

谱分析在 GPS 自动化监测系统中的应用研究

李英冰¹ 徐绍铨¹ 张永军¹ 张小红¹

(1 武汉大学测绘科学与技术学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 利用快速 Fourier 变换, 将形变监测资料和库水位、温度等数据从时域转到频域内进行分析, 研究库水位、温度变化速度与大坝变形速度的关系, 及时反映大坝变形规律和变形原因, 并研制了相应的软件。

关键词: 谱分析; GPS 自动化监测; 快速 Fourier 变换

中图法分类号: P228.4; TV698.1

“隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统”利用卫星定位技术、数字通讯和计算机网络技术、自动控制技术、精密工程测量技术及现代数据处理技术等高新技术的集成, 成功地将 GPS 定位技术用于大坝外部变形的长期连续实时监测。该系统的网络结构图参见文献[1]的图 1。该系统在采用一定措施后, 在边长数百 m 至 1~2km 的短基线进行 GPS 定位可以获得亚 mm 级的定位精度^[2]。然而, 在该数据的处理中, 有时部分成果不十分理想, 文献[3]提出综合采用滤波、整体平差的数据处理办法, 使大坝形变监测精度得到了很大提高。

变形监测数据处理和分析常常在时域内, 常用的方法有有限元法、时序分析法、灰色理论等。而对于变形的物理解释, 探讨变形的成因, 给出变形值与荷载(引起变形的有关因素)之间的函数关系, 谱分析方法是一个有效的手段。根据 Fourier 变换, 时域内的信号可以转到频域内进行分析, 在时域内看不清的, 可以在频域内很容易地看清楚^[4]。谱分析在信号处理、图像处理等方面有着广泛的应用, 但在形变数据处理中的应用还不是很多。文献[5]利用谱分析等方法研究了隔河岩 GPS 监测系统基准的形变规律, 文献[4]利用谱分析方法对某大坝连续 5 年, 每月一个数据, 共 60 个数据进行处理与研究。

隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统已连续运行两年多(汛期每 2h 一次, 平时每 6h 一次测定变形量), 有大量的观测资料, 但至今仍未

进行较完整的频谱分析。本文结合此生产实际, 应用频谱分析理论和方法, 做进一步的研究, 并研制了相应的软件。

1 谱分析理论与软件的研制

1.1 Fourier 变换

通过 Fourier 变换, 可以将时域中的资料转换到频域中来, 其变换公式为:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

$$F(\omega) = a(\omega) - i b(\omega) = |F(\omega)| e^{\Phi(\omega)} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} |F(\omega)| &= [a^2(\omega) + b^2(\omega)]^{\frac{1}{2}} \\ \Phi(\omega) &= \tan^{-1}[-b(\omega)/a(\omega)] + 2n\pi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} a(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t dt \\ b(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t dt \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$F(\omega)$ 是 $f(t)$ 中具有频率 ω 的分量的平均值。因为 $F(\omega)$ 指的是单位频率区间, 故称其为谱密度, 而 $|F(\omega)|$ 则为振幅密度。

1.2 谱分析中的几个重要函数

1.2.1 功率谱

在一般意义上, 功率与幅度的平方成正比, 相应的谱称为功率谱。在时间域中, 任何函数 $f(t)$ 的平均功率谱由下式定义:

$$S(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \quad (5)$$

1.2.2 相干性

通过功率谱和互功率谱, 相干性定义如下。对于 $S_{11}(\omega)S_{22}(\omega) > 0$, 有:

$$|r_{12}(\omega)| = \frac{|S_{12}(\omega)|}{\sqrt{[S_{11}(\omega)S_{22}(\omega)]^{1/2}}} = \sqrt{\frac{P_{12}^2(\omega) + Q_{12}^2(\omega)}{P_{11}(\omega)P_{22}(\omega)}} \quad (6)$$

