

分段式柔性测斜仪在地下厂房变形监测中的应用

王辉伟, 李作舟, 张朋飞, 李欣

陕西镇安抽水蓄能有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2022年10月20日; 录用日期: 2023年1月12日; 发布日期: 2023年1月18日

摘要

本文介绍了分段式柔性测斜仪首次应用于抽水蓄能电站大跨度地下厂房开挖施工中对围岩表面变形进行监测的情况, 其监测方法、仪器布置、安装埋设方法, 以及取得的监测成果, 对类似工程的安全监测、开挖施工以及设计具有一定的参考价值。

关键词

分段式柔性测斜仪, 安全监测, 收敛变形, 抽水蓄能电站, 地下厂房

Application of Segmented Flexible Inclinometer in Deformation Monitoring of an Underground Powerhouse

Huiwei Wang, Zuozhou Li, Pengfei Zhang, Xin Li

Shaanxi Zhen'an Pumped Storage Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Oct. 20th, 2022; accepted: Jan. 12th, 2023; published: Jan. 18th, 2023

Abstract

This paper introduces that the segmented flexible inclinometers are firstly used in monitoring the deformation of underground powerhouses during construction in the excavation and construction

文章引用: 王辉伟, 李作舟, 张朋飞, 李欣. 分段式柔性测斜仪在地下厂房变形监测中的应用[J]. 传感器技术与应用, 2023, 11(1): 83-89. DOI: 10.12677/jsta.2023.111009

of large-span underground powerhouses of a pumped-storage powerhouse. The monitoring method, instrument layout, installation and burying method, and the obtained monitoring results have certain reference values for the safety monitoring, excavation construction and design of similar projects.

Keywords

Segmented Flexible Inclinator, Safety Monitoring, Convergence Deformation, Underground Powerhouse

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 地下厂房收敛变形监测主要采用钢尺收敛计或断面测量仪等传统收敛测量技术。面对越来越大的开挖断面和现场较差的测量环境, 原有监测手段已很难满足大跨度地下厂房收敛监测要求, 对地下厂房大跨度柔性收敛变形监测进行研究与应用, 以利于开挖和支护工作的顺利进行。本文以陕西镇安抽水蓄能电站工程地下厂房的监测为实例, 介绍了分段式柔性测斜仪在大跨度地下厂房收敛变形监测中的布置和监测成果, 对类似工程的变形监测具有一定的指导和借鉴意义[1] [2]。

陕西镇安抽水蓄能电站位于陕西省商洛市镇安县月河镇菩萨殿村。电站总装机容量为 140 万千瓦, 安装 4 台 35 万千瓦可逆式水泵水轮发电机组, 设计年发电量 23.41 亿 kW·h, 年抽水电量 31.21 亿 kW·h。地下厂房开挖轮廓尺寸为 162.5 m × 26.1 m × 54.5 m (长 × 宽 × 高)。

厂左 0+053 监测断面部位岩性为花岗闪长岩, 灰白色, 岩体完整性一般。裂隙较发育, 主要发育倾向洞内偏厂右的中陡倾角裂隙, 间距 20~50 cm, 开挖中顺该组结构面发生少量掉块, 围岩类别为 III 类。

2. 仪器原理

2.1. 分段组装式柔性测斜仪

柔性测斜仪是一款灵活柔韧的、标准的 3D 测量系统, 其工作原理如图 1 所示。它由多个串联的微电子机械系统加速度计组成, 每节内置一个独立测量单元, 加速度计测量重力加速度在不同的轴向上的数据来反应出对应轴与重力方向的角度, 通过角度的变化从而计算对应的每节固定长度的位移量, 再将每节计算得到的位移累加起来则能展现出整条柔性测斜仪的位移。

