

溪洛渡高拱坝泄洪振动监测系统设计及应用

凌骥¹ 毛延翩² 刘顶明² 马文锋¹ 胡波¹

(1. 南瑞集团有限公司/国网电力科学研究院 江苏, 南京, 211106

2. 溪洛渡水力发电厂 云南, 永善, 657300)

[摘要] 为掌握高拱坝坝身泄洪时坝身的振动特性、坝体不同部位加速度、振幅等情况, 结合溪洛渡双曲拱坝的运行工况特点, 研究设计了泄洪振动在线监测系统。通过实时监测大坝泄洪期间的关键效应量数据, 分析了坝体动力特性参数和工作性态, 以此确定受泄洪振动影响显著的部位, 为评价泄洪振动对水工建筑物的影响程度提供了技术支撑。

[关键词] 溪洛渡拱坝, 泄洪振动, 安全监测系统, 动力响应

1 引言

混凝土拱坝是一种既安全又经济的坝型, 由于其泄洪方便, 抗震性能好等优点, 在国内外得到了广泛应用。随着坝工建设水平和技术的不断发展, 拱坝的高度在不断地增加, 目前我国已建成投产了多座 300m 级的高拱坝。国内外对于流激振动引起的事故屡有报道, 水工结构在脉动水流荷载作用下的振动问题逐渐引起人们的重视。由于高拱坝水电枢纽工程的泄水建筑物往往具有高水头、大流量、超高流速等特点, 且坝体结构趋于轻型化, 因此泄洪时水流诱发的坝体振动问题愈发突出, 严重时会影响枢纽安全运行甚至结构破坏。由于泄洪运用不当造成结构物损坏的情况时有发生, 如二滩水电站 1#泄洪洞的大规模破坏、五强溪水电站溢流坝消力池底板的冲毁破坏等。

国外学者在上世纪 30 年代已开始工程振动监测技术方面的研究, 但最初是应用在桥梁、高楼等建筑结构上。1964 年, G.R.Darbe 等人^[1]对 250m 高的 Mauvoisin 拱坝进行了振动监测试验, 研究了水位对大坝自振频率的影响; 1980 年, Flesch 等人^[2]对澳大利亚 Kolnbrein 拱坝进行了原型振动监测试验。国内专家和学者对大坝的原型振动监测也进行了长期探索研究, 并取得了有益的成果。1981 年, 罗学海^[3]和徐道远等^[4]分别对恒山拱坝和丰乐拱坝的自振特性进行了监测分析; 1986 年, 张光斗院士等^[5]分析了泉水拱坝在人工激振、泄洪振动和天然脉动等情况下的自振频率; 2007 年, 寇立夯等^[6]对国内外 40 座拱坝原型振动试验结果进行了综合分析, 认为坝高与坝体固有频率存在密切相关。从国内外近几十年的工程实践成果看, 利用现场原型振动监测技术对大坝结构进行动力学特性测试以掌握其运行参数是可行的。

常规的大坝安全监测系统由于采样频次稀疏, 且所测物理量有限, 难以捕捉坝体在振动工况下的动力学相关特征参数。因此需对泄洪工况下的高拱坝进行动态监测, 并结合大坝静态监测数据, 更加准确的对不同工况下结构的动力响应进行分析和评估, 为科学合理地进行大坝泄洪调度提供参考。由于国外已建成高拱坝的泄量和泄洪功率都不大, 因而缺乏成熟的高拱坝大流量泄洪的运行经

作者简介: 凌骥 (1979-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程安全监测研究。本文受国家电网公司科技项目 (2000-201956442A-0-0-00) 基金资助。

验。我国虽然在近年来对不同高拱坝的泄洪振动问题开展了相关的理论分析、试验研究以及部分原型观测，但由于各高拱坝的运行环境和条件均不同，只能得到部分相关的初步定性分析和监测结果。而缩尺模型试验在模型与原型的可比性、“尺寸效应”等方面存在困扰；数值仿真由于计算参数很难准确获取、不连续面力学特性难于描述、计算边界条件很难与实际情况相符等因素导致计算结果的准确度和可信度也存在局限。在此背景下，研究设计适用于泄洪工况下的高拱坝振动监测系统已是必然要求。

