

# 锦屏一级水电站坝体倾斜监测成果分析

徐劲草, 张超萍, 蔡德文

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:** 目前, 针对拱坝水平位移、垂直位移和接缝变形的研究较多, 而针对拱坝倾斜观测的资料较少。拱坝倾斜是拱坝在外荷载作用下的综合反映, 因此也是判断拱坝工作性态的一种重要途径。笔者根据锦屏一级水电站拱坝多年倾斜变形的监测资料, 进行分析研究, 并拟定统计模型, 以便了解影响拱坝倾斜变形的主要因素, 并预测大坝的运行状况。

**关键词:** 锦屏一级水电站; 坝体倾斜; 监测成果; 统计模型

中图分类号: TV698; TV741

文献标志码: A

文章编号: 1001-2184(2023)06-0103-05

## Analysis of the Dam Body Tilt Monitoring Results of Jinping I Hydropower Station

XU Jincuo, ZHANG Chaoping, CAI Dewen

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072)

**Abstract:** At present, there are many researches on the horizontal displacement, vertical displacement and joint deformation of arch dams, but few observational data on tilt of arch dams. The inclination of an arch dam is a comprehensive reflection of the arch dam under the action of external loads, so it is also an important way to judge the working performance of the arch dam. This article analyzes and studies the monitoring data of the tilt deformation of the arch dam of Jinping I Hydropower Station over the years, and develops a statistical model to understand the main factors affecting the tilt deformation of the arch dam and predict the operation status of the dam.

**Key words:** Jinping I Hydropower Station; Dam body tilt; Monitoring results; Statistical model

## 0 引言

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内的雅砻江上, 水电站大坝为世界第一高拱坝, 坝高 305.00 m, 水库正常蓄水位 1 880.00 m, 死水位 1 800.00 m。枢纽主要由混凝土双曲拱坝、坝后水垫塘、泄洪洞和地下厂房等永久性建筑物组成<sup>[1]</sup>。

锦屏一级水电站于 2014 年 8 月首次蓄至正常蓄水位, 截至 2020 年 12 月, 已经历了 7 次库水涨落循环变化。

在拱坝变形监测中, 对水平位移、垂直位移和接缝变形的分析研究较多, 而对坝体倾斜的研究较少, 因此整理分析拱坝倾斜变形的监测资料对于验证拱坝的稳定性, 了解拱坝的变形情况等都有重要意义<sup>[2]</sup>。为了掌握大坝运行状态, 拟对拱坝倾斜的监测值进行研究, 并建立统计模型, 以便了解影响拱坝倾斜变形的主要因素, 并预测大坝的运行情况。

## 1 坝体倾斜监测分析

### 1.1 监测仪器布置情况

锦屏一级大坝垂直位移通过坝顶道路、坝体廊道、坝基廊道、相关通道的精密水准线实现, 监测水准线与水准监测控制网连接建立远端基准; 施工期采用双金属标系统建立坝基深部岩体基准。在两岸坝基灌浆平洞洞底各设置 2 个水准工作基点。大坝各监测支廊道内设置 2~5 个水准测点, 测点间距按 6 m 设置, 用于监测大坝倾斜。

大坝倾斜观测原理: 在大坝监测支廊道内布设沉降观测点, 定期测出两端沉降观测点的沉降量差值  $\Delta h$ , 再根据两端沉降观测点间的水平距离  $L$ , 即可计算出基础的倾斜角度  $i = \Delta h / L$ , 大坝监测支廊道倾斜观测示意图见图 1<sup>[3]</sup>。

大坝高程 1 664.00 m 的 11 号、13 号、16 号、19 号坝段的监测支廊道, 大坝高程 1 730.00 m 的 9 号、11 号、13 号、16 号坝段的监测支廊道, 高程 1 778.00 m 的 9 号、11 号、19 号坝段的监测支

廊道,以及高程 1 829.00 m 的 9 号、11 号、13 号、16 号、19 号坝段的监测支廊道均设置了倾斜监测。大坝 1 829.00 m 高程监测支廊道布置见图 2。大坝同时布置了静力水准监测大坝垂直位移和倾斜,因目前静力水准的监测成果不可靠,该文