通常情况下, 一套柔性测斜仪为一个整体, 长度可根据用户需求制定。但在实际工程中, 由于条件限制以及不能随意调节安装长度, 很难将一个较长的柔性测斜仪一次安装到位。实际实施中, 往往需要先安装其中一部分, 后期陆续安装其他部分; 但在地下厂房这类地下洞室开挖施工中, 很难对仪器进行有效的保护。因此, 在本项目实施过程中, 采用了一种任意组装式的柔性测斜仪, 可根据工程特点, 将柔性测斜仪分为多段安装, 并组成一个整体进行监测。该种仪器对于遇到分期施工不能一次性安装时, 可以根据分期施工具体情况, 定制相应长度的传感器, 然后随工程开挖实际, 依次安装各段柔性测斜仪。

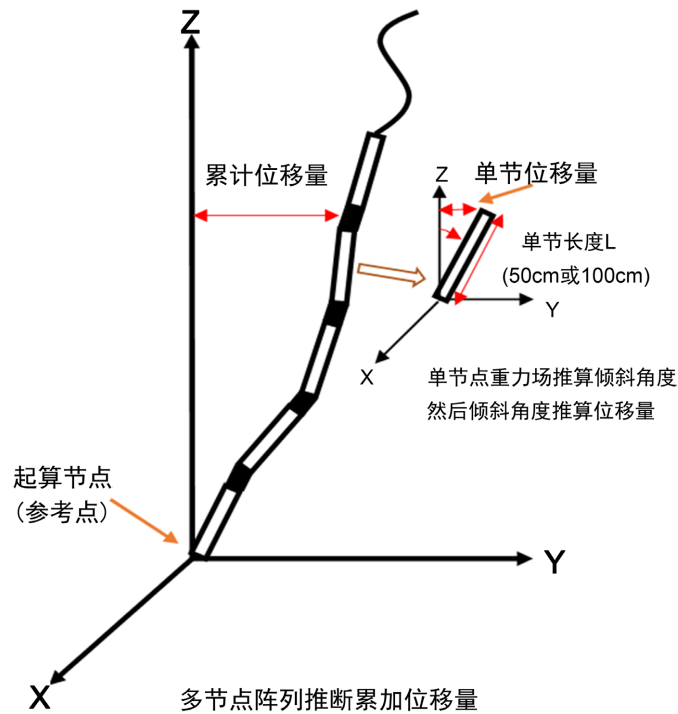


Figure 1. Working principle diagram of flexible inclinometer
图 1. 柔性测斜仪工作原理图

2.2. 柔性测斜仪累计位移量推算方法

1) 计算对应轴的倾角

柔性测斜仪每一段放有一个加速度传感器，测得对应的第 i 节加速度值为 $(accX_i, accY_i, accZ_i)$ ，根据加速度计的计算公式有：

$$\begin{aligned} accX_i &= A + K \cdot G \cdot \sin(\theta X_i) \\ accY_i &= A + K \cdot G \cdot \sin(\theta Y_i) \\ accZ_i &= A + K \cdot G \cdot \sin(\theta Z_i) \end{aligned} \quad (\text{公式 1})$$

式中， A 是加速度计的常值零偏， K 为加速度计的标定因子， G 为地球的重力加速度， θX_i ， θY_i ， θZ_i 为对应轴的倾角。那么，倾角分别为：

$$\begin{aligned} \theta X_i &= \arcsin((accX_i - A)/K \cdot G) \\ \theta Y_i &= \arcsin((accY_i - A)/K \cdot G) \\ \theta Z_i &= \arcsin((accZ_i - A)/K \cdot G) \end{aligned} \quad (\text{公式 2})$$

2) 角度推算位移量

已知每段刚性节点长度为 L ，第一步中计算出了夹角，那么第 i 个节点在对应坐标轴上的长度分别为 (LX_i, LY_i, LZ_i) ，则有：

$$\begin{aligned} LX_i &= L \cdot \sin(\theta X_i) \\ LY_i &= L \cdot \sin(\theta Y_i) \\ LZ_i &= L \cdot \sin(\theta Z_i) \end{aligned} \quad (\text{公式 3})$$

