

环境激励下泵站出水塔结构模态参数辨识研究

徐存东, 刘辉, 王亚楠, 聂俊坤, 王荣荣, 史国坤

(华北水利水电大学水利学院 资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 郑州 450045)

摘要: 高扬程提水泵站的出水塔结构在水流的激励作用下易出现剧烈振动甚至由此造成破坏, 为研究其振动特性需对其结构模态参数进行准确辨识。以甘肃景电二期工程总干六泵站的出水塔为例, 在工作荷载激励下对其振动信号进行现场采集, 根据实测的结构振动时程, 利用随机子空间法和特征系统实现算法分别对出水塔结构的模态参数进行时域辨识, 并将其辨识结果与 ANSYS 三维有限元模拟结果进行对比验证。结果表明: 随机子空间法和特征系统实现算法均能准确辨识出水塔结构模态参数, 其模拟结果与实验结果吻合较好。研究成果可为泵站出水塔结构的更新改造设计和安全运行监测提供理论依据, 同时能够为灌区水工结构的模态参数辨识提供技术参考。

关键词: 出水塔结构; 环境激励; 时域辨识; 有限元模拟

中图分类号: TV 675; TV 32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0699-05

Identification of modal parameters of water-outlet tower of pumping station under operational excitation conditions

XU Cundong, LIU Hui, WANG Yanan, NIE Junkun, WANG Rongrong, SHI Guokun

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power/Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Protection Engineering, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: The water outlet tower of high lift pumping station can vibrate seriously and even fail under the excitation of flow. In order to study the vibration characteristics of water outlet tower, accurate identification of its modal parameters is necessary. In this paper, the vibration signals of a water outlet tower under the operational excitation conditions were collected in the No. 6 pumping station of Jingdian phase II project in Gansu Province. According to the measured vibration data, the modal parameters of the water outlet tower were identified using two time domain identification methods, including the stochastic subspace identification and eigen system realization algorithm. The identification results were compared with the simulated results determined by ANSYS finite element method. The results showed that both methods can identify the modal parameters of the water outlet tower accurately and the identification results are in good agreement with the simulation results obtained from ANSYS finite element method. The research can not only provide the theoretical basis for the renewal design and safe operation monitoring of the water outlet tower, but also offer the technical references for the identification of modal parameters of the hydraulic structures in the irrigation district.

Key words: water outlet tower; operational excitation; time domain identification; finite element simulation

泵站出水塔是一种连接泵站压力管道和下游输水渡槽和渠道的塔式出水结构, 由于其结构简单、施工方便、使用寿命长而在提水泵站工程中应用广泛, 但是在运行过程中由于长期受到水流冲击、风荷载和地震作用的影响, 泵站出水塔

会出现明显的结构振动问题, 且由此而产生的损伤累积为结构的安全稳定运行埋下了巨大的隐患。

工作模态参数的准确辨识是进行结构无损检测的重要前提, 截止目前, 针对结构模态参数的动态辨识, 众多国内外

收稿日期: 2014-12-26 修回日期: 2015-04-29 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.2016.016.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279064; 31360204); 河南省教育厅科技创新人才支持计划(14HASTIT047); 河南省高校科技创新团队支持计划(14IRTSTHN028); 华北水利水电大学2014年大学生创新计划项目(HSCX2004063; HSCX2004064)

作者简介: 徐存东(1972)男, 甘肃景泰人, 教授, 博士, 主要从事水工结构优化设计和耐久性研究。E-mail: xcundong@126.com

通讯作者: 刘辉(1989)男, 河南郑州人, 主要从事水工结构方面的研究。E-mail: liuhui142531@163.com

学者已开展了大量研究^[1-3]。模态辨识的传统方法主要是以实验室条件下的频率响应函数为基础进行的^[4-5],要求能够同时获得结构上的激励及响应信号,而随着计算机技术的飞速发展及其处理能力的不断更新,神经网络、小波分析、遗传算法及有限元法等^[6-9]许多现代方法得以实现和完善,结构的振动模态辨识方法实现了由传统的频域法到以时域法为主的人工智能方法的过渡,激励方式亦由简单的脉冲方式过渡到复杂的环境随机激励^[10-11],研究对象所处的背景环境也摆脱了强耦合、强干扰、多特征随机噪声的限制^[12]。