仅分析水准点监测成果。

坝体倾斜采用监测支廊道的水准点垂直位移计算获得倾斜角。下游点相对下沉,则大坝向下游倾斜,倾斜角为正;上游点相对下沉,则大坝向上游倾斜,倾斜角为负。

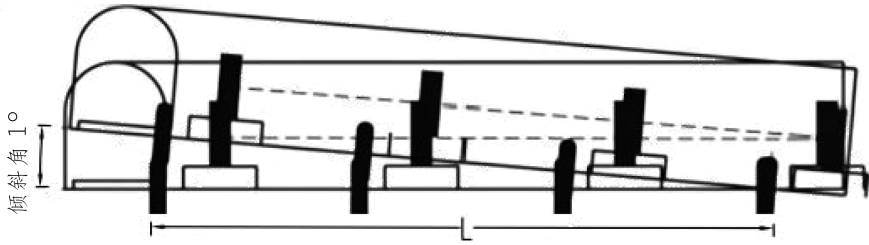


图 1 大坝监测支廊道倾斜观测示意图

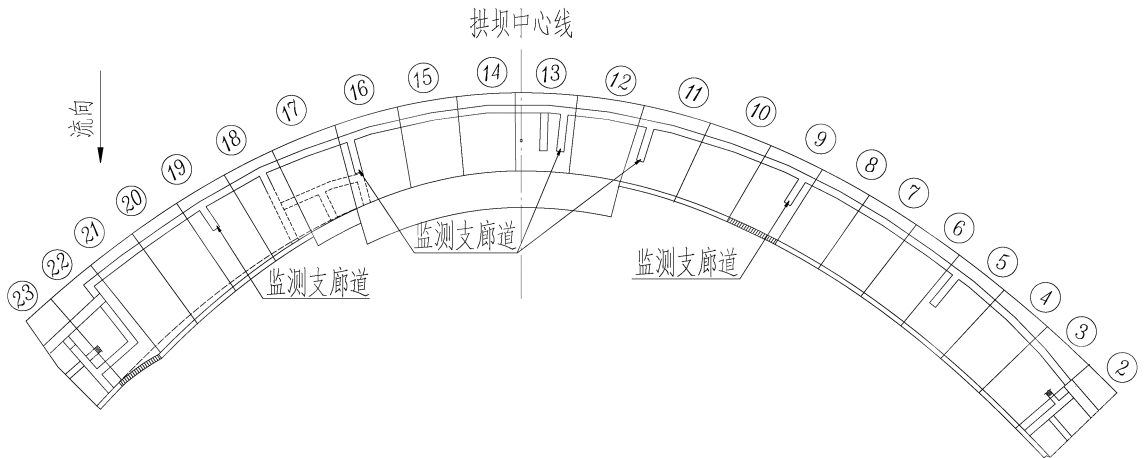


图 2 大坝 1 829.00 m 高程监测支廊道布置

## 1.2 监测成果分析

坝体切斜各测点倾角变化趋势一致,高程 1 730.00 m 廊道 13 号坝段倾角测值与库水位过程线见图 3,高程 1 730.00 m 廊道 13 号坝段倾角测值与日均温过程线见图 4。

坝体倾角呈明显的年周期性变化,表现为与库水位之间显著的正相关。库水位上升,坝体往下游倾斜;库水位下降,坝体往上游倾斜。倾角的

最大值多发生在该年 9 月份至次年 1 月份,最小值一般发生在该年 5 月份至 7 月份。

2020 年死水位时,除高程 1 664.00 m 部分测点倾向下游外,其余测点均倾向上游;其中,拱冠 13 号坝段倾角最大。2020 年正常蓄水位时,拱冠 13 号坝段低高程测点倾向下游,高高程测点倾向上游;左岸坝段各高程测点均倾向下游,右岸坝段各高程测点均倾向上游。

