

研究报告

停机过程中的水电站厂房支承结构动力特性识别方法

练继建, 田会静, 秦亮, 张永吉

(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

[摘要] 运行过程中的水电站厂房支承结构动荷载的作用复杂, 确定支承结构动力特性是水电站厂房动力分析中的重要问题, 然而常规的试验手段对结构有较强的破坏作用或者因难度较大不易实现。利用李家峡双排机主厂房真机试验中的测试数据, 基于动力学原理分析了停机过程中结构振动及荷载的变化特点, 提出了一种应用停机过程识别厂房支承结构动力特性的方法。在该方法中, 将机组测试与结构测试成果相结合, 并充分利用小波分析的优点, 成功地克服了停机过程分析中荷载变化历程长, 结构振动非平稳等不利因素。

[关键词] 水电站厂房; 支承结构; 动力特性; 停机过程; 小波分析

[中图分类号] TV312 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)04-0072-04

水电站结构振动问题已成为电站运行和设计中的关键之一。国内外已投入运行的许多电站, 都曾发生过不同程度的振动现象, 因此, 电站设计、运行时需对动力问题进行仔细的研究。进行结构动力分析时, 确定结构物的固有动力特性是其基本内容。一般对于大型结构自振特性的测试需要较大的瞬时激励, 常见的方法有: 气锤激励, 但由于使用的特殊试验设备结构相对较小, 不适用于水电站支承这样的大体积结构; 少量炸药爆破, 爆破前的准备工作较多, 并且具有危险性; 此外, 还可考虑利用机组甩负荷产生的瞬时冲击进行自振频率识别, 但甩负荷对机组结构及电网都有较大破坏作用; 近年来也有人提出采用泄洪激振或地脉冲识别厂房结构自振特性, 但此两种方法对测试环境或仪器要求极高, 所需测试时间较长, 分析技术要求也很高。作者结合李家峡双排机厂房真机试验研究, 提出一种利用水电站运行时常见的停机过程识别支承结构基频与阻尼比的新方法。

1 现场测试系统

李家峡水电站是黄河上游的大型梯级水电站之

一。其单机容量 400 MW、总装机容量 2 000 MW (5 × 400 MW), 为世界上已建和在建的最大的双排机厂房之一, 属我国首次采用双排机主厂房布置形式。自运行以来, 李家峡电站一直存在较明显的振动现象。2003 年, 天津大学对李家峡机组及厂房结构进行了大规模测试, 总计 122 通道, 165 种工况。如此大规模的现场原型观测, 属国内之最, 世所罕有^[1]。

在机组及厂房测试中所采用振动传感器为清华大学 DP 型低频振动传感器。该传感器具有抗震、耐冲击、高稳定性和良好的低频输出特征, 能测量微米级的绝对振动位移, 与国内同类产品相比灵敏度高, 适合于大型结构的振动测量。采集系统采用 INV 多功能智能采集系统 (含抗混滤波器)。该系统采用并行无时差技术, 采集数据可以进入基本内存、扩充内存或者直接存入硬盘; 多通道任意显示, 智能化水平高; 采集容量可多达 4G。系统低频性能好, 尤其适合于大型、超大型结构的动态测试, 包括环境激振、大地脉动下的大型结构的振动测试。

[收稿日期] 2005-03-10; **修回日期** 2005-04-27

[基金项目] 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20020056029)。

[作者简介] 练继建 (1965-), 男, 福建建瓯市人, 天津大学建筑工程学院教授

2 识别原理

2.1 动力学分析

利用停机过程识别结构的自振频率的原理是：当结构在干扰力作用下产生振动时，其振动频率与外荷载频率相同，外荷载刚消失后，结构处于自由振动状态，此时结构按照其自身的动力特性振动，虽说自由振动仍是结构各阶振型的合成，但实际上主要是基频振动的反映。对于阻尼比的识别，由于多自由度体系动力方程组解耦后可分解成与单自由度体系运动方程相类似的独立方程的组合，以单自由度体系为例进行说明，结构自由振动时的运动方程为