对于 $S_{11}(\omega)S_{22}(\omega) = 0$, 有 $|r_{12}(\omega)| = 0$ 。由定义可知, $0 \leq |r_{12}(\omega)| \leq 1$ 。

1.2.3 频响函数

频响函数定义为系统脉冲响应函数的 Fourier 变换, 即

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-i2\pi\omega\tau} d\tau \quad (7)$$

1.3 计算程序的设计与实现

为了便于结果分析, 笔者在 Visual C⁺⁺ 6.0 环境下编了一个相应的程序 DSA 1.0 (大坝变形动态监测谱分析软件, dam deformation spectrum analysis system, version 1.0), 主要完成了可靠性分析、平滑和内插、自谱估计、互谱估计、功率谱、相干分析等模块。本软件可运行于 Windows NT 和 Windows 95 环境。程序主要流程图如图 1 所示。

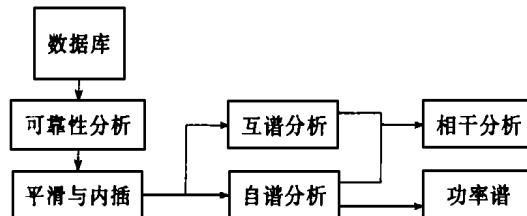


图 1 程序主要流程图

Fig. 1 Main Flow Chart of DSA1.0

2 隔河岩大坝外观 GPS 自动化监测系统资料的谱分析

2.1 资料说明

本次分析资料取自隔河岩大坝外观 GPS 自动化监测系统的数据库, 位移资料是 GPS 6 垂直于坝轴线方向, 因为 GPS 6 位于大坝拱冠上, 变形最大。时间是从 1998-06-10 到 1999-10-23, 共 491d; 库水位资料是从 1998-06-10 到 1999-10-23, 共 491d; 温度资料是从 1998-06-10 到 1999-05-18, 共 343d。

2.2 资料的预处理

在提取的资料中, 位移资料有 1h、2h、6h 的

监测资料。为了便于分析, 在处理资料时, 一律归算成为 1 天 4 个资料, 即每 6h 一个值。有一部分资料缺少, 利用三次样条插值补全。水位资料大部分是 1 天 48 个观测值, 但也有 1 天 1 个观测值, 采用三次样条插值补全。温度一般是 1 天 4 个观测数据, 有时是 1 天 1 个观测值。对于 1 天 1 个观测值, 由于每天温度变化比较大, 所以无法进行插值, 故本天中的其它 3 个值等同于该值, 这样也归算成为 1 天 4 个资料。经平滑内插后, 位移和水位各有 1 964 个数据、温度有 1 372 个数据参与频谱分析。然后分别对位移和库水位、位移和温度进行自谱和互谱分析, 对位移速度和库水位速度、位移速度和温度变化速度进行自谱和互谱分析。

2.3 观测序列的平稳化

进行频谱分析时要求信号是平稳的。一个时间序列, 如果均值没有系统的变化(无趋势)、方差没有系统的变化, 就称之为平稳的^[6], 故必须消除已知时间序列的趋势项。本文采用差分方法, 一般的时间序列, 一阶差分通常就足够获得明显的平稳性^[6]。其差分公式为:

$$y_t = x_{t+1} - x_t = \nabla x_{t+1} \quad (8)$$

式中, $\{y_1, \dots, y_{N-1}\}$ 为新序列; $\{x_1, \dots, x_N\}$ 为原序列。

2.4 观测资料的时序图和功率谱分析

图 2 是 GPS 6X 方向位移波形图, 图 3 是库水位波形图, 图 4 是温度变化波形图。图 5 到图 7 分别是位移功率谱曲线、库水位功率谱曲线、温度功率谱曲线。位移在 1.032Hz(由 $T = 1/f$ 得周期为 0.97d, 下同) 处功率谱达到最大值 0.298(以上值是实际计算结果, 因数据量太多, 为节省篇幅, 此处只给出图形, 数据列表省略, 下同)。这说明大坝位移的信号能量主要集中在 1Hz 附近。水位在 1.096Hz ($T = 0.97d$) 时功率谱达到最大值 0.085, 由图 6 可以看出, 水位的功率谱除了在 1Hz 附近达到最大值, 在低频处也有较大的峰值, 并且在 0.26Hz 处达到次大值 0.083。说明水位能量的积累主要集中在 1Hz 附近和低频部分。温度在 1.024 Hz ($T = 0.98d$) 时, 功率谱达到最大值 0.771。