随机子空间法(Stochastic Subspace Identification, 简称 SSI)和特征系统实现方法(Eigensystem Realization Algorithm, 简称 ERA)是当前利用环境激励进行结构模态参数辨识方法中最为准确的两种,本文以甘肃景电二期工程总干六泵站的出水塔结构为研究对象,对其进行模态参数辨识,并用有限元模拟结果进行对比验证。

1 算理论

1.1 随机子空间法(SSI)

随机子空间法^[13]是一种模态参数辨识的线性系统时域算法,该方法以状态空间模型为基础,避开传统的人工识别与迭代过程,而仅利用了结构输出反应,且直接作用于时域数据,时域数据被转换成相关函数或谱,从而避免了协方差矩阵的计算过程;另外,该算法充分利用了矩阵的 QR 分解,奇异值分解(SVD)及最小二乘方法等比较有效的数学处理方法,使得该方法理论非常完善,可以有效地进行环境振动激励下模态参数辨识。

结构振动检测过程中,假设数据长度为 j 的测点有 m 个,各测点的响应数据可以组成含有 $2i$ 块的行和 j 列的 $Hankel_{2mi \times j}$ 矩阵,且每块均有 m 行。依据统计序列原理可知,当 j/i 足够大时,则可认为 $j \rightarrow \infty$ 。将 $Hankel_{2mi \times j}$ 矩阵的行空间划分为“过去(past)”行空间与“将来(future)”行空间,即

$$Y_{0i2i-1} = \frac{1}{\sqrt{j}} \begin{pmatrix} y_0 & y_1 & y_2 & \cdots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_j \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{i-1} & y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-2} \\ y_i & y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & y_{i+3} & \cdots & y_{i+j} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{j}} \begin{bmatrix} Y_{0i-1} \\ Y_{0i2i-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: y_i 为第 i 时刻全部测点响应; Y_p 、 Y_f 为“过去”行空间、“将来”行空间; y_{0j-1} 为 $Hankel_{2mi \times j}$ 矩阵里第一行下标开始时刻为 0 与结束时刻为 $i-1$ 的所有测点组成的 $Hankel_{2mi-1}$ 矩阵块。

采用 QR 分解法对 $Hankel_{2mi \times j}$ 矩阵进行缩减处理:

$$Y_{0i2i-1} = RQ^T = \begin{pmatrix} R_{11} & 0 & 0 \\ R_{21} & R_{22} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \\ Q_3^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{11} & 0 \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: R 为下三角矩阵, $\in R^{2mi \times j}$; Q 为正交矩阵, $\in R^{i \times j}$; R_{11} 、

R_{21} 、 $R_{22} \in R^{mi \times mi}$; Q_1^T 、 $Q_2^T \in R^{mi \times j}$; $Q_3^T \in R^{(j-2mi) \times j}$ 。

依据投影理论, Y_f 在 Y_p 上的正交投影矩阵为

$$O_i = \begin{bmatrix} Y_f \\ Y_p \end{bmatrix} = Y_f Y_p^T (Y_p Y_p^T)^+ Y_p \in R^{mi \times j} \quad (3)$$

式中: $(Y_p Y_p^T)^+$ 为矩阵的 Moore Penrose 伪逆。

依据随机子空间辨识理论,将 O_i 进行分解:

$$O_i = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \cdots \\ CA^{i-1} \end{pmatrix} (\hat{x}_i \quad \hat{x}_{i+1} \quad \cdots \quad \hat{x}_{i+j-1}) = \Gamma_i X_i \quad (4)$$

式中: Γ_i 为可观矩阵; X_i 为卡尔曼滤波状态向量。

对 O_i 进行 SVD:

$$O_i = USV^T = (U_1 \quad U_2) \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix}_i = U_1 S_2 V_1^T \quad (5)$$

