄像机光轴的夹角为 θ,图像上激光光斑中心到图像垂直中线和水平中线的距离分别为 Δ_1 和 Δ_2,由图 1 中几何关系得:

$$\begin{cases} x = y \cdot \Delta_1 / f \\ y \cdot \tan\theta = d + y \cdot \Delta_1 / f \\ z = y \cdot \Delta_2 / f \end{cases} \quad \text{即} \quad \begin{cases} x = \Delta_1 \cdot d / (f \cdot \tan\theta - \Delta_1) \\ y = f \cdot d / (f \cdot \tan\theta - \Delta_1) \\ z = \Delta_2 \cdot d / (f \cdot \tan\theta - \Delta_1) \end{cases}$$

由此可得被测点到坐标原点的距离。

(2) 蜗壳座环(试压环)变形监测。蜗壳座环及试压环变形监测以正向左岸方向为 0°断面,顺水流方向每隔 45°设 1 个断

收稿日期:2007-08-08

作者简介:郑 敏,女,长江勘测规划设计研究院空间公司,工程师。

万方数据

面,共设 8 个监测断面。在每个监测断面上从上到下布置 5 个监测点,在对应断面的基础环上布置 6 个监测基准点。安装试压环后,基础环上监测基准点不变,在相应断面的试压环上布置 3 个监测点。

蜗壳座环直径约为 15 m,每隔 45°布设监测断面,跨度相对较大,综合考虑各种因素,采用 1 台具有 1 600 万像素的 KoDak Pro Back 相机 + 标定框进行蜗壳座环监测。利用该相机对同一监测断面进行自由摄站左、中、右 3 次观测,且保证监测断面上的测点及标定框都成像在 3 幅图像上(其中有 2 幅图像组成立体像对参与解算,另一幅图像参与校核)。标定框是 1 个黑色矩形框,框的每一条边上布设有多个中间刻有黑色十字丝的白色圆形标志。

立体像对测量的基本原理如图 2。

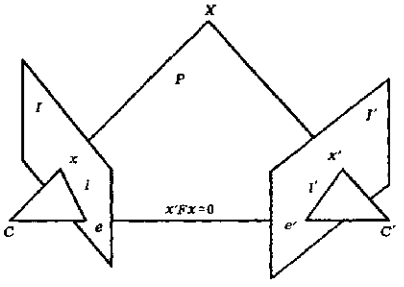


图 2　立体像对测量原理

已知空间点 X 在左、右像片中的同名像点像素坐标分别为 x、x',则 X 点是直线 Cx 和 $C'x'$ 两条直线的交点,它的三维坐标是唯一确定的。公式 $x'Fx = 0$ 表示的是同名像点的空间关系式,其中 F 为基本矩阵,由相机的内外元素参数组成。在蜗壳的座环及试压环变形监测中,相机的内方位元素已事先在实验室内标定,标定框的作用一方面是增加图像中的特征点以便拼接,更重要的是标定相机的外方位元素。相机的内外方位元素已知后,便可根据像点坐标求得监测点的空间坐标及各点的空间距离。

3　蜗壳的摄影测量及结果

3.1　基于激光三角测量系统进行蜗壳本体监测

(1) 测量过程。该系统将激光器和 CCD 相机装在一个旋转平台上,旋转台可由电脑程序控制精确转动。测量时将支架放置在大约断面中心的位置,整平后将激光器和相机的电源开关打开,电脑控制其转到要测的测点处进行拍照,拍照结束后旋转到下一个点进行测量直至完成整个断面的监测。所有的照片均自动保存在计算机中,然后利用图像处理软件计算得到断面形状、各测点的坐标及测点间距离。采用该系统对蜗壳本体监测断面进行测量处理的流程见图 3,旋转测量示意图见图 4。

为精确计算出标志点中心位置,对每一个测点进行了 5 次扫描拍照(见图 5)。因为环境因素影响,摄影质量不稳定,自动提取特征点比较困难,所以采用手工提点的方式,利用提取的 8 ~ 10 个光斑中心坐标便可拟合出标志点的中心坐标。