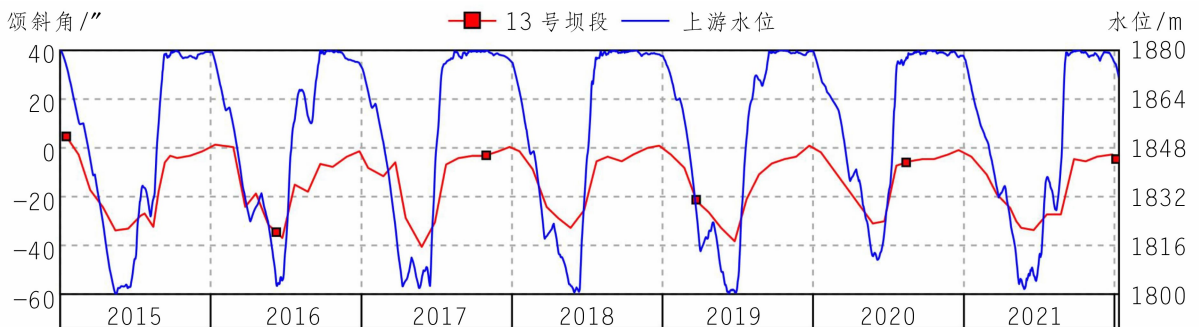


图 3 高程 1 730.00 m 廊道 13 号坝段倾角测值与库水位过程线

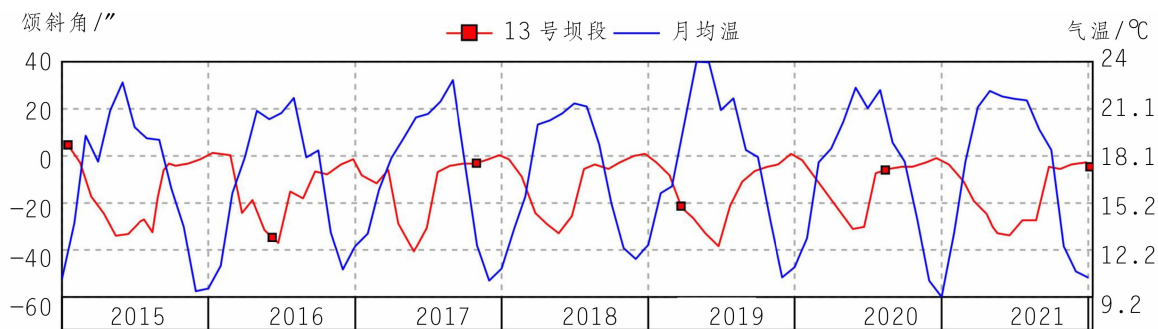


图 4 高程 1 730.00 m 廊道 13 号坝段倾角测值与日均温过程线

坝体倾角特征值统计见表 1。此次统计时段为 2015 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 30 日。由下表可知：同一坝段不同高程比较，高程 1 778.00 m 测点倾角最大，高程 1 730.00 m 测点次之，其次

为高程 1 829.00 m 测点，高程 1 664.00 m 测点最小；同一高程不同坝段比较，越靠近拱冠，倾角越大；2015 年至今，同一测点倾角总体呈减小的趋势。

表 1 坝体倾角特征值统计表

坝段	高程 /m	年变幅 /"						
		2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
11 号	1 664.00	29.05	27.50	27.50	25.80	25.70	22.30	24.06
13 号		30.13	32.20	26.54	28.80	28.80	23.10	26.54
16 号		22.94	24.64	18.96	17.00	18.90	13.30	19.00
19 号		10.03	12.00	19.61	12.68	13.80	5.80	8.08
9 号	1 730.00	37.96	35.36	32.52	34.40	36.30	28.80	32.50
11 号		39.87	35.90	36.11	37.10	41.40	30.70	33.90
13 号		38.54	38.26	40.95	33.70	39.20	30.10	31.00
16 号		27.08	25.15	23.23	24.50	26.90	22.20	22.20
9 号	1 778.00	53.95	40.55	37.11	42.30	45.80	35.30	42.30
11 号		44.00	40.74	37.13	38.40	43.00	36.10	38.40
19 号		17.77	16.54	16.54	14.40	18.60	12.40	12.40
9 号		34.45	30.57	27.11	27.12	30.60	26.50	32.60
11 号	1 829.00	36.13	29.14	24.47	27.20	31.10	31.10	29.10
13 号		36.05	31.52	20.10	25.60	27.50	33.50	29.50
16 号		22.87	26.82	10.78	13.20	19.80	15.40	17.60
19 号		15.07	12.68	11.93	18.80	18.90	15.70	15.70

## 2 统计模型分析

### 2.1 坝体倾斜统计模型的建立

实测资料表明大坝倾斜主要受库水位的影响；坝体混凝土温度和岩基温度的变化影响大坝位移，进而引起大坝倾斜的变化；此外，考虑到坝体混凝土和岩基的徐变以及裂隙、节理等的塑性变形随时间的变化，还需选入时效因子<sup>[5]</sup>。

#### (1) 水压分量

拱坝由于水平拱和悬臂梁的两向作用，使水

压力分配在梁上的荷载呈非线性变化，通常用水深  $H$  的两次或三次式来表示<sup>[4][5]</sup>，因此推得水压分量与  $H, H^2, H^3, H^4$  线性相关，水压分量  $C_H$  可以表示为：

$$C_H = \sum_{i=1}^{m_1} a_i H_u^i \quad (1)$$

式中  $H_u$  为监测日对应的上游水头，即上游水位与坝基高程(324.50 m)之差； $a_i$  为水压分量的回归系数； $m_1$  一般取 1, 2, 3, 4。