式中: $U_1 \in R^{mi \times n}$, $S_1 \in R^{n \times n}$, $S_2 = 0$, $V_1^T \in R^{n \times j}$ 。

若系统可观且可控,则 S_1 的秩即投影矩阵的秩相等。由式(4)和式(5)可得

$$\Gamma_i = U_1 S_1^2 \quad X_i = \Gamma_i^+ O_i \quad (6)$$

同理,可得下一时刻的卡尔曼滤波状态向量如下:

$$X_{i+1} = \Gamma_{i+1}^+ O_{i+1} \quad (7)$$

此时的状态空间方程为

$$\begin{pmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ C \end{pmatrix} X_i + \begin{pmatrix} W_i \\ V_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中: Y_{ii} 为只有一个块行的 $Hankel$ 矩阵, $\in R^{m \times j}$; W_i 、 V_i 为残差。

利用最小二乘法对式(8)进行求解,得系统矩阵 A 和输出矩阵 C :

$$\begin{pmatrix} A \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \end{pmatrix} X_i^+ \quad (9)$$

将矩阵 A 进行特征值分解,同时结合矩阵 C 则可对结构的模态参数进行提取。

1.2 特征系统实现算法(ERA)

特征系统实现算法^[14]是以自由振动响应或实测脉冲响应数据为基础,采用 $Hankel$ 矩阵以及奇异值分解搜索系统最小实现,并将该最小实现转换为特征值的规范型。该算法可对结构自由衰减或脉冲激励下的模态参数进行辨识,仅需响应数据且具有所需数据短、辨识速度快及精度高等优点。

在线性离散空间内,结构振动的状态方程为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (10)$$

式中: k 为采样点序号; $x(k)$ 为系统状态向量; $u(k)$ 、 $y(k)$ 为输入、输出向量; A 、 B 、 C 为系统矩阵、控制矩阵、输出矩阵。

经典 $Hankel$ 矩阵如下:

$$H(k) = \begin{pmatrix} h(k) & h(k+1) & \cdots & h(k+s) \\ h(k+1) & h(k+2) & \vdots & h(k+s+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h(k+r) & h(k+r+1) & \cdots & h(k+r+s) \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: $h(k)$ 为 Markov 参数矩阵。

对 $H(0)$ 进行奇异值(SVD)分解:

$$H(0) = P \begin{pmatrix} D_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} Q^T \quad (12)$$

式中: $H(0)$ 为 $(r+1) \times (s+1)$ 维实矩阵; P 为 $(r+1) \times l$ 维正交矩阵; Q 为 $(s+1) \times l$ 维正交矩阵; D_r 为 $\text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_r)$, $r = \text{rank}[H(k)]$, ($r < 1$ 且 $d_i \neq 0, i = 1, 2, \dots, r$)。

P 、 Q 矩阵的前 r 列分别用 R_r 、 Q_r 表示, 则根据系统最小实现理论得出系统矩阵为

$$A = D_r^{-1/2} P_r^T H(1) Q_r D_r^{-1/2} \quad (13)$$

对 A 进行特征值分解:

$$\Phi^{-1} A \Phi = Z = \text{diag}(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n) \quad (14)$$

式中: Φ 为特征向量矩阵; Z 为特征值矩阵。

依据振动理论及状态方程的解可得

$$z_i = \exp(-\zeta_i \omega_i T \pm j \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2} T), (i = 1, 2, \dots, n \quad s_i = \frac{\ln(z_i)}{T}) \quad (15)$$

式中: ω_i 、 ζ_i 为结构的无阻尼角频率和阻尼比; T 为采样时间间隔。则

$$\omega_i = \sqrt{\text{Re}(s_i)^2 + [\text{Im}(s_i)]^2} \quad (16)$$

$$\zeta_i = \frac{\text{Re}(s_i)}{\omega_i} \quad (17)$$

2 工程实例

2.1 工程背景

甘肃省景泰川电力提灌工程(简称景电工程)是跨省区、高扬程、多梯级、大流量的大 δ 型提水灌溉工程。工程设计流量 $28.6 \text{ m}^3/\text{s}$, 加大流量 $33 \text{ m}^3/\text{s}$, 有泵站 43 座, 装机容量 25.97 万 kW ; 设计灌溉面积 6.51 万 hm^2 , 工程最早于 1974 年上水运行, 长时期的提水输水工作, 使得灌区内泵站出水塔结构振动异常, 严重影响出水塔的安全运行, 及时开展结构的振动模态参数辨识显得十分迫切。