(2) 误差分析。蜗壳本体断面扫描测量系统误差来源主要有:系统结构误差、CCD 分辨率、光学系统误差、光斑中心提取误差、测量过程中旋转台的抖动误差、回转误差等。

系统结构误差、光学系统误差属于系统误差,在系统标定中可以剔除掉。

CCD 分辨率越高,系统精度也就越大,但费用也会相应增加,根据蜗壳断面尺寸及精度要求,我们选用 1 600 × 1 200 像素数的 CCD。

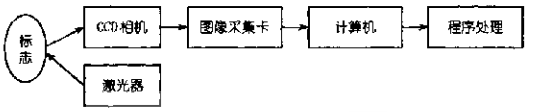


图 3　系统对蜗壳本体测量处理流程

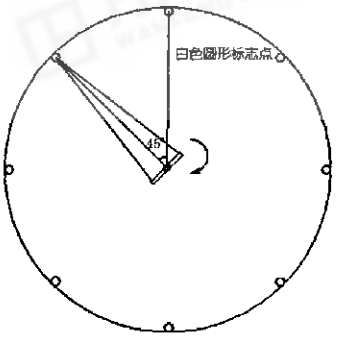


图 4　蜗壳本体旋转扫描测量示意

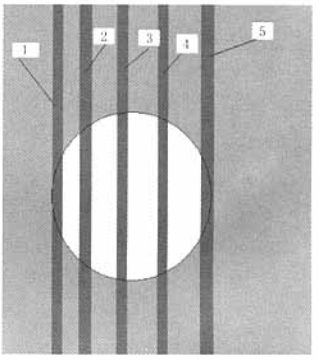


图 5　激光线 5 次扫描标志点光斑

手工提取光斑中心时,受图片质量及主观因素影响,得到的点位置不可能很精确,此项误差在 1 个象素以内。相机分辨率为 1 600 × 1 200,近激光器测量范围 2.6 ~ 4.6 m,每个像素的实际分辨率为 2 000/1 600 = 1.25 mm/pix;远激光器的测量范围在 4.5 ~ 7.1 m,分辨率为 2 600/1 600 = 1.625 mm/pix。程序中采用局部开窗放大技术使手工提点误差在 0.122 ~ 0.159 mm 之间。

测量过程中旋转台的抖动误差、回转误差等是粗差,在观测过程中若出现此类误差,则进行了重测。

为给出测量精度指标,我们在进行蜗壳本体断面扫描测量时,首先对同一断面连续进行两次观测,根据公式 $\sigma = \sqrt{\frac{(N_1 - N)^2 + \cdots (N_n - N)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}}$ 来计算测量误差,其中 N_i 为前后两次测量得到的同一弦长差,$N = (\sum N_i)/n$ 为所有弦长差值的平均值,n 为参与计算的弦的数量。通过对实际观测数据分析,得出该系统的 1 次测量误差在 ±0.65 mm 以内。

(3) 测量结果。蜗壳本体断面扫描测量系统最后提供的是

万方数据

断面上各相邻点间距离，即各点相对下座环上监测点的距离。25 号机组蜗壳本体监测 4 号断面灌浆前后及拆内支撑前后变形监测结果见图 6、图 7。

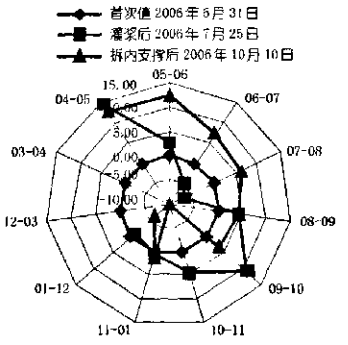


图 6 4 号断面相邻测点弦长变化

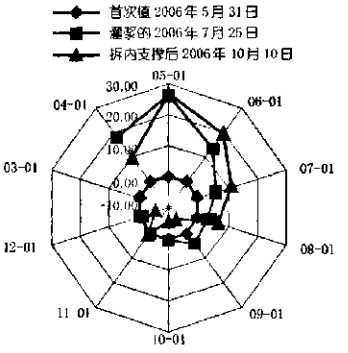


图 7 4 号断面各测点相对下座环弦长变化

从图 6、图 7 可以看出，4 号断面灌浆后下过渡板上测点 SY01CJ254 到其他测点间弦长自下过渡板上测点 SY01CJ254 向两边不断增大，相邻点间弦长变化大部分呈伸长变形，4 号断面灌浆前后主要表现为向外扩张变形；4 号断面拆内支撑后，外侧部分相邻测点间弦长呈伸长变形，其余部分相邻测点呈缩短变形。下过渡板上测点 SY01CJ254 到蜗壳外侧上腰部至蜗壳外侧下腰部测点弦长呈伸长变形，到其余测点弦长呈缩短变形，4 号断面拆内支撑前后主要表现为向内收缩变形。