为了掌握高拱坝坝身泄洪时坝身的振动特性、坝体不同部位加速度、振幅等情况，本文结合溪洛渡双曲拱坝的运行工况特点，研究设计了泄洪振动在线监测系统。通过实时监测大坝泄洪期间的关键效应量数据，分析坝体动力特性参数和工作性态，以此确定受泄洪振动影响显著的部位，为评价泄洪振动对水工建筑物的影响程度提供技术支撑。

2 监测布置

溪洛渡水电站枢纽是由拦河大坝、泄洪建筑物、引水发电建筑物等组成。溪洛渡大坝为混凝土双曲拱坝，坝顶高程 610.0m，最大坝高 285.5m。坝身泄洪建筑物包括 7 个泄洪表孔和 8 个泄洪深孔，采用表孔下跌式、深孔上翘式布置，采用分层出流、空中碰撞、水垫塘消能的方式，两股水舌在空中碰撞后跌入水垫塘内紊动消能。在大坝下游设置水垫塘和二道坝，二道坝布置于水垫塘末端，起壅高塘内水位的作用。溪洛渡水电站具有“窄河谷、高拱坝、巨泄量”的特点，大坝坝身孔口泄洪振动可能对大坝、水垫塘的结构安全产生影响，一方面坝体混凝土的抗拉强度低，另一方面大坝在泄洪振动的长期作用下，局部可能发生疲劳损伤。

为掌握高拱坝泄洪振动的结构动力响应特性，考虑对坝体的加速度、速度以及接缝动位移等参数进行实时监测。由于泄洪诱发的坝体振动属于低频、随机、微幅振动，故需要传感器具有很好的低频响应能力。因此监测方法采用速度型三向低频振动传感器对坝体及坝肩抗力体进行振动实时监测，获取振动加速度、速度、振幅及振动频率等；采用接缝动位移传感器在不同泄洪工况下坝体横缝的开合情况，分析评价坝体横缝开合受泄洪的影响程度。

振动测点选取大坝典型断面 10#坝段、15#坝段、22#坝段不同高程以及坝顶两岸平洞，共布置 12 个三分量振动监测点和 4 个横缝动位移测点（如图 1）。另外选取近坝肩的抗力体平洞布设典型断面（距坝轴线约 143m），沿不同高程在左右岸抗力体平洞内各布置 3 个三分量振动监测点。