由此可以知道, 三者的主频都在 1Hz 附近, 即三者具有明显的日周期变化规律, 并可以认为库水位和温度的日周期变化是引起位移日周期变化的重要因素。

2.5 频响函数

图 8 和图 9 分别是位移、水位频响函数和位移、温度频响函数的曲线表示。在位移主频

1.032Hz处, 频响函数值分别为6.837、0.360, 而1.032Hz处库水位自功率谱和温度自功率谱分别为0.056、0.625。根据线性输入输出关系 $Y(\omega) = H(\omega)X(\omega)$, 库水位对位移的影响是 $6.837 \times 0.056 = 0.383$, 温度对位移的影响为 $0.360 \times 0.625 = 0.225$ 。若只考虑水位和温度对位移的影响, 则水位影响因子为63%, 温度影响因子为37%。从图8和图9可以看出, 频响函数在1.884Hz($T=0.53$)处同时达到最大值107.84、

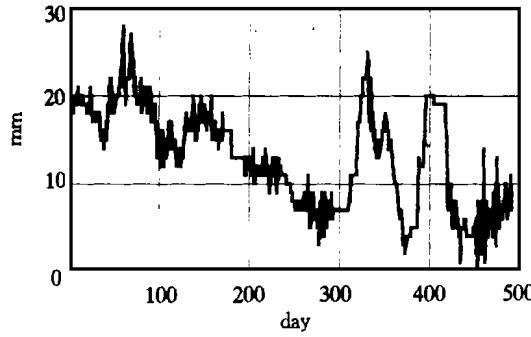


图2 GPS 6X 方向位移波形图

Fig. 2 Deformation Wave of GPS 6X

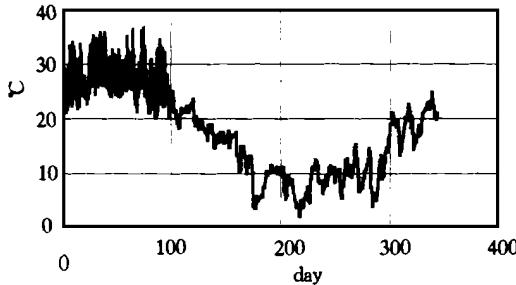


图4 温度变化波形图

Fig. 4 Temperature Wave

13.14. 说明如果把大坝作为一个线性系统, 库水位和温度作为输入, 大坝位移作为输出, 则库水位和温度都在频率1.884Hz处对系统的影响量最大。

2.6 速度的功率谱

设待分析的序列为 $f(n)$, 则

$$V(n) = \frac{\Delta f(n)}{\Delta t} \quad (9)$$

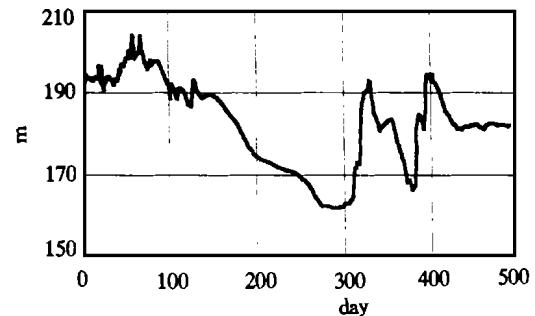