## (2) 温度分量

当混凝土水化热散发,坝体内部温度基本稳定,此时仅取决于坝体边界的温度,坝体上表面和水接触,坝体下表面与空气接触,水温和气温一般做简谐变化,则坝体内部温度也作简谐变化<sup>[5]</sup>。因此,可直接采用正余弦波周期函数作为温度分量。温度分量  $C_T$  可以表示为:

$$C_T = \sum_{i=1}^{m_2} \left[ b_{1i} \left( \sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi it_0}{365} \right) + b_{2i} \left( \cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi it_0}{365} \right) \right] \quad (2)$$

式中  $t$  为起始监测日至监测日的累计天数; $t_0$  为起始监测日至建模资料系列第一个监测日的累计天数; $b_{1i}$ 、 $b_{2i}$  为温度分量的回归系数; $m_2$  一般取 1,2。

## (3) 时效分量

大坝产生时效分量的原因较复杂,它综合反映了坝体混凝土的徐变、塑性变形,基岩的徐变、塑性变形和地质构造产生的压缩变形<sup>[5]</sup>。时效分量初期变化急剧,后期变化渐趋稳定,所以用线性和非线性两项表示。时效分量  $C_\theta$  可以表示为:

综上,组成大坝倾斜  $C$  的水压分量  $C_H$ 、温度分量  $C_T$ 、时效分量  $C_\theta$  可以表示为:

$$C_\theta = d_1(\theta - \theta_0) + d_2(\ln\theta - \ln\theta_0) \quad (3)$$

式中  $\theta$  为起始监测日至监测日的累计天数  $t$  除以 100; $\theta_0$  为起始监测日至建模资料系列第一个监测日的累计天数  $t_0$  除以 100; $d_1$ 、 $d_2$  为时效分量的回归系数。

综上,由  $C = C_H + C_T + C_\theta$ , 建立坝体倾斜统计模型:

$$C = \sum_{i=1}^{m_1} a_i H_u^i + \sum_{i=1}^{m_2} \left[ b_{1i} \left( \sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi it_0}{365} \right) + b_{2i} \left( \cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi it_0}{365} \right) \right] + d_1(\theta - \theta_0) + d_2(\ln\theta - \ln\theta_0) + \text{con} \quad (4)$$

式中 con 为常数项。

## 2.2 坝体倾斜统计成果分析

锦屏一级拱坝目前大坝倾斜观测共计 16 个测点,其中高程 1 664.00 m 的 19 号坝段倾斜测点数据跳动,其余 15 个倾斜测点规律性较好,统计模型研究选择规律较好的倾斜测点(共 15 个)作为研究对象。统计回归样本选择 2014 年 9 月

(基准值)至 2021 年 11 月的数据。

### 2.2.1 统计模型及精度分析

逐步回归分析法求得锦屏一级水电站坝体倾斜测点的统计模型,由统计模型可以得到以下几点认识:

(1)各坝体倾斜测点统计模型的精度均维持在较高水平,大部分倾斜测点的复相关系数大于 0.94,剩余标准差在 5"以内。说明模型对拱坝坝体倾斜的回归效果比较理想。

(2)水压分量表现为库水位上升,坝体往下游倾斜;库水位下降,坝体往上游倾斜。坝体倾斜的变化基本同步于库水位的变化。

(3)时效对大坝倾斜的影响很小。

### 2.2.2 各分量的影响分析

各分量权重计算的方法和时段不一样,得到的结果也会有一定的差异。该文以各测点所经历的荷载范围为计算边界,以各分量的绝对值为计算单位,求各分量的权重,即:

$$\omega_i = \frac{|C_i|}{|C_H| + |C_T| + |C_\theta|} \quad (5)$$

式中  $\omega$  为各分量的权重; $i$  代表水压、温度和时效; $|\cdot|$  为绝对值。

各测点统计模型计算得到的各分量的权重见表 2,从表中可以得到以下认识:

(1)锦屏一级大坝倾斜受水压作用较为显著:库水位上升往,坝体往下游倾斜;坝体库水位下降,往上游倾斜。坝体倾斜的变化基本同步于库水位的变化。高程 1 829.00 m 水压分量约占 50%左右,高程 1 778.00 m 水压分量约占 60%左右,高程 1 730.00 m 水压分量约占 70%左右,高程 1 664.00 m 水压分量约占 20%左右。水压分量占比总体表现为:高程 1 730.00 m > 高程 1 778.00 m > 高程 1 829.000 m > 高程 1 664.00 m。整体而言,统计模型的水压分量可以较好地反映水压对大坝倾斜的影响。

