

## 溪洛渡水电站库区地灾滑坡体 GNSS 自动化监测

### 一、溪洛渡库区地灾监测项目综述

溪洛渡水电站是国家“西电东送”骨干工程，位于四川和云南交界的金沙江上。大坝高 285.5 米，为世界泄洪量最大的大坝；总装机容量 1386 万千瓦，年均发电 571.2 亿千瓦时，装机容量与原来世界第二大水电站——伊泰普水电站（1400 万千瓦）相当，是中国第二、世界第三大水电站。坝址位于四川省和云南省永善县接壤的溪洛渡峡谷内，距雷波县和永善县分别为 20km 和 7km。

溪洛渡水电站是一座以发电为主，兼有防洪、拦沙河改善下游航运条件等综合水电工程，装机容量 1386 万千瓦。大坝为混凝土双曲拱坝，坝顶高程 610m，最大坝高 285.5m，水库正常蓄水位 600m，死水位 540m，库容 126.7 亿 m<sup>3</sup>。水库沿金沙江干流全长 199km，沿金沙江支流西苏角河、溜筒河、牛栏河、西溪河等累计长度 35km，涉及四川省的宁南、布拖、金阳、昭觉、雷波和云南省的巧家、鲁甸、昭阳、永善等九县区。

溪洛渡水电站工程蓄水划分为“下闸~560m 高程”和“560m 高程~600m 高程”两个阶段，其中，第一阶段 540m、580m 高程保持短期水位不变以便于观测分析。溪洛渡水电站于 2013 年 5 月下闸蓄水，至 8 月上旬水位上升至 550m 左右。由于水位不断抬高，一些不稳定的岩体在水的浸泡下，连同表明覆盖层开始下滑，随着雨季的来临，各位移体存在加速下滑的危险，下滑大的地方已经形成裂缝，而且每天都在变化，用肉眼都可分辨，随时都可能出现滑坡的危险。

为了能够及时掌握各滑坡体的状态，成勘院组织相关专家对整个库区的不稳定岩体进行现场勘察，经过分析确定首期选取 5 个位移较大的滑坡体进行全天候的自动化监测，实时获得监测数据，分析滑坡体的状态，以便采取措施。

### 二、溪洛渡库区地灾监测项目内容

#### 1. 系统整体架构

如图 1 所示，各个滑坡体的观测点原始数据，通过无线网桥传输至滑坡体子控制中心；由子控制中心进行数据解算后，再通过 3G 无线路由器将解算结果转发至总控制中心的服务器，在总控制中心即可对各滑坡体的形变情况进行监测。



图1 系统拓扑图

## 2. 滑坡监测内容

溪洛渡水电站库区地灾监测系统，共布设监测点 55 个，其中基站 10 个，位移监测点 45 个。滑坡体 5 个，如监测点布置示意图 2-1、2-2、2-3、2-4、2-5。