图3 大坝上游水位波形图

Fig. 3 Water Level Wave of Geheyuan Reservoir

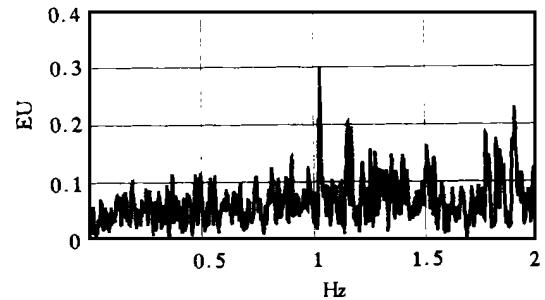


图5 位移功率谱曲线

Fig. 5 Power Spectrum of Deformation

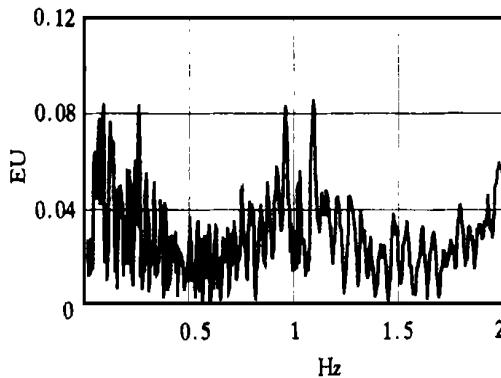


图6 水位功率谱曲线

Fig. 6 Power Spectrum of Water Level

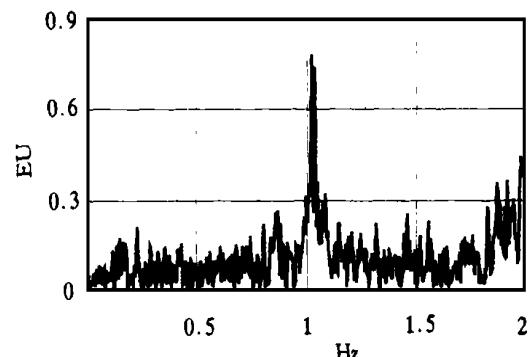


图7 温度功率谱曲线

Fig. 7 Power Spectrum of Temperature

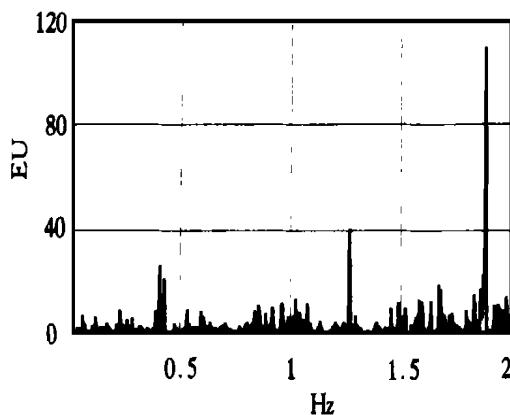


图 8 位移、水位频响函数曲线

Fig. 8 Delivering Function Curve of Deformation and Water Level

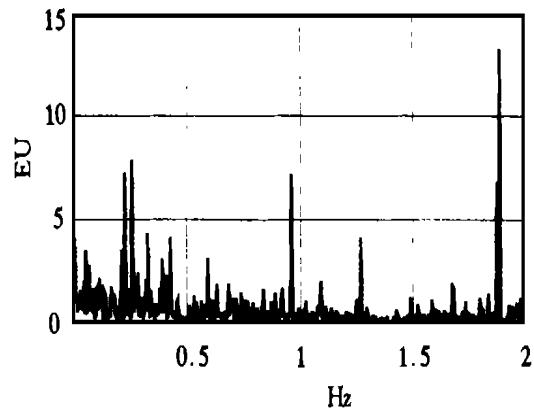


图 9 位移、温度频响函数曲线

Fig. 9 Delivering Function Curve of Deformation and Temperature

利用 DSA1.0 对库水位、温度和大坝形变值求出变化速度, 然后对速度序列进行频谱分析。图 10 到图 12 分别是位移、库水位、温度变化速度的功率谱曲线, 三者分别在 1.904Hz、1.096Hz 和 1.024Hz 处达到最大值 0.452、0.127 和 1.093。从图中可以看出三者有一定的相似性, 并且信号的能量主要集中在中频和高频部分, 说明位移速度在一定程度上受到库水位变化速度、温度变化速度的影响。

