



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.03.031

程帅, 李守义, 司政, 等. 水电站厂房自振频率与影响因素的关联度分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 190-196, 203. CHENG Shuai, LI Shou yi, SI Zheng, et al. Relational grade analysis for influencing factors and the natural vibration frequency of hydropower house[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 190-196, 203. (in Chinese)

# 水电站厂房自振频率与影响因素的关联度分析

程 帅<sup>1,2</sup>, 李守义<sup>1</sup>, 司 政<sup>1</sup>, 毕晨曦<sup>1</sup>, 杨 阳<sup>3</sup>, 陈 演<sup>4</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048; 2. 西安热工研究院有限公司, 西安 710054;

3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410014; 4. 福建水口发电集团有限公司, 福州 350000)

**摘要:**水电站厂房的自振频率关系到其在动力荷载下的安全,在设计阶段加以预测和控制具有重要意义。运用 ANSYS 有限元软件对水电站厂房进行模态分析,得到厂房结构在二期、二期混凝土及地基的不同材料参数(弹模与容重)下的自振频率,采用基于灰色关联度的系统分析法,确定了水电站厂房自振频率与各主要影响因子的关联性及其密切程度。结果表明:只考虑材料弹性模量时,地基弹模对厂房自振频率的影响度最大,其次为厂房二期混凝土弹模和二期混凝土容重;只考虑混凝土容重时,二期混凝土容重对厂房自振频率的影响度略大于二期混凝土容重;同时考虑厂房混凝土弹模和容重时,结构容重对其自振频率的影响度大于弹模,二者与水电站厂房自振频率的关联度相差甚微。研究成果对控制类似结构的自振频率具有参考意义。

**关键词:** 水工结构工程; 水电站厂房; 自振频率; 材料参数; 灰色关联度; 量化影响因子

**中图分类号:** TV 314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0190-07

## Relational grade analysis for influencing factors and the natural vibration frequency of hydropower house

CHENG Shuai<sup>1,2</sup>, LI Shou yi<sup>1</sup>, SI Zheng<sup>1</sup>, BI Chen xi<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>3</sup>, CHEN Yan<sup>4</sup>

(1. Institute of Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an, 710054, China;

3. Powerchina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China;

4. Fujian shuikou Power Generation Group Co., Fuzhou 350000, China)

**Abstract:** Natural vibration frequency is related to the safety of hydropower stations under dynamic loads. It is significant to predict and control the frequency during the design phase. We performed modal analysis on the hydropower house using the ANSYS finite element software. Thus, we obtained the natural vibration frequency of the structure under the different material parameters (elasticity modulus and bulk density) of the first and second stage concrete and the foundation. We estimated the correlation between the structure's natural vibration frequency and the main material parameters using the systematical analysis method based on grey relational grade. The following conclusions were reached. When only the elasticity modulus was considered, the elasticity modulus of the foundation had the largest influence on the natural vibration frequency, followed by the first stage concrete and the second stage concrete of the hydropower house. When only the concrete bulk density was considered, the influence of the second stage concrete bulk density was slightly larger than that of the first stage concrete. When both elasticity modulus and concrete bulk density were considered, the concrete bulk density had a greater influence than elasticity modulus on the natural vibration frequency of the hydropower station, and their correlations with the natural vibration frequency showed little difference. The research results can provide reference for controlling the natural vibration frequency of similar structures.

**Key words:** hydraulic structure engineering; hydropower house; natural vibration frequency; material parameters; grey relational grade; to quantify impact factors

收稿日期: 2016-05-31 修回日期: 2016-06-23 网络出版时间: 2017-05-07

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170507.0918.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579208, 51409207, 51309190); 中央财政支持地方高校发展专项(1065X1205)

Funds: ational Natural Science Foundation of China (51579208, 51409207, 51309190); Special Funds from the Central Finance to Support Development of Local Colleges (1065X1205)

作者简介: 程 帅(1992-), 男, 陕西商洛人, 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。E-mail: chengshuai123999@163.com

通讯作者: 李守义(1955-), 男, 甘肃庄浪人, 教授, 博士生导师; 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。E-mail: lishouyi@126.com