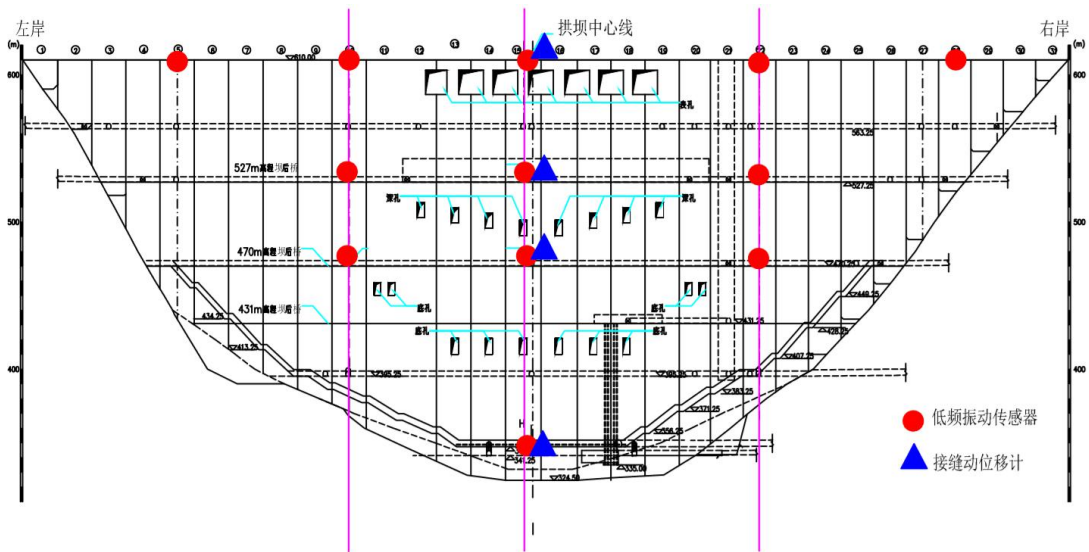


图 1 溪洛渡大坝泄洪振动监测布置图

3 系统设计

3.1 系统架构

由于溪洛渡大坝泄洪振动监测点位置相对分散，为减少传感信号长距离传输而引入的干扰，数据采集系统采取分布式布置，在坝顶、527 廊道、470 廊道及 395 廊道等高程部位分别设置数据采集装置，实现传感器信号就近接入采集，如图 2 所示。

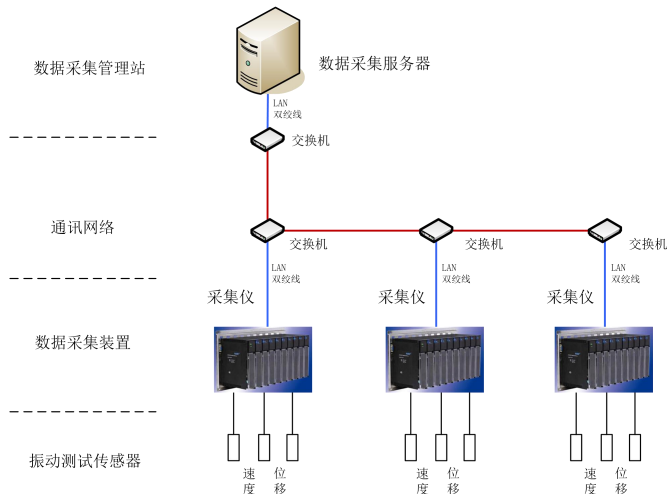


图 2 溪洛渡大坝泄洪振动监测系统架构

3.2 数据采集通讯

由于本系统的监测传感器类型不同、采样频次高、数据量大，且需要实现各传感器同步采集，并具有一致的时标，因此对通讯网络的带宽及实时性都有较高的要求。为保证可靠性，系统网络通讯采用基于 TCP/IP 通讯协议的星型光纤以太网结构进行搭建。根据测站位置的分布，新铺设光纤或利用已有的光纤建立各个站点的通讯线路，在数据采集管理站及每个采集装置节点处分别设置工业以

太网交换机，提供 RJ45 以太网接入接口。数据采集装置本身自带有 LAN 口，可以直接接入交换机；管理站的采集服务器亦通过 LAN 口接入网络，从而实现与数据采集装置的高速通讯。

3.3 系统供电

(1) 采集管理站

采集管理站的用电设备主要为数据服务器及网络交换机，系统运行时要求不间断供电。采集站所处的控制室内市电供给较为可靠，可直接引接，同时配置一台 UPS 电源，以避免意外断电。

(2) 现地数据采集站

现地数据采集站的用电设备主要为数据采集装置及网络交换机等设备，系统运行时候要求不间断供电。由于大坝及廊道等部位的市电供给均较为可靠，因此系统各监测站不考虑再设置独立的电源系统，就近接入现地的照明或检修供电系统，必要时牵引部分电缆。

为保证系统的连续不间断运行，防止偶尔跳闸引起的网络中断及数据丢失，在每个现地测站均配置免维护电池作为备用电源，并采用充电器进行浮充，以便在临时停电时为数据采集装置及通信设备供电。

4 监测成果

4.1 典型泄洪情况

根据调度安排及现场实际水文情况，溪洛渡大坝于 9 月 23 日 10:29 开始当年首次泄洪，泄洪前上游水位 590.3m，下游水位 382.8m。截至 10 月 7 日 24 时，期间经历两次泄洪过程，主要运用 3# 和 6# 深孔泄洪。第一次泄洪为 9 月 23 日 10:29 至 10 月 3 日 11:53，首先开启 3# 深孔进行泄洪，9 月 27 日 16:35 增加开启 6# 深孔，两孔于 10 月 2 日和 3 日先后关闭。第二次泄洪发生在 10 月 4 日 17:32 至 10 月 7 日 22:15，期间仅开启 3# 深孔。泄洪结束后上游水位为 599.3m，下游水位为 382.5m。相关监测数据和历时过程见表 1 和图 3。