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2 y = 0 \quad (1)$$

一般实际结构的阻尼比 ξ 远小于 1，此时解方程位移

$$y = Ae^{-\xi\omega t} \sin(\omega_r t + \alpha) \quad (2)$$

式中 $\omega_r = \omega \sqrt{1 - \xi^2}$ 。

从式 (2) 中可以看出结构的自由振动振幅 $Ae^{-\xi\omega t}$ 按指数规律衰减。设 y_k, y_{k+n} 是自由振动体系的两个相距 n 个周期的振幅。则

$$\frac{y_k}{y_{k+n}} = \frac{Ae^{-\xi\omega t_k}}{Ae^{-\xi\omega(t_k+nT_r)}} = e^{\xi\omega n T_r} \quad (3)$$

所以有阻尼比

$$\xi = \frac{1}{n\omega T_r} \ln \frac{y_k}{y_{k+n}} \text{ 或 } \xi = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{y_k}{y_{k+n}} \quad (4)$$

识别厂房支承结构整体的自振频率与阻尼，所选分析测点必须处于整体结构上，并且不能过于靠近下部，否则振动信号太小将给识别带来困难。根据对李家峡真机试验的数据所作的统计分析认为 1 号机的不平衡动荷载较大。据此，选取位于 1 号水轮发电机组定子基础上的水平顺河向测点。

分析机组停机步骤的一般顺序是先卸去负荷，发电机脱离电网，然后关闭水轮机全部导叶，最后是机组刹车。机组完全制动之前，电磁荷载及水流荷载已经消失，机组转速也下降较多，对结构产生的影响很小，结构振动已经经历了自由振动阶段，由于阻尼的作用振动基本上停止，刹车的瞬间也不足以激起整体结构的振动。而在刹车之前有一个荷载减小到不足以使结构产生整体振动的过程，捕捉该过程之后的瞬间是找出结构自由振动的关键。

先估算一下结构自由振动过程可能持续的时间：在机组停机前的正常运行工况下，定子基础水

平顺河向振动幅值一般不超过 $100 \mu\text{m}$ ，而当信号幅值小于 $0.1 \mu\text{m}$ 时，测试受噪音影响较大，已不十分准确，根据规范一般结构阻尼比为 $0.05 \mu\text{m}$ ，三维有限元计算所得的厂房支承结构自振频率，首阶为 12.67 Hz ，根据上面公式可知经过约 20 个周期，结构自由振动将从 $100 \mu\text{m}$ 衰减到 $0.1 \mu\text{m}$ ，时间总计不超过 3 s，在计入干扰噪声等因素后实际可用来分析的时间将更短。

从上面估算来看利用停机过程识别结构自振特性的难度相当大，并且停机过程不是平稳随机过程，传统的傅立叶方法显然不适用。而近年来发展起的小波分析能够对函数和信号任意指定处以任意精度结构进行分析。据此采用小波对信号进行分析。

2.2 小波分析原理

小波分析又名小波变换 (wavelet transform)，是一种变分辨率的时频联合分析方法，通过变换能够充分突出某些方面的特征。小波分析源于 Fourier 分析，是 Fourier 分析发展史上的一个里程碑，具有时、频同时局部化的优点，享有“数学显微镜”之美称^[2]。小波分析中引入伸缩和平移的思想，采用一种位置可平移、形状可以改变的“窗口”，即分析低频信号时，其时间窗较大，而当分析高频信号时，其时间窗较小，从而改进了 Fourier 变换时频窗大小固定的弱点，满足了时频局部化分析的需求。

2.2.1 小波变换

一维连续小波变换 (CWT) 的定义：

如果 $\varphi(t) \in L^2(R)$ 满足“容许性”条件

$$C_\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\varphi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (5)$$

那么 $\varphi(t)$ 称为小波母函数。 $f(t) \in (t)L^2 \in (R^2)(R)$ 的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (6)$$

式中 a 通常称为尺度参数， b 为时间中心参数。

不同的参数对 (a, b) 对应不同的 $\phi_{(a,b)}(x)$ 。 $\phi_{(a,b)}(x)$ 在 $x=b$ 的附近存在明显的波动，而且，波动范围的大小完全依赖于参数 a 的变化。对于大尺度 $a(a > 1)$ ， $\phi_{(a,b)}(x)$ 变成展宽的小波为低频函数，这时的波动范围比原来的小波函数 $\varphi(x)$ 的范围要大一些，小波的波形变矮、变宽，而且当 a 变得越