图2-1 下坝下游滑坡布点图



图2-2 火石子滑坡布点图

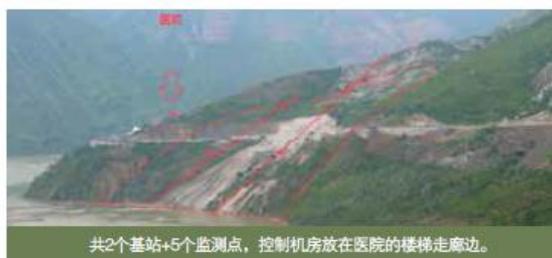


图2-3 阿拉吞滑坡布点图



图2-4

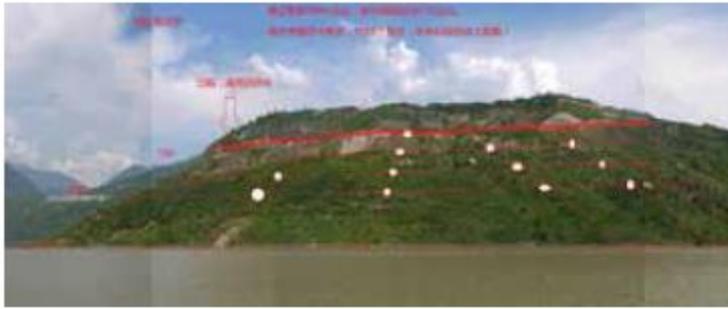


图2-5 花生地上游滑坡布点图

### 三、溪洛渡库区地灾监测系统监测成果

GNSS 监测系统中，解算软件实时解算出高精度坐标数据，通过分析软件输出各种监测结果。包括：数据输出、图表输出、报警信息输出、报表输出、矢量地图输出等。

#### 1. 数据成果输出

数据成果包括监测点三维坐标，以及三维方向偏移量，水平偏移量、方位角，空间三维偏移量，并能根据查询结果导出数据到 EXCEL 文件中。

(1) 任意时间段内详细监测数据输出；

(2) 1 小时、3 小时、6 小时、12 小时、24 小时、30 天高精度数据输出；

(3) 监测点的速度、加速度数据输出。

2. 图表成果输出分析软件根据数据，可实时绘制各种成果曲线，实现单点图表分析及面状图表析。

(1) 根据详细数据、高精度小时数据绘制监测点曲线；

监测点	时间	X位移(mm)	Y位移(mm)	Z位移(mm)	沿X速度(mm/s)	沿Y速度(mm/s)	沿Z速度(mm/s)	20位移(mm)	30位移(mm)	方位角(deg)
TP05-AP5	2013/10/25 12:59:45	2704495.1114	489528.3813	536.1958	0.0016	0.0003	-0.0013	0.3065	0.0006	106.8377°
TP05-AP5	2013/10/25 13:29:40	2704495.1101	489528.3829	536.1981	0.0029	0.0000	0.0002	0.3095	0.0013	113.4883°
TP05-AP5	2013/10/25 13:59:38	2704495.1137	489528.3765	536.1989	0.0000	0.0026	-0.0044	0.3036	0.0007	85.9390°
TP05-AP5	2013/10/25 14:29:34	2704495.1090	489528.3798	536.1999	0.0022	0.0006	-0.0032	0.3065	0.0004	129.9004°
TP05-AP5	2013/10/25 14:59:50	2704495.1106	489528.3828	536.2271	0.0030	0.0008	-0.0068	0.3103	0.0007	111.4780°
TP05-AP5	2013/10/25 15:29:44	2704495.1164	489528.3782	536.2039	-0.0024	0.0002	-0.0004	0.3068	0.0006	85.8292°
TP05-AP5	2013/10/25 15:59:44	2704495.1123	489528.3836	536.1965	0.0000	0.0000	-0.0020	0.3100	0.0002	97.8164°
TP05-AP5	2013/10/25 16:29:44	2704495.1082	489528.3824	536.1990	0.0048	0.0001	0.0045	0.3103	0.0015	123.3883°
TP05-AP5	2013/10/25 16:59:45	2704495.1109	489528.3836	536.1901	0.0021	0.0006	0.0037	0.3108	0.0015	105.0004°
TP05-AP5	2013/10/25 17:09:45	2704495.1188	489528.3895	536.1889	0.0028	-0.0026	0.0078	0.3046	0.0009	222.4377°
TP05-AP5	2013/10/25 18:29:44	2704495.1015	489528.3783	536.1981	0.0115	0.0013	0.0000	0.3128	0.0020	108.6491°
TP05-AP5	2013/10/25 18:59:45	2704495.1003	489528.3919	536.1251	0.0127	-0.0229	0.0455	0.3254	0.0010	246.2019°
TP05-AP5	2013/10/25 19:29:40	2704495.1043	489528.3836	536.1728	0.0087	0.0006	0.0217	0.3137	0.0008	133.8829°
TP05-AP5	2013/10/25 19:59:45	2704495.1026	489528.3798	536.1974	0.0110	0.0020	-0.0029	0.3112	0.0015	115.9000°
TP05-AP5	2013/10/25 20:29:45	2704495.0954	489528.3829	536.1983	0.0178	0.0009	0.0000	0.3202	0.0002	154.1829°
TP05-AP5	2013/10/26 11:29:11	2704495.1114	489528.3787	536.1946	0.0018	0.0007	0.0000	0.3068	0.0009	116.8209°
TP05-AP5	2013/10/26 13:09:06	2704495.1108	489528.3794	536.2031	0.0020	0.0008	0.0078	0.3071	0.0006	85.8130°

图3 数据成果图

- (2)根据断面情况，可组合绘制断面曲线，实现断面分析功能；
- (3)对曲线建立多种参数模型，对曲线进行趋势拟合，绘制拟合线，并可对拟合线数据进行输出；
- (4)查询后的图表，可进行图表成果的导出；
- (5)图表操作方便，可进行数据捕捉、平移、放大缩小等功能；
- (6)曲线属性可编辑，根据喜好对曲线颜色、粗细、线型等进行编辑。