自振特性是水电站厂房本身固有且极为重要的力学性能,包括自振频率、振型及阻尼比等,是衡量其刚度合理性的重要指标<sup>[1]</sup>。作为自振特性的重要参数之一,自振频率直接影响到厂房结构的动力响应,是水电站厂房动力分析的基础。近些年,许多专家和学者针对水电站厂房自振频率展开了大量的研究,并取得了丰富的成果。文献[2]研究了水电站厂房上部不同网架支承方式及模拟方法对厂房整体自振频率的影响,分析了机组振动荷载作用下的响应。其研究表明,网架支撑及模拟方式对厂房上部结构的振动频率影响显著,需按照实际尺寸建立包含网架结构的计算模型。文献[3]以势流体单元模拟水电站厂房流道内水体,以黏弹性边界模拟地基效应,对比分析了不考虑水体模型及考虑水体的流固耦合模型下厂房结构自振频率及地震响应,认为水体对其自振频率及动力响应有较大的影响,仅模拟库水和尾水的附加质量会带来较大的误差。文献[4]研究了不同混凝土强度和钢管厚度下,水电站厂房排架结构自振频率的变化及对抗震性能的影响。其研究表明,在地震荷载作用下,改变混凝土强度相对于改变钢管的壁厚对排架结构的自振频率影响更大。文献[5]以某灯泡贯流式机组水电站厂房为对象,研究厂顶溢流新型布置型式下厂房的自振频率,对部分振源与动力响应的相关性进行了分析,进行了共振校核并得出相应振源的影响系数,为相应结构的设计提供理论依据。文献[6]分析对比了不同弹性模量、阻尼比、泊松比等参数下水电站厂房自振频率及动力反应,探究了基岩模拟范围、基岩边界条件、厂房内外水体、厂房楼板结构形式、排架柱结构形式等对水电站厂房自振频率的影响,得出了一些定性的结论,为水电站厂房结构的抗震优化设计提供了可靠参考。另有大量国内外科研人员对水电站厂房的自振频率进行了研究,并取得了相关成果<sup>[7-10]</sup>。

上述研究内容主要是对水电站厂房自振频率的定性分析,宏观上分析其各个因素的影响趋势,但信息并不完全,不清楚各影响因素的主次及重要性程度,对各因素的影响权重定量描述较少。常用定量分析各因子之间关系的方法主要有主成分分析、回归分析、主分量分析等数理统计法<sup>[10]</sup>,这些方法虽在诸多问题中得到应用,但往往需要大样本,且要求有典型的概率分布,在部分问题中难以实现。灰色关联分析法不受此限制,该方法已经成功应用于多个领域<sup>[11-14]</sup>,但目前还没有将灰色关联分析引用到厂房自振频率中,以分析其影响因素的重要度。

因此,本文运用 ANSYS 有限元软件对不同材

料参数的水电站厂房进行模态分析,以灰色关联理论为基础,通过建立水电站厂房自振频率影响因素的灰色关联度分析模型,选择能够量化的影响因素(弹模及容重)和自振频率结果作为分析序列,通过分析各部分弹模、容重分别变化和同时变化下各因素与厂房自振频率的关联度,根据关联度大小排序得出各因子对厂房自振频率影响的重要度大小。

## 1 灰色关联度原理和方法

### 1.1 灰色关联分析基本原理

灰色系统理论是由邓聚龙教授提出的一种研究少数数据、贫信息、不确定性问题的新方法<sup>[15-16]</sup>,其中灰色关联度分析(Grey Relational Analysis)是灰色系统理论中一个重要分支,它将系统主要特性的发展趋势以及主要影响因子进行比较分析,由此来确定这些因素的关联程度或者因子对效应量的贡献测度<sup>[17]</sup>。本质上是根据各序列曲线微观或宏观上的几何接近程度来判断不同序列之间的关联是否紧密。基本原理是通过线性插值法将系统因素的离散行为观测值转化为分段连续的折线,进而根据折线的几何特征(一阶或二阶斜率差)来量化分析因子之间或因子对主行为的影响程度。序列在整体几何特征上越接近,发展态势越相似,则关联度越大<sup>[18]</sup>。

灰色关联分析法对于初始样本数据的多少及样本是否具备典型分布规律无太高要求,且其计算过程简单,定量计算结果与基于理论的定性分析较为吻合,具有较强的适用性<sup>[17-18]</sup>。