3) 积分求累计位移量

第二步中已经求解了第 i 个节点的位移量, 那么第 n 个节点的位移量, 通过累加求和可得, 如图 2 所示。则, X 方向上的累计位移量为:

$$\begin{aligned}
 X_n &= LX_1 + LX_2 + \cdots + LX_n \\
 &= \sum_1^n LX_i \\
 &= \sum_1^n L \cdot \sin(\theta X_i) \\
 &= L \cdot \sum_1^n \left(\frac{accX_i - A}{G \cdot K} \right)
 \end{aligned}
 \tag{公式 4}$$

同理, 计算出 Y 和 Z 方向上的累计位移量。

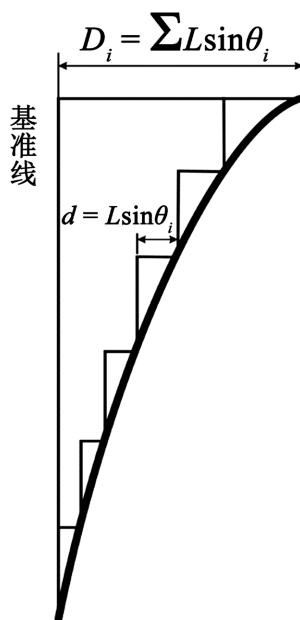


Figure 2. Schematic diagram of cumulative displacement solution
图 2. 累计位移求解示意图

2.3. 仪器主要技术指标

柔性测斜仪主要参数: 1) 工作方式为 MEMS 微机电加速度式; 2) 角度分辨率优于 $\pm 0.0003^\circ$; 3) 位移分辨率优于 $0.01 \text{ mm}@500 \text{ mm}$; 4) 系统稳定性优于 $\pm 0.5 \text{ mm}$ (32 m); 5) 长度规格为单节 0.5 m 或 1 m (可选), 总长度定制, 项目采用单节 0.5 m。

3. 仪器布置及安装

3.1. 仪器布置

结合传统监测仪器的布置情况, 同时考虑监控施工期高边墙的变形稳定, 本项目柔性测斜仪布置在上下游边墙部位。在厂房左 0+053 桩号(#2 机组中心线)布置 1 个监测断面, 上下游各布置 1 条柔性测斜仪, 测斜仪单节长度 0.5 m。

根据厂房开挖分层情况, 并考虑下层开挖对仪器的影响, 每段仪器末端布置在分层界面以上 1 m 的位置, 并按此原则定制仪器。其中在上游边墙布置 1 个测斜仪 RCX1, 自上游顶拱拱角至 $\nabla 845.50 \text{ m}$

高程, 仪器分 15.5 m、9 m、3.5 m 三段安装, 长度 28 m; 下游边墙布置 1 条柔性测斜仪, 自下游拱角至 $\nabla 846.50$ m, 分 15.5 m、9 m、2.5 m 三段安装, 长度 27 m。

由于柔性测斜仪各个测点均不是固定点, 均随岩体发生变形, 因此, 利用该断面上、下游拱角部位多点位移计(已安装监测仪器)作为计算固定端, 用以修正柔性测斜仪起始点的变形。

3.2. 仪器安装

柔性测斜仪安装一般紧邻开挖掌子面进行, 开挖后及时进行安装。安装时, 从柔性测斜仪一端逐渐顺序安装, 利用作业平台或高空作业车, 采用特制的“U”卡箍及膨胀螺栓对柔性测斜仪进行固定, 之后进行喷射混凝土保护。

对于已喷混凝土部位, 在喷射混凝土表面开挖沟槽, 在沟槽内安装仪器后, 挂玻璃纤维网格布后回填砂浆。沟槽尺寸应满足仪器安装要求, 考虑到喷射混凝土表面的局部不平整度, 沟槽尺寸以深度 6~8 cm, 宽度 6 cm。