3.2 使用单台数码相机进行蜗壳座环(试压环)监测

(1) 测量过程。对蜗壳座环(试压环)的断面进行监测时，将标定框放在监测断面附近，并从左、中、右 3 个方向拍照，3 副图像应包含断面上所有测点及标定框。

(2) 误差分析。蜗壳座环监测误差来源主要有：光学系统误差、CCD 分辨率、特征点提取误差等。

光学系统误差属于系统误差，在系统标定中可以剔除掉。

CCD 分辨率越高，系统精度也就越大，根据蜗壳座环监测精度要求，我们选用 1 600 万像素数的数码相机。

由于图像质量受施工环境影响而不稳定，所以采用手工提点与自动提点相结合的方式，首先用手工方法进行特征点的粗匹配，然后由程序进行自动精匹配，最后特征点的提取精度可达子像素精度。监测断面测量范围在 3.5 m 左右，分辨率为 3 500/1 600 = 2.188 mm/pix，程序中提点误差在 0.219 mm 左右。

为给出测量精度指标，我们在进行蜗壳座环(试压环)监测时，首先对同一断面连续进行两次观测，根据公式 $\sigma = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}$（其中 v 为前后两次测量得到的同一弦长差，n 为参与计算的弦的数量）来计算测量误差。通过对实际观测数据分析，得出蜗壳座环监测的测量误差在 ±0.60 mm 以内。

(3) 测量结果。蜗壳座环(试压环)监测，最后提供的是断面上各点相对于基础环上基准点在径向、切向及竖直方向的距离及距离变化量。25 号机组蜗壳灌浆前后变形监测结果见表 2。从表 2 中可以看出，各断面上监测点在径向、切向、竖直方向上的位移量大体上与距基础环上基准点的距离成正比。灌浆前后，蜗壳座环在径向主要表现为向环中心方向的收缩变形，切向方向主要表现为顺水流方向的变形，竖直方向主要表现为相对下座环的抬升变形。

表 2 灌浆前后座环变形位移特征值

测点分布位置		变形最大值/mm	变形最小值/mm	最大值测点	最小值测点
1 号断面	径向	-3.84	-0.50	SY01CJ25A	SY01CJ25E
(90°)	切向	3.71	0.10	SY01CJ25A	SY01CJ25E
	竖直方向	-1.65	-0.80	SY01CJ25A	SY01CJ25E
2 号断面	径向	-6.23	0.80	SY02CJ25A	SY02CJ25E
(135°)	切向	2.07	-0.04	SY02CJ25A	SY02CJ25B
	竖直方向	-2.72	-0.60	SY02CJ25A	SY02CJ25E
3 号断面	径向	-3.60	-1.72	SY03CJ25A	SY03CJ25D
(180°)	切向	1.35	0.94	SY03CJ25A	SY03CJ25D
	竖直方向	-0.89	-0.74	SY03CJ25A	SY03CJ25C
4 号断面	径向	-4.93	-2.23	SY04CJ25A	SY04CJ25D
(225°)	切向	2.97	1.39	SY04CJ25A	SY04CJ25D
	竖直方向	-3.05	-1.46	SY04CJ25A	SY04CJ25D
6 号断面	径向	-5.78	-0.76	SY06CJ25A	SY06CJ25C
(-45°)	切向	0.86	0.40	SY06CJ25B	SY06CJ25A
	竖直方向	-1.75	-0.50	SY06CJ25A	SY06CJ25E
7 号断面	径向	-3.61	-2.30	SY07CJ25A	SY07CJ25E
(0°)	切向	5.97	0.20	SY07CJ25A	SY07CJ25E
	竖直方向	-1.94	-0.96	SY07CJ25A	SY07CJ25C
8 号断面	径向	-9.38	-1.00	SY08CJ25A	SY08CJ25E
(45°)	切向	4.15	1.10	SY08CJ25A	SY08CJ25E
	竖直方向	-1.93	-0.80	SY08CJ25A	SY08CJ25E

4 结论

(1) 根据蜗壳不同的监测部位及现场环境来设计不同的监测方案。

(2) 蜗壳本体及蜗壳座环周围没有稳定的地方来布设控制点，因此对蜗壳本体监测时，相机和激光器的空间位置关系及相机的内方位元素是事先确定的。蜗壳座环监测时，相机的内方位元素是在实验室内标定好的，且通过标定框进行相机的外方位元素的确定。

(3) 由于蜗壳监测环境比较恶劣，拍照质量不是很稳定且测点不多，因此我们采用了手工提点的方式。

(4) 采用近景摄影测量方法监测蜗壳变形外业工作量少，速度快，精度较高，测定数据可靠。与传统方法比较，本方法把大量的野外操作转为室内工作，特别是当观测点较多时更为明显。所摄取的像片资料能长期保存，以资复测比较，避免了粗差，提高了资料的可靠性，并且为目前的洞室监测提供了新的途径。

(编辑：徐诗银)

万方数据