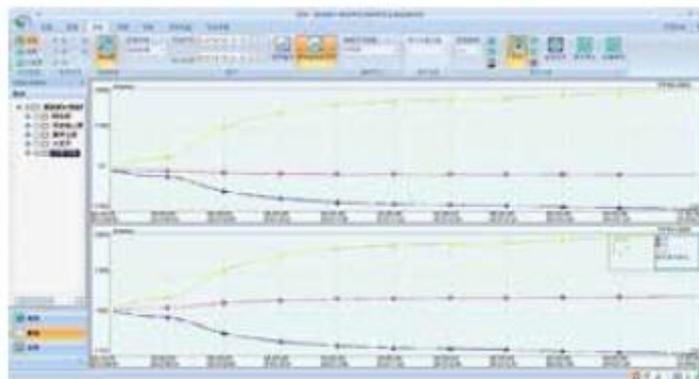


图4 图表成果

### 3. 报警成果输出

- (1)远程通讯报警，可采用短信息、网页弹窗、声音、email 报警方式；
- (2)有位移量、速度、加速度等方式报警；
- (3)分级别报警，可设置 3 级报警模式；

(4)对设备故障、通讯故障进行报警；

(5)报警信息查询、输出等功能。

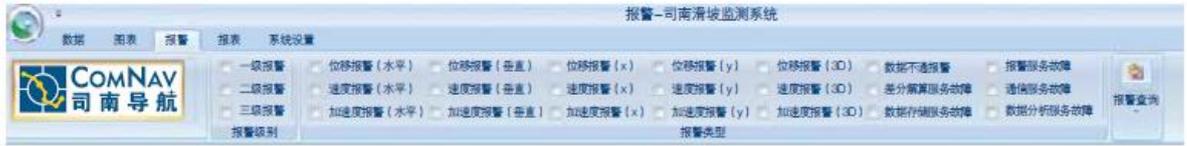


图5 报警成果输出

#### 4. 报表成果输出

报表可以根据各种分析结果，归纳出变化速率，变形的数值，各监测点的稳定性，整体变形趋势都信息。根据需要提供趋势报表，周期对比报表等。

##### (1) 位移对比报表

表1 监测系统的位移对比表（计算周期：2013年10月5日~2013年10月6日）

	区域	点号	周期水平位移量	周期水平位移量	周期垂直位移量	周期垂直位移量	累计水平位移量	累计水平位移量	累计垂直位移量	累计垂直位移量
			(昨日)	(今日)	(昨日)	(今日)	(昨日)	(今日)	(昨日)	(今日)
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
			$\Delta XY_{d-1}$	$\Delta XY_d$	$\Delta H_{d-1}$	$\Delta H_d$	$\Sigma \Delta XY_{d-1}$	$\Sigma \Delta XY_d$	$\Sigma \Delta H_{d-1}$	$\Sigma \Delta H_d$
滑坡区域A		TP03-XBX								
		TP04-XBX								
滑坡区域B		TP05-XBX								

##### (2)分析报表

表2 监测系统工程数据TP03X监测点分析详表（计算周期：2013年9月5日~2013年11月6日）

日期	累计位移量 (mm)				周期位移量 (mm)				周期速率 (mm/d)			方位角(°)
	$\Sigma \Delta XY$	$\Sigma \Delta X$	$\Sigma \Delta Y$	$\Sigma \Delta H$	$\Delta XY$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta H$	$\Delta V_x$	$\Delta V_y$	$\Delta V_H$	W
2013/11/06	2535.5	-548.5	2475.5	-2218.2	11.2	-1.3	11.1	-9.6	14.8	11.2	-9.6	102.5
2013/11/05	2524.4	-547.2	2464.4	-2208.5	14.2	-3.5	13.8	-10.5	17.7	14.2	-10.5	102.5
2013/11/04	2510.2	-543.7	2450.6	-2198.0	15.7	-3.1	15.4	-17.1	23.3	15.7	-17.1	102.5
2013/11/03	2494.5	-540.6	2435.2	-2180.8	18.3	-4.3	17.8	-12.2	22.0	18.3	-12.2	102.5
2013/11/02	2476.2	-536.3	2417.4	-2168.6	19.9	-1.8	19.9	-20.6	28.7	19.9	-20.6	102.5
2013/11/01	2456.4	-534.5	2397.6	-2148.0	18.6	-4.7	18.0	-13.2	22.8	18.6	-13.2	102.6