本项目第 1 段安装时间为第 IV 层预裂孔爆破完成后、吊车梁施工前; 第 2 段、第 3 段分别为第 V 层、第 VI 层开挖后具备条件后开始安装, 安装后及时进行数据采集。

3.3. 数据采集

柔性测斜仪通过配套的综合数据采集器进行数据采集、存储和传输。仪器安装时, 将综合数据采集器安装在洞壁的防护箱中, 实现自动化观测。根据用户需求和不同工况环境, 观测可设置不同的采集时间间隔, 实现连续观测。供电采用蓄电池供电, 在 2 次/天采集频次下, 蓄电池(60 kVA)可连续使用 6 月以上, 能够满足施工期实时连续观测的目的。

4. 监测成果分析

柔性测斜仪监测成果特征值见表 1, 各测点位移 - 时间变化过程线见图 3, 图 4。以上游边墙柔性测斜仪 RCX1 为例, 简要分析测斜仪监测成果变化规律:

1) 仪器安装后至 2021 年 1 月中旬, 该期间为岩锚梁施工及 IV 层开挖初期时段, 累计变形随时间变化总体呈逐渐增大现象, 该时段变形速率较小, 最大变形速率为 0.24 mm/d, 主要为时间效应引起的变形, 下部测点变形速率大于上部测点, 最大速率对应测点为第 1 段仪器的最低高程测点。

Table 1. Summary of statistical monitoring results of flexible inclinometers (Unit: displacement: mm, speed: mm/d)

表 1. 柔性测斜仪监测成果特征值统计表(单位: 位移 mm、速度 mm/d)

开始日期	截止日期	施工内容	RCX1 (上游)			RCX2 (下游)			最大收敛值 (高程)
			最大累计位移 (高程)	时段最大变形量 (高程)	时段最大速率 (高程)	最大累计位移 (高程)	时段最大变形 量(高程)	时段最大速率 (高程)	
2020-11-13	2021-1-20	岩锚梁浇筑 及 4 层开挖	14.2 (858.5)	14.2 (858.5)	0.24 (858.5)	6.1 (859.4)	6.1 (859.4)	0.08 (859.4)	17.2 (858.5)
2021-1-21	2021-4-20	4 层开挖	17.7 (858.5)	3.9 (858.9)	0.04 (858.9)	11.5 (858.9)	8.4 (851.0)	0.77 (851.0)	27.6 (858.5)
2021-4-21	2021-5-31	5 层开挖	29.4 (858.0)	22.2 (852.3)	0.53 (852.3)	33.6 (851.0)	25.2 (851.0)	0.60 (851.0)	50.6 (851.8)
2021-6-1	2021-7-18	6 层开挖	40.7 (852.3)	19.4 (846.0)	0.42 (846.0)	37.0 (851.0)	3.9 (853.2)	0.08 (853.2)	68.8 (851.8)
2021-7-19	2021-9-13	7 层开挖	58.2 (852.3)	24.9 (846.0)	0.43 (846.0)	42.6 (851.5)	13.2 (851.5)	0.23 (851.5)	98.9 (851.8)

注: ① 2020 年 11 月 13 日前预裂爆破已完成;