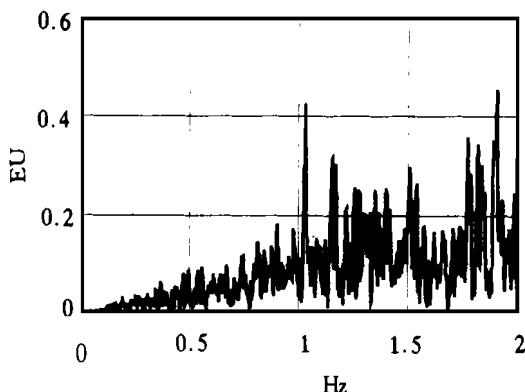


图 10 位移速度功率谱

Fig. 10 Power Spectrum of Deformation Velocity

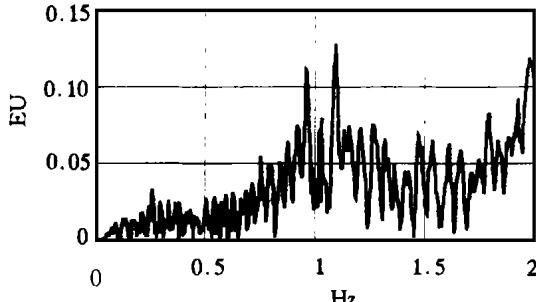


图 11 水位变化速度功率谱

Fig. 11 Power Spectrum of Velocity of Water Level

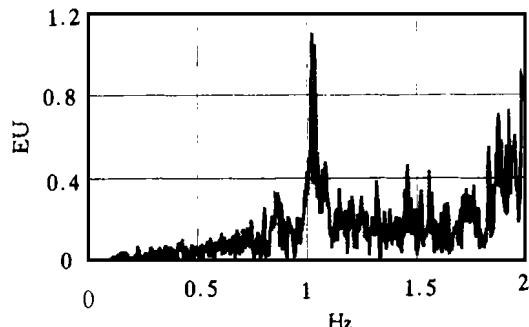


图 12 温度变化速度功率谱

Fig. 12 Power Spectrum of Temperatures Velocity

3 讨论与结论

3.1 讨论

1) 由位移、库水位和温度的功率谱以及它们之间的频响函数曲线, 可以认为库水位和温度的日周期变化是引起位移日周期变化的重要因素。如果把大坝作为一个线性系统, 库水位和温度都在频率 1.884Hz 处对系统的影响量最大, 这说明大坝的变形在很大程度上受到当天或者半天以前库水位变化和温度变化的影响。这可以从位移和库水位、位移和温度之间的相关性加以验证。

图 13、图 14 分别为位移和库水位、位移和温度之间的相关性曲线, 横坐标为天数, 纵坐标为相关性系数, 它们都在 1d 时达到最大值 0.963 和 0.955。在 10 d 以内, 相关系数大于 0.9, 时间越长, 相关系数越小。而前者的相关性系数比后者大, 说明库水位与位移的相关性要比温度大。由此说明谱分析的结果是可靠的。

2) 在对温度数据的处理时, 有时 1d 只有一个数据, 由于每天温度变化很大, 故对于温度插值

无法采用三次样条进行插值, 本文简单地令其他三个值与该数据相等。图 15 采用极端情况, 将所有每天温度由一个值等插成为四个值, 这时, 主频不再集中在 1Hz 附近, 而在整个频域范围内都有分布, 并在 0.228Hz、0.804Hz、1.252Hz、1.828Hz 处同时达到最大值 0.214。这说明如果大量采用这种方法对温度进行插补, 对于分析结果会有较大的影响。