表 1 溪洛渡大坝泄洪深孔启闭情况统计（截至 2019 年 10 月 7 日）

深孔 编号	开启时间	关闭时间	上游水位(m)		下游水位(m)	
			泄洪前	泄洪后	泄洪前	泄洪后
6#	2019/9/27 16:35	2019/10/2 12:19	590.306	597.497	382.799	382.709
3#	2019/9/23 10:29	2019/10/3 11:53	590.306	598.028	382.799	381.489
3#	2019/10/4 17:32	2019/10/7 22:15	599.635	599.307	381.779	382.489

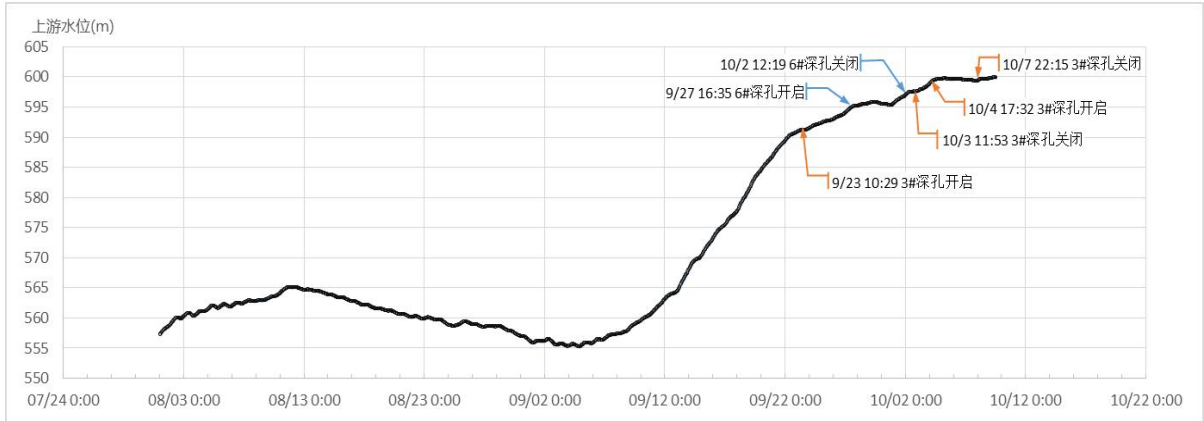


图3 溪洛渡大坝泄洪期间库水位过程线

4.2 监测数据分析

(1) 坝体横缝动位移

选择9月24-25日典型时段的15#坝段接缝位移监测数据作为分析样本，工况条件为上游水位590.3m，单开3#深孔泄洪。监测数据表明，15#坝段各典型高程接缝在本工况泄洪期间的开合度变化量级极小，最大值为 $0.796\ \mu\text{m}$ ，最大变幅为 $0.699\ \mu\text{m}$ ，出现在527.25m高程。从各测点变化时程上看（如图4），接缝在泄洪过程均处于窄幅快速波动中，总体未见明显突变或异常趋势性变化，接缝基本处于动态稳定状态。从位移分布规律上看，低高程的坝段接缝变化幅度最小，在2/3坝高处的接缝位移变化相对剧烈，约为低高程位移量的3倍，此现象与泄洪深孔的位置及拱冠梁坝段的约束条件有关，总体符合规律。