来越大,小波波形变得越来越宽、越来越矮,整个函数的形状表现出来的变化越来越缓慢;对于小尺度 $a(0 < a < 1)$, $\phi_{(a,b)}(x)$ 变成缩小的小波为高频函数, $\phi_{(a,b)}(x)$ 在 $x = b$ 的附近存在明显波动的范围比原来的小波母函数 $\phi(x)$ 的要小,小波的波形变得尖锐而狭窄,当 a 越来越小时,小波的波形渐渐的接近于脉冲函数,整个函数的形状表现出来的变化越来越快,颇有瞬息万变之态。小波函数 $\phi_{(a,b)}(x)$ 随参数对 (a,b) 中参数 a 的这种变化规律,决定了小波变化能够对函数和信号进行任意点处的任意精细结构的分析。在 a 一定时,随着 b 的变化, $\phi_{(a,b)}(x)$ 在时间轴上的位置发生变化。这样,通过 a 和 b 这两个参数的变化,可以获得许多小波,即可以获得一族小波函数。小波分析的基本思想就是以此一族小波函数去表示时间序列并刻画其特性。

实际应用中为便于使用计算机,进行二进制离散化处理,即选择 $a_0 = 2, b_0 = 1$, 则二进制离散小波为

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{\frac{m}{2}} \psi(2^{-m}t - n) \quad m, n \in Z \quad (7)$$

信号 $f(t)$ 的离散小波变换为

$$Wf(m, n) = \int_R f(t) \overline{\psi_{m,n}(t)} dt \quad (8)$$

3 识别实现

由于水轮发电机组振动的复杂性,尤其是水力荷载的随机性,整个测试过程中荷载的突变点可能不止一个。如前所述,我们所需要的突变点虽不一定是机组完全停止转动的时间点,但经过该次突变后,引起结构振动的最主要的荷载已经消失,其后结构可以看作是在作单纯自由振动。从信号来看,在此突变点之后再也不存在其它明显突变点。考虑到水电站厂房结构的振动是由水轮发电机组引起^[3],所以分析机组的振动信号更利于找到荷载的突变点,因此选取 1 号机上机架水平顺河向测点分析。

荷载产生突变时,所引起的振动信号也必然产生奇异性。通常情况下信号的奇异性分为两种情况:一种是信号的某一时刻起,幅值发生突变,引起不连续信号的突变处是第一种类型的间断点;另一种是信号的外观上光滑,但是在信号的一阶微分上有突变产生,且导数是不连续的。用小波分析时,两种不同奇异性情况下所应采取的小波函数也不同。

分析荷载突变所引起的振动信号突变的间断点类

型,根据动力学原理 $t \leq t_0$ 时,结构在荷载 P 作用下作频率与外力相同的振动;当 $t > t_0$ 时结构开始作具有初始速度和振幅的自由振动,以单自由度体系为例,当 P 为简谐荷载时, t_0 的结构运动方程为

$$y = \begin{cases} -\frac{P}{m} \left(\frac{2\xi\omega\theta}{(\omega^2 - \theta^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\theta^2} \cos\theta t + \frac{\omega^2 - \theta^2}{(\omega^2 - \theta^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\theta^2} \sin\theta t \right), & t \leq t_0 \\ Ae^{-\xi\omega t} \sin(\omega_c t + \alpha), & t \geq t_0 \end{cases} \quad (9)$$

由此可知振动位移信号在 t_0 时刻属于第一种类型间断点。在检测该种类型的间断点时,采用支撑区短的小波常比支撑区长的小波更有效,这样有利于对信号进行细致分析,因此应用 matlab 软件分析 db3 小波。信号的突变主要反映于信号的高频,因此观察信号的突变主要是看分解后的高频信号,当只进行一层分解时即可从信号的高频 d1 部分看出所要求得的间断点大致位于第 410 至 450 数据点之间。

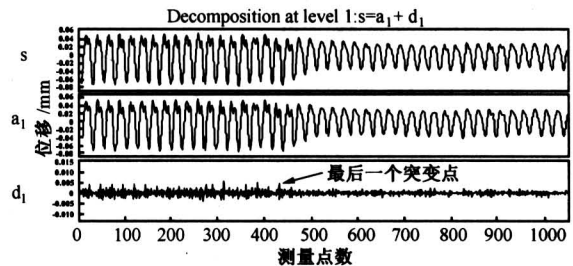


图 1 一号机上机架横河向停机过程信号小波分析
Fig.1 Wavelet analysis on the signal of 1st unit up mounting rackcross river vibration during machine halting process