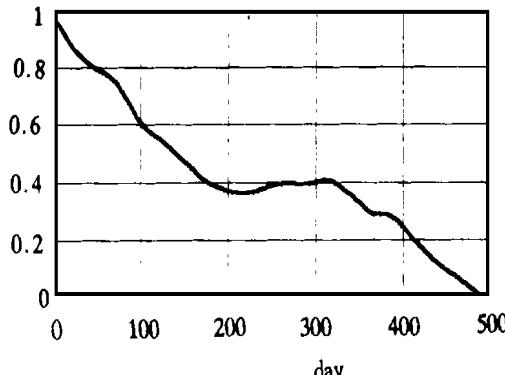


图 13 位移、库水位相关性曲线

Fig. 13 Cross Correction of Deformation and Water Level

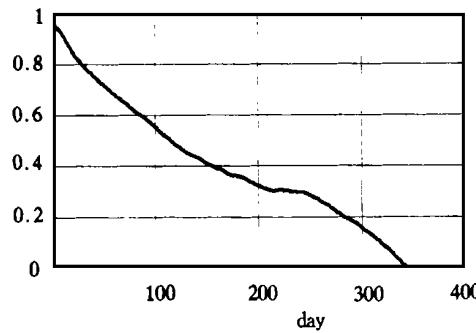


图 14 位移、温度相关性曲线

Fig. 14 Cross Correction of Deformation and Temperatures

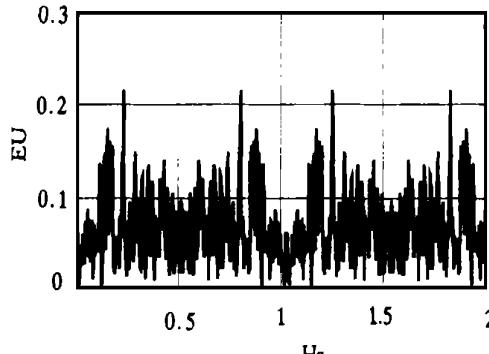


图 15 每天温度由一个值等插成为四个值的功率谱

Fig. 15 Power Spectrum of Temperatures of One Value for Each Day

而对于位移、库水位的变化具有连续性、光滑性, 采用三次样条插值可以得到稳定性好、收敛性有保证、插值函数光滑的结果^[7]。

3.2 结论

1) 位移、库水位、温度的功率谱主频都在 1Hz 附近, 具有明显的日周期变化规律, 并可以认为库水位和温度的日周期变化是引起位移日周期变化的重要因素。

2) 水位、温度的变化速度对大坝变形速度的影响主要集中在中频和高频部分, 即水位和温度的加速变化都会在一定程度上加快位移的变化。因此, 在洪水季节、泄洪时期以及温度剧烈变化时尤其要注意对大坝位移的监控。

本文只考虑了库水位、温度对大坝位移影响, 要想全面理解大坝变形的机理和变形原因, 应当结合大坝的物理机制、地质条件、大坝内部变形以及其它外部综合因素的系统性影响。

频谱分析对于大坝变形的物理解释十分有用。本文采用的数据偏少, 如果采用几年或数十年的监测数据进行分析, 会得到更加有用的信息。

致谢: 本文在修改过程中得到香港理工大学郑大伟教授的热心指导, 在此深表谢意!