##### (3)周期报表

表3 监测系统的位移及速率表（计算周期：2013年9月5日）

区域	点号	方位角	累计水平位移量	周期水平位移量	周期水平位移速率	累计垂直位移量	周期垂直位移量	周期垂直位移速率
		(°)	(mm)	(mm)	(mm/d)	(mm)	(mm)	(mm/d)
		W	$\Sigma \Delta XY$	$\Delta XY$	$\Delta V_{xy}$	$\Sigma \Delta H$	$\Delta H$	$\Delta V_H$
	TP05	108.7159	30.5	17.6	17.6	-2.6	1.9	1.9
	TP04	112.2475	49.6	12.3	12.3	6.6	0.1	0.1
	TP03	94.1793	33.2	8.9	8.9	-3.6	-1.2	-1.2

(2)分析报表

(3)周期报表

## 5. 矢量地图成果输出

监测系统可根据监测区域情况，对监测滑坡体进行标记，矢量地图通过箭头、颜色表示滑坡体或者监测点的移动方向、移动量、沉降量等。

- (1)矢量地图可显示监测点的水平方向、水平位移量、沉降方向、沉降量等信息；
- (2)矢量地图可放大缩小、平移、编辑等功能；
- (3)矢量地图上可实时显示监测点、监测滑坡的数据信息。

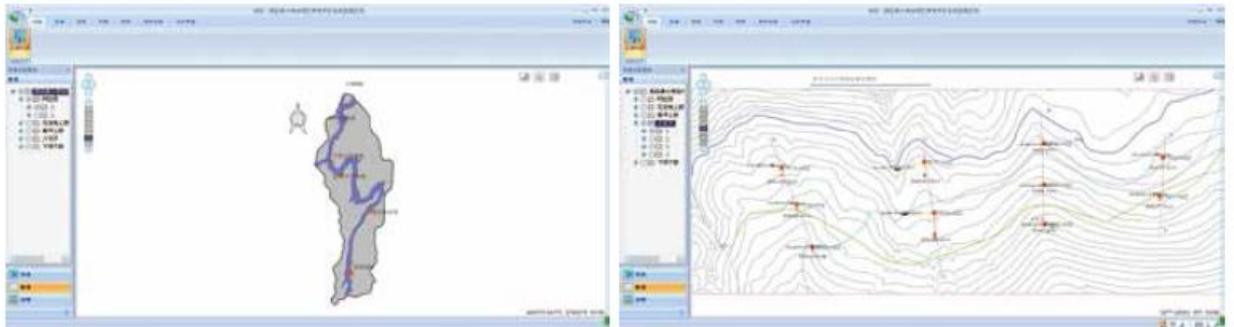


图6 矢量地图成果

## 四、溪洛渡库区地灾监测项目特点

- 国内为数不多使用支持三星八频解算的 GNSS 接收机，可以接收并联合处理北斗 B1 \ B2 \ B3、GPS L1 \ L2 \ L5、GLONASS L1 \ L2 数据；
- 高精度 GNSS 监测系统，实现毫米级精度监测（水平 3 毫米，高程 5 毫米）；
- 本系统监测点采用太阳能供电方案、无线通讯方案，解决了滑坡体野外供电的问题。分控中心采用工控机，降低分控中心设备功耗，实现分控中心布设在野外，采用太阳能供电的方案；
- 支持多基站，多基站不但提高了系统的可靠性，而且，根据多基站的观测数据，可以建立电离层改正模型，提高长距离监测的精度；同时，根据多基站的处理结果，可以实现实时独立环网平差功能，提高监测精度和可靠性；
- 系统采用分布式计算方式系统架构，采用子控制中心方式分别计算获得高精度三维坐标，通过 3G 网络实现实时数据集中存储与变形分析应用，数据集中存储在总控制中心，形成一体化的变形监测数据库；
- 区域监测内采用原始的卫星星历数据，在子控制中心进行统一的坐标解算，仅需传输解算后的三维坐标信息至总控制中心。分布式的坐标解算减少了 3G 网络传输的数据量。系统支持网络中断后的坐标数据续传功能；
- 分布式的坐标解算大大提高了坐标解算系统的可靠性。在观测点数据量巨大、环境因

素各不相同、参考点众多的情况下，若采用集中式的坐标解算，对软硬件的可靠性要求非常高；

- 滑坡软件客户端采用 C/S 和 B/S 混合架构，客户端可以远程运行，同时也能满足专业的需求，实现远程查询、管理、报警。

- 实现专业的数据分析功能、报表输出、曲线分析、报警、矢量地图显示功能。