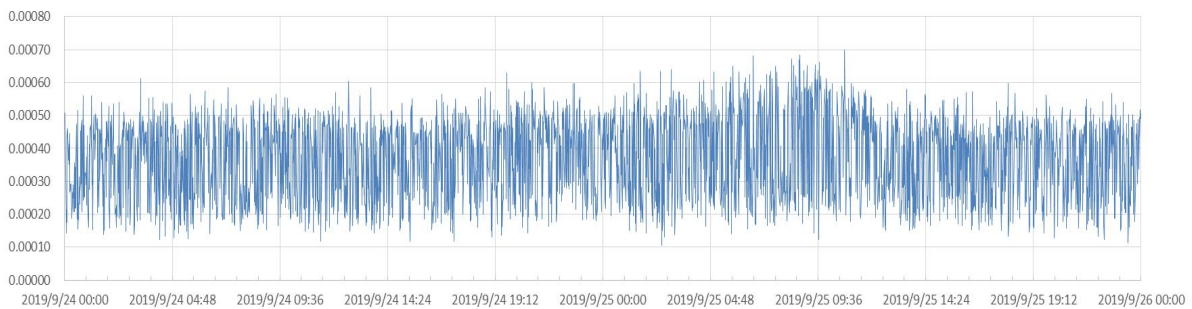


图4 15#坝段527m高程接缝位移时程图

(2) 坝体振动速度及动位移

表2 坝顶高程测点动力响应参数统计表

运用工况	监测部位	径向速度 (mm/s)	切向速度 (mm/s)	竖向速度 (mm/s)	径向位移 (mm)	切向位移 (mm)	竖向位移 (mm)
泄洪前	10#坝段	0.003842	0.003604	0.003766	0.002021	0.001990	0.002167
	15#坝段	0.004165	0.003659	0.003418	0.002067	0.002066	0.001937
	22#坝段	0.004145	0.003871	0.003556	0.002182	0.002500	0.002026

3#深孔（库水位 590m）	10#坝段	0.098693	0.020879	0.022733	0.009319	0.003037	0.002782
	15#坝段	0.066998	0.032853	0.026205	0.006639	0.004571	0.002338
	22#坝段	0.074458	0.020247	0.014518	0.007140	0.003128	0.002397
3#和 6#深孔（库水位 590m）	10#坝段	0.095463	0.025104	0.021459	0.008309	0.002069	0.001442
	15#坝段	0.073853	0.032742	0.031267	0.005505	0.003195	0.001563
	22#坝段	0.080085	0.020652	0.024637	0.007713	0.001670	0.001333
3#深孔（库水位 599m）	10#坝段	0.108130	0.026261	0.029258	0.008862	0.003480	0.002853
	15#坝段	0.073865	0.034002	0.027047	0.006924	0.004103	0.002393
	22#坝段	0.073650	0.019060	0.016217	0.007046	0.002637	0.002256