② 第 1 段仪器高程 872.8~858.5; 第 2 段仪器高程 858.5~852.3; 第 3 段仪器高程 852.3~846.0。

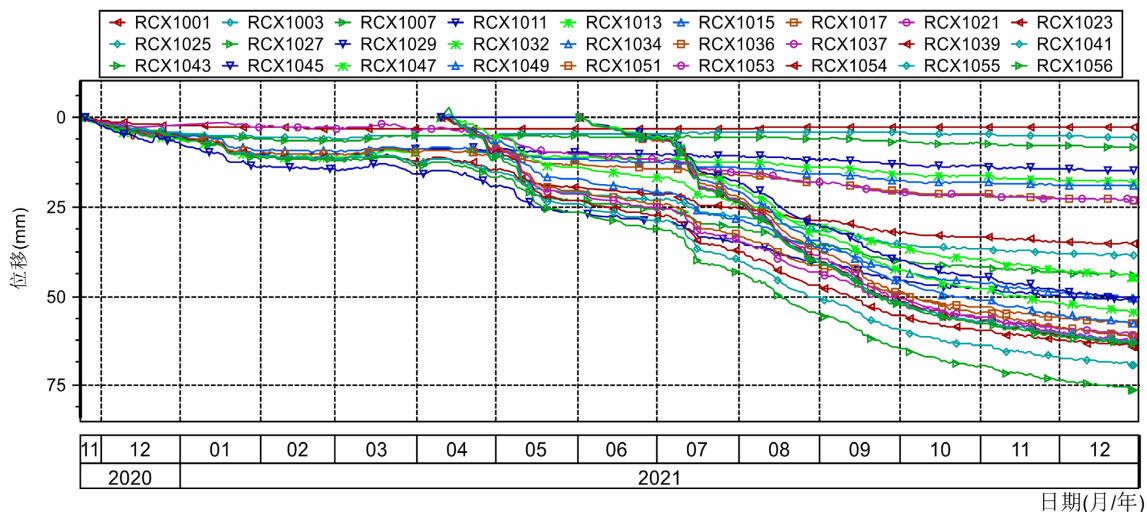


Figure 3. The cumulative displacement process lines of the flexible inclinometer RCX1
 图 3. 柔性测斜仪 RCX1 各测点位移过程线

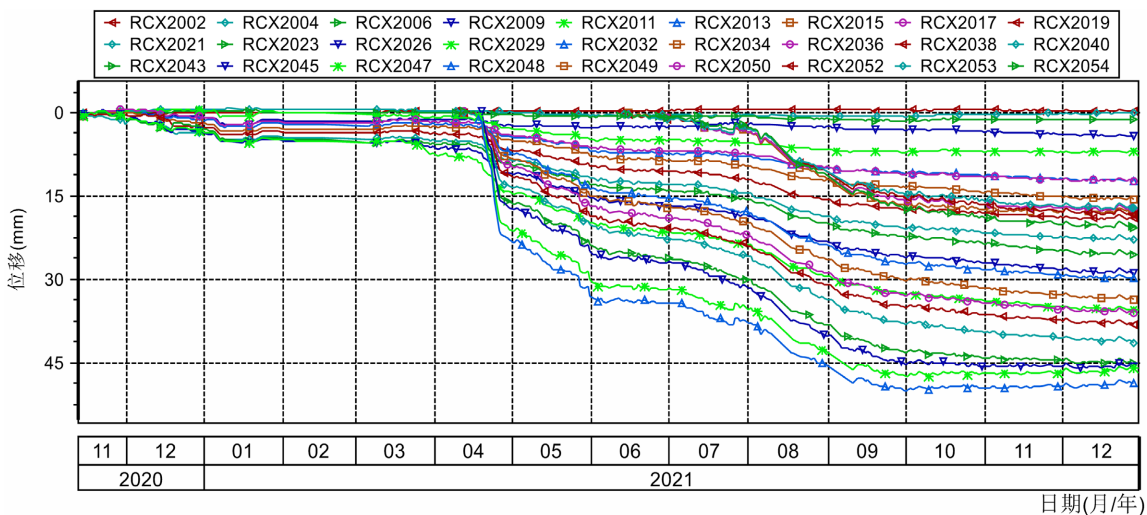


Figure 4. The cumulative displacement process lines of the flexible inclinometer RCX2
 图 4. 柔性测斜仪 RCX2 各测点位移过程线

2) 2021 年 1 月中旬至 2021 年 4 月中旬期间, 虽然厂房第 IV 层开挖, 但由于预裂爆破已经完成(2020 年 11 月 13 仪器前), 空间效应对变形影响不大, 变形较小, 变形过程线较平缓, 该时段最大变形速率为 0.04 mm/d, 除拱角个别测点变形减小外, 其余测点变形均呈增大趋势, 下部测点变形速率大于上部测点, 最大速率对应测点为第 2 段仪器的最低高程测点。