将分解后的高频部分 d1 作局部放大(图 2),可以发现信号突变位于所截取的第 433 个数据点处,小波分析所截取原信号是从停机测试的第 394.988 2 秒到 415.987 5 秒的 1 050 个数据,所以突变的时间为 403.6 s。

再将机组结构的信号与结构测试信号进行对应,利用机组与结构采集系统之间的公用通道可以找出结构采集箱与机组振动采集的时间差 9.6 s,进而找到结构振动信号对应的突变点。

取此突变时间段附近的一小段数据进行小波分解,所取时间段为第 405.001 8 秒到 425.008 8 秒的数据,利用 db2 小波进行 5 层分解,参考有限元计

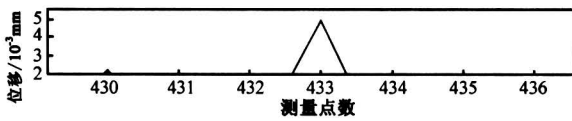


图2 一号机上机架水平顺河向停机过程信号突变

Fig.2 Sharp transition on the signal of 1st unit up mounting rackdown river vibration during machine halting process

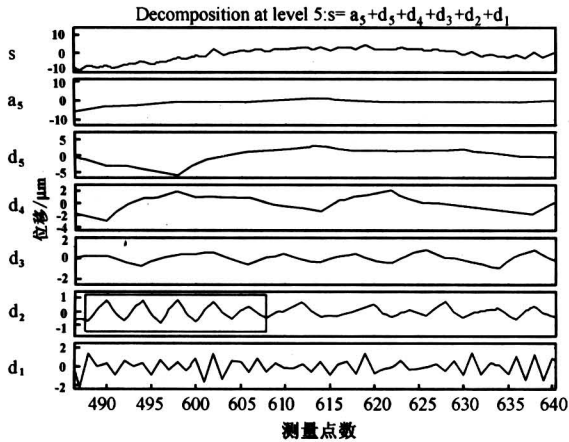


图3 1号机定子基础顺河向停机过程小波分析

Fig.3 Wavelet analysis on the signal of 1st unit stator basedownriver vibration during machine halting process

算结果，结构振动基频位于 d2 部分所反映的频率范围内，因此取 d2 部分的 485 ~ 510 数据点之间的

数据进行观测分析（见图 3），可以求出结构的首阶振动频率为 12.5 Hz，阻尼比为 0.037，此厂房支承结构频率与文献[4]中整体有限元模型计算的基频 12.67 Hz 比较接近，证明该方法识别结果可靠。

4 结论

在详细分析水电站正常停机过程中机械—结构耦联体系荷载及其振动变化的基础上，提出了一种利用停机过程识别厂房支承结构自振频率与阻尼比的新方法。即合理选取测点，充分发挥小波分析的优势，首先利用对机械振动信号的分解，观察高频变化确定荷载变化时间点，然后将对应的结构振动信号进行分解，于所需频段找出结构自由振动过程，从而根据动力学原理求得结构动力特性。与其它大型结构的动力特性的识别方法相比，该方法具有明显的简单易行的优点。

参考文献

- [1] 天津大学水利水电工程系. 李家峡真机试验报告[R]. 2004
- [2] 冉启文, 谭立英. 小波分析与分数傅立叶变换及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [3] 董毓新. 水轮发电机组振动[M]. 大连理工大学出版社, 1989
- [4] 练继建, 秦亮. 双排机水电站厂房结构动力特性研究[J]. 水力发电学报, 2004, (2)

The Method to Identify Dynamic Characteristics of Hydro Plant's Supporting Structure Using Machine Halting Process

Lian Jijian, Tian Huijing, Qin Liang, Zhang Yongji

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract] During running process, the effect of dynamic loads is quite complex. So determining dynamic characteristics of supporting structure are of great importance when making hydro plant's dynamic analysis. However, conventional testing measures often cause intensive destruction or are too complicated to implement. In order to solving above problems, this paper, basing on principle of dynamics, applies the test data to analyze the structure vibration and variability of loads during machine halting process, and further puts forward a new method to identify dynamic characteristics of hydro plant's supporting structure using machine halting process. The test data comes from prototype observation in Liji Xia's power house structure of two-row placed units. The method, combining unit test and structure test result, and fully using advantage of wavelet analysis, successfully overcomes poor factor like long variation time of loads, vibration fluctuation, etc., when analyzing halting problem.

[Key words] supporting structure of power house; machine halting process; dynamic characteristics; wavelet analysis