以景电二期工程总干六泵站的出水塔为实例, 出水塔底部与地基直接接触, 图 1 为其实景图。出水塔总高度 18.79 m , 地面高程 1580.0 m , 为方便建模, 按高程将出水塔结构分为三部分, 其结构见图 2, 其中高程 $1580.0 \sim 1585.09 \text{ m}$ 为出水塔底层, 底板半径 5.4 m , 压力管道嵌筑其中, 以水平方向进入, 经垂直肘向通至上层, 管道半径 0.85 m ;



图 1 景电二期总干六泵站某出水塔

Fig. 1 The water-outlet tower in the No. 6 pumping station of Jingdian phase δ project

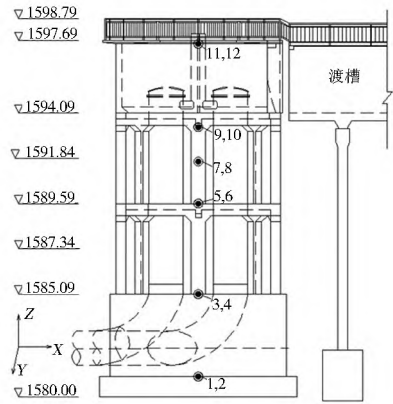


图 2 出水塔结构及测点布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the water outlet tower structure and layout of test points

$1585.09 \sim 1594.09 \text{ m}$ 为出水塔中层, 外部采用混凝土柱体结构支撑, 包裹四根压力管道, 并于结构中间部位浇筑两根混凝土柱体连接结构上下层, 以增强结构的整体性; $1594.09 \sim 1597.69 \text{ m}$ 为出水塔上层, 压力管道出口与大气直接连接, 上层圆筒混凝土结构外半径 5.0 m , 内径 4.7 m , 提水可直接盛放于顶部圆筒结构, 经渡槽输至用水地; $1597.69 \sim 1598.79 \text{ m}$ 为出水塔顶部围栏。

2.2 现场测试与模态辨识

实验使用的 DASP(Data Acquisition & Signal Processing) V10 振动测试系统(图 3)由信号采集和实时分析的软硬件构成, 运行于 Windows 95/98/Me/NT/2000/XP 平台, 集数据采集、显示、分析及信号处理等多种功能于一体, 构成功能强大的虚拟仪器库, 具有技术先进、自动化程度高、实用性强等诸多优点。该实验采用 89F-2 型速度传感器进行拾振, 该传感器低频特性较好, 尤其适合出水塔这类大型结构的动力测试。考虑到出水塔结构振动响应主要以 X 方向与 Y 方向为主, Z 方向振动相对较小, 因而振动响应测试以量测 X 方向与 Y 方向的振动为主。测试共布置 12 个测点(图 2), 其中单号为 X 向布置, 双号为 Y 向布置。

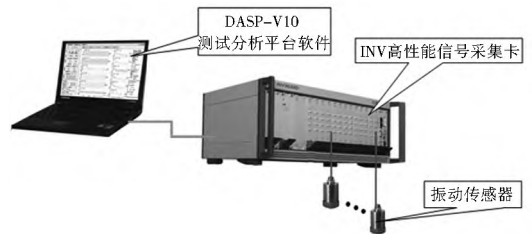


图 3 DASP 振动测试系统

Fig. 3 DASP vibration test system

此次对泵站出水塔结构的模态辨识主要集中在结构的前几阶振动, 即低频振动, 采集系统采用含抗混滤波器的 INV 多功能智能采集系统, 该系统具有采集方式多样化、数据存储便捷化、通道显示智能化等优点, 对低中频尤其是低频的大型结构采集效果较好。实验设置采样频率为 100 HZ , 采样点数 1024 , 选取测试工况为泵站正常运行状态, 即泵站按照设计流量 $Q = 17.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 、设计总扬程 $H = 44.28 \text{ m}$ 运行。