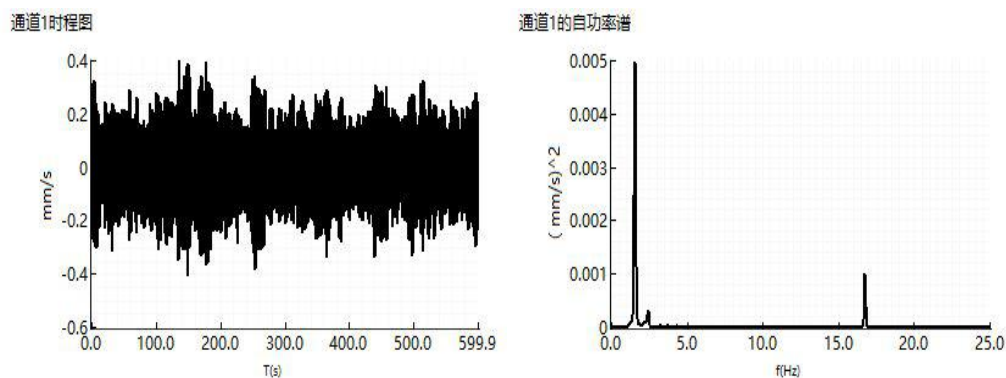


图 5 3#与 6#深孔同时开启时 10#坝段坝顶径向时程图与自功率谱（库水位 590m）

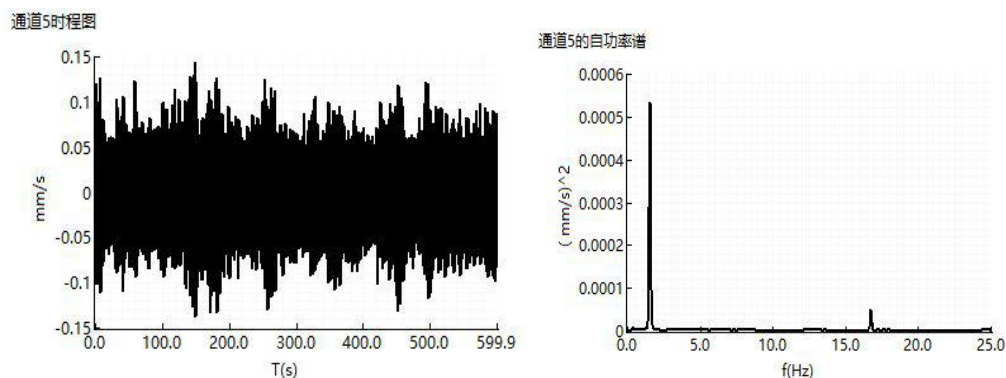


图 6 3#与 6#深孔同时开启时 15#坝段坝顶切向时程图与自功率谱（库水位 590m）

监测数据表明（表 2），不同水位下 609m 高程径向振动能量 10#坝段径向 > 22 坝段径向 > 15 坝段。3 号和 6 号深孔同时开启时振动速度均值大于单独开启 3 号深孔（上游水位 590m）时，泄洪时振动速度均值是未泄洪时的 5~20 倍，振动位移为 $1\ \mu\text{m}$ ~ $9\ \mu\text{m}$ 之间。

如图 5 和图 6 所示，上游水位 590m 泄洪期间，在 3 号深孔单开、3 号与 6 号深孔同时开启情况下，609 高程各测点坝段振动均较明显，双曲拱坝的径向与切向主频约为 1.56Hz，竖向的振动能

量集中在 16.74Hz。在上游水位 599m 单开 3#深孔情况下，坝体自振频率为 1.53Hz，振动能量主频值为 15.45Hz。坝顶 10#、15#、22#各个坝段振动均较明显，且大于水位 590m 时振动，说明坝体泄洪振动大小与库水位有关。

5 结论

(1) 针对泄洪工况下的高拱坝低频、随机、微幅振动参数监测，要求传感器具有很好的低频响应能力。通过在重点坝段的典型高程分别布设速度型三向低频振动传感器和动位移计，能够实现对坝体及坝肩抗力体的振动实时监测，获取振动加速度、速度、振幅及振动频率及坝体接缝开合等重要效应量。

(2) 对于高拱坝振动监测采用分布式自动化监测系统，具有采样频次高、处理数据量大、数据同步性好等特点，能够适用于泄洪工况下的结构振动实时监测，并且可与常规大坝监测系统进行联动，便于进行大坝安全性态综合评估。

(3) 监测成果表明溪洛渡高拱坝泄洪时坝体接缝开合度变化量极小，且无明显异常趋势。大坝自振频率属于低频振动，其振动能量与库水位有明显相关，后期可针对不同泄洪工况开展进一步的大坝振动响应敏感性分析。

参考文献:

- [1]Georges R. Darbre, Jean Proulx. Continuous ambient-vibration monitoring of the arch dam of Mauvoisin [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, (31):475-480.
- [2]Flesch R, Eiselmayer M. Dynamic In-situ tests on Kolnbrein arch dam (Austria) [A]. Proc. of the 7th WCEE [C]. Turkey, 1980.
- [3]罗学海,朱崑,黄万春等. 恒山拱坝原型振动试验[J]. 水力发电, 1981, (6): 53-57
- [4]徐道远,费文兴,孙小鹏. 丰乐拱坝自振特性的原体实测[J]. 华东水利学院学报, 1981, (1): 25-37
- [5]张光斗,张楚汉,李未显,王光纶. 泉水拱坝的振动测量与分析[J]. 中国科学 A 辑, 1986, (1): 100-112
- [6]寇立夯,金峰,迟福东等. 国内外混凝土拱坝原型振动试验分析[J]. 水力发电学报, 2007, (10): 31-36