参 考 文 献

- 柳太康, 徐绍铨. GPS 技术在隔河岩大坝外观变形监测中的应用. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(增刊): 5~8
- 李征航, 刘志赵, 王泽民. 利用 GPS 定位技术进行大坝变形观测的研究. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(6): 26~29
- 李征航, 吴云孙, 李振洪, 等. 隔河岩大坝外观变形数据的处理和分析. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(6): 482~484
- 邓跃进, 张正禄. 大坝变形的频谱分析方法. 测绘信息与工程, 1997(3): 7~10
- 黄声享, 刘经南. GPS 监测系统基准形变分析与动态随机模拟. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(6): 485~490
- C 查特菲尔德. 时间序列分析引论. 骆振华译. 厦门: 厦门大学出版社, 1987
- 易大义, 沈云宝, 李有法. 计算方法. 杭州: 浙江大学出版社, 1997
- 李英冰. 谱方法在大坝形变监测中的应用研究: [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 2000
- 陈永彬. 数字信号处理. 南京: 南京工学院出版社, 1987
- 陈永奇, 吴子安, 吴中如. 形变监测分析与预报. 北京: 测绘出版社, 1998. 54~68
- 尹晖. 顾及空间和时间关联信息的动态变形模型及预报方法: [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1997. 2~7

作者简介: 李英冰, 助教, 博士生。现主要从事 GPS 数据处理与分析, 多媒体和 CAI 软件的研究与开发等工作。代表成果有 GPS

多媒体教学 CAI 软件。

E-mail: lyb_wtusm@263.net

The Application of Spectrum Analysis in GPS Auto-monitoring System

LI Yingbing¹ XU Shaoquan¹ ZHANG Yongjun¹ ZHANG Xiaohong¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: Deformation monitoring system is the safeguard of dam. Space estate and time characteristic of dam are attained by deformation monitoring, which is used to investigate the stability, discover the problems, take some measures, study deformation mechanism, validate designing theory as well as set up proper prediction model and methods of the dam. The real-time effective data processing and analysis are important in dam deformation monitoring. Dynamic deformation is taken as placidity random course. Dam deformation as well as water level change of reservoir and temperature variation is taken as linear system in this paper. Fast Fourier Transform transfers those signals from time domain to frequency domain.

The deformation data, including water level of reservoir, are taken from the database of Geheyuan GPS auto-monitoring system from June 10, 1998 to October 23, 1999, in total 491 days. Temperature data only about 343 days which are between June 10, 1998 and May 18, 1999. Those data are prepared as 4 data each day by tri-spline function. A difference filter is used to remove long-term trend. The Power spectrum of dam deformation, water level and temperature are shown in Fig. 5, Fig. 6 and Fig. 7. From the figures we know their main frequency are near 1 Hz (about 1 day). Day change of water level of reservoir and temperature is one of main reasons of day deformation of dam. Delivering function curve of deformation and water level is shown in Fig. 8. Delivering function curve of deformation and temperature is shown in Fig. 9. The signals energies both reach max value at 1.884 Hz. Power spectrum of velocity of dam deformation, water level of reservoir and temperature are shown in Fig. 10, Fig. 11 and Fig. 12.

A discussion is carried out at the end of this paper. In order to verify the performance of the result derived from spectrum analysis, cross correlation between deformation and water level as well as temperature is studied, and the result is presented in Fig. 13 and Fig. 14. However, there is only one temperature data available, but four temperature data are required for analysis. From the discussion we knew that it is a big problem in such a condition. At last two conclusions are drawn: 1) Day change of water level of reservoir and temperature is one of main reason of day deformation of dam. If there were only two reasons, the effect of water level is about 63% and temperature is about 37%. 2) Power spectrum of velocity of dam deformation, water level of reservoir and temperature shown very similar and their energy is mostly in high frequency. The velocity of water level of reservoir and temperature is one of the reasons of velocity of dam deformation. But there are still some further work to do in future. Long-term data and more data for each day should be studied further if possible.

Key words: spectrum analysis; GPS auto-monitoring system; Fast Fourier Transform

About the author: LI Yingbing, assistant lecturer, Ph D candidate. His major researches are GPS data processing and analysis, multimedia and development of CAI. He is concerned with the application of GPS and the development of CAI.

E-mail: lyb_wtusm@263.net