(2)温度对大坝倾斜有一定的影响,但其影响较库水位要小,除高程 1 664.00 m 外,其余高程的温度分量占比均小于 35%。

(3)时效也是影响锦屏一级大坝倾斜的因素之一,但其影响较库水位及温度要小。从统计模型成果看,大部分测点的时效分量小于 20%,有些测点时效分量没有入选,说明时效对大坝倾

表 2 统计模型各分量权重表

测点	分 量						
	分离值 / "			比重			
	水压	温度	时效	水压	温度	时效	
11 号	6.92	19.96	4.23	22%	64%	14%	
13 号	1 664.00	7.73	20.68	14.92	18%	48%	34%
16 号	5.63	14.18	3.52	24%	61%	15%	
9 号	36.07	8.63	0.00	81%	19%	0%	
11 号	1 730.00	37.25	10.05	14.91	60%	16%	24%
13 号	35.48	11.59	2.91	71%	23%	6%	
16 号	24.16	7.14	4.32	68%	20%	12%	
9 号	41.61	16.70	0.00	71%	29%	0%	
11 号	1 778.00	38.57	16.47	9.54	60%	26%	14%
19 号	13.43	7.47	1.89	59%	33%	8%	
9 号	23.19	10.89	13.64	49%	23%	28%	
11 号	26.88	14.45	16.32	47%	25%	28%	
13 号	1 829.00	25.73	14.02	11.97	50%	27%	23%
16 号	14.96	11.81	5.65	48%	35%	17%	
19 号	12.16	6.34	1.14	62%	32%	6%	

斜影响很小。目前大坝倾斜呈基本稳定的趋势，时效已基本收敛。

### 3 结 语

锦屏一级水电站坝体倾斜的统计模型回归效果比较理想，并且分离的各分量总体符合实际情况，适宜用作坝体倾斜分析与监控。统计模型表明，坝体倾斜受水压作用较为显著，库水位上升往下游倾斜，库水位下降往上游倾斜。坝体倾斜的变化基本同步于库水位的变化。同时，温度对大坝倾斜有一定的影响，但其影响较库水位会小很多。时效也是影响坝体倾斜的因素之一，目前，时效分量已趋于收敛。

监测成果分析可知，坝体各倾斜测点的测值变化较平稳，倾斜分布较合理，倾斜变化符合一般变化规律。此外，通过统计模型分解，各分量均可得到合理的解释，可以认为锦屏一级水电站坝体倾斜的实测性态是正常的。

(责任编辑:廖益斌)

### 参考文献:

- [1] 周钟,唐忠. 锦屏一级水电站枢纽总布置[J]. 人民长江, 2009,40(18):18-20.
- [2] 何金平,李珍照,薛桂玉,等. 混凝土拱坝坝体倾斜实测性态分析评价[J]. 中国农村水利水电,1999,2(2):1-6.
- [3] 张亮,张学良. 精密水准测量在锦屏一级水电站蓄水期坝体变形监测中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测,2015,39(2):38-41.
- [4] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [5] 顾冲时,吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京:河海大学出版社,2006.

### 作者简介:

徐劲草(1982-),男,四川崇州人,高级工程师,博士,从事水电工程监测与信息化研究工作;  
张超萍(1988-),女,湖南邵阳人,工程师,硕士,从事工程安全监测设计与评价研究工作;  
蔡德文(1973-),男,湖南岳阳人,教授级高级工程师,硕士,从事工程安全监测设计与评价研究工作.

## 总投资 151 亿! 又一个抽蓄项目核准了!

2023 年 11 月 22 日,四川省发展和改革委员会核准批复四川道孚抽水蓄能电站项目,项目总投资约 151.11 亿元。道孚抽水蓄能电站是《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035 年)》“十四五”重点实施项目。电站装机容量 210 万千瓦,额定水头 721 米,距高比 2.92。电站建成后承担电网系统调峰、填谷、储能、调频、调相和紧急事故备用等任务。电站位于四川省甘孜州道孚县境内,距道孚县、康定市、成都市公路里程分别为 105 公里、170 公里、448 公里。枢纽工程主要包括上水库、下水库、输水系统、地下厂房及地面开关站等建筑物。

(新闻来源:抽水蓄能行业分会)