3) 2021 年 4 月中旬以后, 随着厂房第 V~VII 层的开挖, 高边墙的高度增大, 空间效应影响显著, 变形速率明显增大, 符合地下厂房高边墙变形的一般规律。其中, 2021 年 4 月中旬至 2021 年 5 月末, 第 V 层开挖期间的最大变形速率为 0.53 mm/d; 2021 年 5 月末至 2021 年 7 月中旬, VI 层开挖期间的最大变形速率在 0.42 mm/d 范围; 2021 年 7 月中旬~9 月中旬, VII 层开挖期间的最大变形速率为 0.43 mm/d。开挖期间, 下部测点变形速率大于上部测点, 最大速率对应测点为已安装仪器的最低高程对应测点。

4) 至 2021 年 9 月中旬, 随着厂房的开挖的进行, 变形尚未稳定, 呈缓慢增大趋势。截止 2021 年 12 月末, 下游高边墙变形基本稳定, 上游高边墙变形速率呈减小趋势, 变形趋于稳定。

监测成果表明,截止2021年9月,上游边墙 RCX1 最大累计变形 58.2 mm,对应高程为 $\nabla 852.3$ m;下游边墙 RCX2 最大累计变形 42.6 mm,对应高程为 $\nabla 851.5$ m,上游边墙变形大于下游边墙变形,最大变形均发生在高边墙的中部,符合高边墙变形的一般规律。

由柔性测斜仪测点位移过程线可知,变形沿高边墙分布上,吊车梁以下部位的变形(高边墙中部)较大,上游边墙测值一般在 28.40~58.2 mm 范围,下游边墙在 20.0~42.6 mm;吊车梁及以上部位最大变形一般要小一些,上游最大值为 23.86 mm,下游 19.2 mm(未包括仪器安装前变形)。由柔性测斜仪测点位移过程线可知,沿高程方向,曲线自上至下出现“阶梯”形,主要为三段仪器安装时间不同所致,符合这种分层开挖、分段安装仪器的特点。

通过厂房上下游同一高程的变形值,相加即可得到厂房的不同高度的收敛变形值。截止2021年12月末,厂房内空最大收敛变形值为 98.9 mm,对应部位为厂房高边墙中部 851.8 m 高程,符合高边墙的一般变形规律[3][4]。

5. 结论

1) 分段式柔性测斜仪在地下厂房变形监测中应用效果表明,对于大跨度地下厂房施工期的变形尤其是收敛变形监测,采用柔性测斜仪的方案是可行的。与传统收敛监测的方法相比,不受施工、灰尘、高度等因素的影响,便于观测;仪器一经安装后,能够实现对地下工程施工期变形的连续观测、监控施工期围岩稳定的目的。

2) 在布置中,宜根据开挖程序、监测目的,合理选择仪器的分段安装长度、仪器单节长度,以达到利于安装和节省投资的目的。

3) 由于分段式柔性测斜仪在地下厂房变形监测中尚属首次应用,其运行效果还有待长期的监测结果验证及进一步研究。

参考文献

- [1] 胡龙华,王继宇,刘双成.全站仪无定向自由设站隧道收敛测量方法与精度分析[J].华北科技学院报,2010,7(3):40-42.
- [2] 马春德,付伟,王业顺,胡顺喜,周亚楠.一种基于激光测距的大断面巷(隧)道收敛变形高效测量装置的研发及应用[J].隧道建设,2017,37(3):298-302.
- [3] 马雨峰,刘登学,刘双华,吕凤英,徐士超.丰宁抽水蓄能电站一期地下厂房施工期围岩安全监测分析[J].水电与抽水蓄能,2020,6(3):56-61.
- [4] 何少云,胡紫航,卫洋波,何军,刘登学.文登抽水蓄能电站地下厂房施工期围岩变形机理分析[J].水利与建筑工程学报,2021,19(2):191-196.