根据现场采集的振动信号, 利用 SSI 法和 ERA 法对结

构模态进行识别,针对信号现场采集过程中的噪声干扰,利用小波技术进行降噪处理,典型测点小波降噪后的振动时程见图 4; SSI 法与 ERA 法模态辨识结果及其对比见表 1。因辨识方法的不同,ERA 法仅辨识出结构的第 1、2、4、5、6 阶频率及阻尼比,两种辨识方法具有很好的相互对比性。从辨识结果可以看出,二者频率识别结果非常接近,其中基频辨识结果误差为 0.4%,随着阶数的增加频率辨识误差有所浮动,但最大不超过 3.0%;阻尼比辨识结果误差基本处于 1%~10%,SSI 法和 ERA 法辨识所得结构频率、阻尼比及其对比误差均满足工程精度要求。

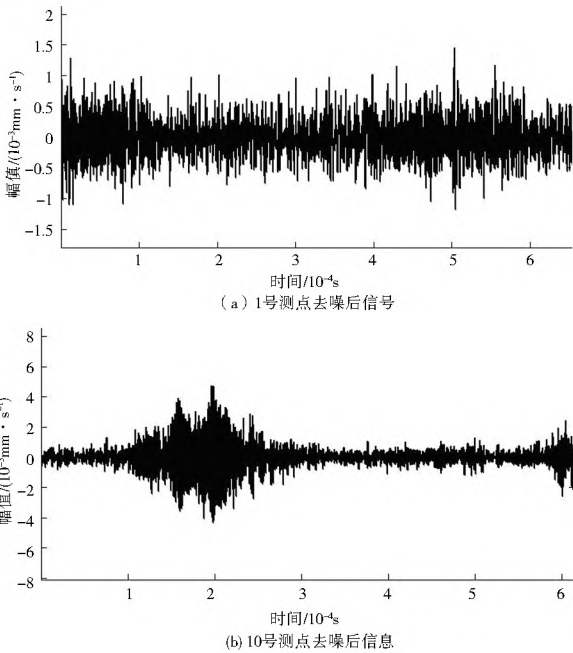


图 4 典型测点去噪后振动时程线

Fig. 4 Time history curves of typical test points after denoising

表 1 SSI 法与 ERA 法模态参数辨识结果对比

Tab. 1 Comparison of identification results from SSI and ERA methods

阶数	方法					
	SSI 法		ERA 法		辨识误差	
	频率 / Hz	阻尼比 (%)	频率 / Hz	阻尼比 (%)	频率 / Hz	阻尼比 (%)
1	9.98	2.92	10.02	2.88	0.40	1.37
2	20.04	3.01	19.64	3.11	2.00	3.32
3	22.43	5.07	/	/	/	/
4	27.96	4.73	28.79	4.36	2.97	7.82
5	40.67	6.18	41.68	5.58	2.48	9.71
6	59.56	7.02	60.67	6.25	1.86	10.97

注: $\frac{|f_{SSI} - f_{ERA}|}{f_{SSI}} \times 100\%$ 和 $\frac{|\zeta_{SSI} - \zeta_{ERA}|}{\zeta_{SSI}} \times 100\%$ 分别为频率误差和阻尼比误差。

2.3 有限元分析与结果验证

采用等效荷载及附加质量法对出水塔结构进行简化^[5];结构模态参数与工程工作年限具有一定的相关性,以景电二期工程总干六泵站出水塔结构的当前状态材料参数为基础,利用 ANSYS 有限元软件建立了泵站出水塔结构数值分析模型,并进行结构模态分析,获得结构的前六阶频率和阻尼比,将有限元分析结果分别与 SSI 法和 ERA 法辨识

结果进行对比验证,见表 2、表 3。

表 2 有限元计算结果与 SSI 法模态参数辨识结果对比

Tab. 2 Comparison of identification results from finite element calculation and SSI method

阶数	方法					
	有限元法		SSI 法		辨识误差	
	频率 / Hz	阻尼比 (%)	频率 / Hz	阻尼比 (%)	频率 / Hz	阻尼比 (%)
1	9.91	2.93	9.98	2.92	0.71	0.34
2	19.19	3.25	20.04	3.01	4.43	7.38
3	21.76	4.69	22.43	5.07	3.08	8.10
4	28.31	4.82	27.96	4.73	1.24	1.87
5	38.95	5.97	40.67	6.18	4.42	3.52
6	58.92	6.83	59.56	7.02	1.09	2.78

注: $\frac{|f_{有限元} - f_{SSI}|}{f_{有限元}} \times 100\%$ 和 $\frac{|\zeta_{有限元} - \zeta_{SSI}|}{\zeta_{有限元}} \times 100\%$ 分别为频率误差和阻尼比误差。

表 3 有限元计算结果与 ERA 法模态参数辨识结果对比

Tab. 3 Comparison of identification results from finite element calculation and ERA method

阶数	方法					
	有限元法		ERA 法		辨识误差	
	频率 / Hz	阻尼比 (%)	频率 / Hz	阻尼比 (%)	频率 / Hz	阻尼比 (%)
1	9.91	2.93	10.02	2.79	1.11	4.78
2	19.19	3.25	19.64	2.94	2.34	9.54
3	21.76	4.69	/	/	/	/
4	28.31	4.82	28.79	4.36	1.70	9.54
5	38.95	5.97	41.68	5.58	7.01	6.53
6	58.92	6.83	60.67	6.25	2.97	8.49

注: $\frac{|f_{有限元} - f_{ERA}|}{f_{有限元}} \times 100\%$ 和 $\frac{|\zeta_{有限元} - \zeta_{ERA}|}{\zeta_{有限元}} \times 100\%$ 分别为频率误差和阻尼比误差。

由表 2、表 3 可知,有限元模拟计算所得结构的频率及阻尼比与 SSI 法、ERA 法辨识结果基本一致,且均满足工程精度要求。SSI 法辨识结果与有限元计算结果比较,结构前六阶频率误差范围为 0.71%~4.43%,基频误差仅为 0.71%,结构前六阶阻尼比误差范围为 0.34%~8.10%;ERA 法辨识结果与有限元计算结果比较,结构前六阶频率误差范围为 1.11%~7.01%,基频误差为 1.11%,结构前六阶阻尼比误差范围为 4.78%~9.54%。分析表明,SSI 法和 ERA 法具有良好的模态参数辨识性能,均可用于大型泵站出水塔结构的模态参数辨识,而 SSI 法具有更高的辨识精度。

由三者辨识结果知,可将三者辨识结果的加权平均值 9.97 Hz,作为出水塔结构在运行期振动的基频,可为后期灌区泵站出水塔的更新改造及安全运行监测提供技术参考。

3 结语

(1) 以环境激励下的出水塔结构作为振动模态的监测对象,将正常荷载作用作为激励源,无需模拟激励的外部激励设备,操作方便,且不打断结构的正常运行,直接对工作状态下的结构进行模态参数辨识,更符合实际情况。

(2) 分别应用随机子空间法 (SSI) 和特征系统实现算法 (ERA) 对泵站的出水塔结构进行模态辨识, 二者辨识结果的吻合度较高; 另外, 将二者结果与有限元模拟结果进行比对分析, 相较而言, SSI 法辨具有更高的模态辨识精度。

(3) 景电二期工程总干六泵站出水塔结构的振动基频为 9.97 Hz, 为该结构进一步的动力分析提供理论基础, 同时为其更新改造的抗振设计提供合理依据。

(4) 该研究对出水塔结构的现场激振模态测试实验具有重要的指导作用, 但针对辨识参数的一致性检验方面的研究还有待深入。

参考文献 (References):

- [1] Y W Kwon, S D Plessas. Numerical modal analysis of composite structures coupled with water[J]. *Composite Structures*, 2014 (116): 325-335.
- [2] Salam Rahmatalla, Kyle Hudson, Ye Liu, et al. Finite element modal analysis and vibration waveforms in health inspection of old bridges[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2014 (78): 40-46.
- [3] 梁君, 赵登峰. 模态分析方法综述[J]. *现代制造工程*, 2006(8): 139-141. (LIANG Jun, ZHAO Deng feng. Summary of modal analysis method[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2006 (8): 139-141. (in Chinese))
- [4] 李华新. 环境激励下工程结构模态参数辨识研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. (LI Hua xin. Studies on engineering structural modal parameter identification under ambient excitation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese))
- [5] Sadegh Rahrovani, Majid Khorsand Vakilzadeh, Thomas Abrahamsson. Modal dominance analysis based on modal contribution to frequency response function τ -Norm [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 48, 218-231.
- [6] 童若飞. 空间结构模态识别与实测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (TONG Ruo fei. Study of modal parameters identification and measurement methods in space structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [7] 王超, 任伟新, 黄天立. 基于小波的非线性结构系统识别[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(3): 10-13. (WANG Chao, REN Wei xin, HUANG Tian li. System identification of a nonlinear structure based on wavelet transformation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(3): 10-13. (in Chinese))
- [8] F J Carrin, A Lozano, V M Castao. Condition monitoring of vibrating steel reinforced concrete beams through wavelet transforms[J]. *Structural Survey*, 2006, 24(2): 154-162.
- [9] 王学谦, 赵兰浩. 抽水蓄能电站地下厂房振因仿真分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(3): 76-81. (WANG Xue qian, ZHAO Lan hao. Simulation analysis of the vibration causes of underground powerhouse in pumped storage power station[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(3): 76-81. (in Chinese))
- [10] 郭涛, 张立翔, 姚激. 水轮机流道压力脉动诱发厂房振动分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2011, 31(6): 136-140. (GUO Tao, ZHANG Li xiang, YAO Ji. Vibration analysis of powerhouse induced by pulsation pressure of hydro turbine[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2011, 31(6): 136-140. (in Chinese))
- [11] 续秀忠, 华宏星, 陈兆能. 基于环境激励的模态参数辨识方法综述[J]. *振动与冲击*, 2002, 21(3): 2-5. (XU Xiuzhong, HUA Hongxing, CHEN Zhaoxing. Review of modal identification method based on ambient excitation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2002, 21(3): 2-5. (in Chinese))
- [12] 张建伟, 张翌娜, 赵瑜. 泄流激励下水工结构应变模态参数时域辨识研究[J]. *水利发电学报*, 2012, 31(3): 199-203. (ZHANG Jianwei, ZHANG Yina, ZHAO Yu. Study on strain modal parameters identification of hydraulic structure in time domain discharge excitations[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(3): 199-203. (in Chinese))
- [13] 张笑华, 任伟新, 禹丹江. 结构模态参数识别的随机子空间法[J]. *福州大学学报: 自然科学版*, 2005(33): 46-49. (ZHANG Xiaohua, REN Weixin, YU Danjiang. Structural modal parameter identification applying stochastic subspace identification[J]. *Journal of Fuzhou University Natural Science Edition*, 2005(33): 46-49. (in Chinese))
- [14] 李炜明, 朱宏平, 吴贤国等. 未知激励下框架结构系统辨识的特征系统实现算法[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(8): 228-231, 255. (LI Weiming, ZHU Hongping, WU Xianguo, et al. System identification based on experimental responses of a frame structure with unknown inputs[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(8): 228-231, 255. (in Chinese))
- [15] 徐存东, 常周梅, 张硕, 等. 附加水体质量模型的压力管道流激振动分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(1): 138-144. (XU Cundong, CHANG Zhoumei, ZHANG Shuo, et al. Vibration analysis of pressure pipelines in the model with added water mass[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(1): 138-144. (in Chinese))