### 1.2 原始数据处理

灰色关系分析中首先需要确定比较序列和参考序列组成原始数据矩阵,其中比较序列是各个影响因子对应的子序列,参考序列是影响因子序列矩阵对应条件下系统结果的母序列。根据本文所研究的问题,分别选取水电站厂房一期、二期混凝土、基岩等不同部位的弹模及容重作为影响因子,即比较序列  $X_i(k) = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$ , (其中  $k=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m$ ); 选取各情况下厂房的各阶自振频率作为系统结果,即参考序列  $X_0(k) = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\}$ 。将参考序列(自振频率)及其对应的比较序列(不同部位材料参数)组合成含有  $m+1$  个序列的原始数据矩阵  $Y$  如式(1)所示

$$Y = \begin{Bmatrix} X_0(k) \\ X_i(k) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_0(1) & x_0(2) & \dots & x_0(n) \\ x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m(1) & x_m(2) & \dots & x_m(n) \end{Bmatrix}_{(m+1) \times n} \quad (1)$$

由于参考序列和比较序列中各元素的物理意义是不一样的,数据的量纲也就不一样。因此,为了保证各因素具有等效性和可比性,在进行关联度计算之前,需对原始数据进行标准化处理,常用的处理方法有初值化、均值化和区间相对值化等。本文采用初值化进行无量纲处理。

$$x'_i(k) = \frac{x_i(k)}{x_i(1)}, i = 0, 1, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

无量纲化后的数据矩阵  $Z$  见式(3)

$$Z = \begin{Bmatrix} X'_0(k) \\ X'_i(k) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x'_{0(1)} & x'_{0(2)} & \dots & x'_{0(n)} \\ x'_{1(1)} & x'_{1(2)} & \dots & x'_{1(n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_{m(1)} & x'_{m(2)} & \dots & x'_{m(n)} \end{Bmatrix}_{(m+1) \times n} \quad (3)$$

将原始数据矩阵进行无量纲化后可通过一系列的映射计算,得到比较序列与参考序列的关联度。

### 1.3 灰色关联度计算模型

由上述原始数据矩阵,根据灰色关联度基本原理,选择水电站厂房自振频率作为参考序列,以对应的各材料参数作为比较序列,建立水电站厂房自振频率灰色关联度计算模型见式(4),该模型为邓聚龙教授所提出的邓氏关联度模型<sup>[16]</sup>,充分体现了灰色关联四公理<sup>[19]</sup>中的约束条件,且考虑点与点之间的距离远近对关联度的影响,是目前最常用的灰色关联度计算模型,在诸多分析中得以应用<sup>[10-11, 18-20]</sup>。

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{D_{\min} + \rho D_{\max}}{D_i(k) + \rho D_{\max}} (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中: $r_i$ 为各比较序列  $X_i(k)$  与参考序列  $X_0(k)$  的关联度; $D_i(k) = |X_i(k) - X_0(k)|$  为比较序列和参考序列的绝对差值; $D_{\max} = \max_i (\max_k D_i(k))$  与  $D_{\min} = \min_i (\min_k D_i(k))$  ( $i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n$ ) 分别为绝对差值中的两级最大差和两级最小差; $\rho$  为分辨系数,用于提高灰色关联系数之间的差异显著性,  $\rho \in (0, 1)$ , 根据相关文献的取值原则和方法<sup>[16, 20]</sup>, 当数据序列出现奇异值时,  $\rho$  取较小的值,可克服奇异值的支配作用,当数据序列较为平稳时,  $\rho$  应取较大的值,以充分体现关联度的整体性。为平衡这两种情况带来的影响并保持分辨系数的静态性,邓氏关联度将分辨系数取为定值 0.5, 后来的灰色关联度分析中一直沿用这个经验值。分辨系数取值不同,关联度的分布区间不同,但不会影响关联度的排序。目前为止,虽已存在很多关于分辨系数的取值研究,但适用性不强,科学性有待进一步讨论。故本文取其常用值  $\rho = 0.5$ 。

计算出的灰色关联度  $r_i$  在  $[0, 1]$  区间内变化,其值越接近于 1, 说明参考序列与比较序列的变化态势越一致,该参考序列受比较序列的影响越大;相反,越接近于 0 则影响越小。关联度大小的排序即为影响因子敏感性大小的排序。

## 2 有限元模型与假设

### 2.1 有限元模型

本文采用 ANSYS 有限元软件建立某河床式水电站厂房中间机组坝段有限元模型,其中:坝高 80 m, 中间机组坝段宽 26 m, 顺河床方向长度 78 m, 采用轴流式机组, 上游水头 65.0 m, 下游尾水水头 22.5 m。在模型建立中详细考虑了进水口、流道、蜗壳、拦污栅库、门库与门槽、排架结构和牛腿、屋顶、排沙孔、尾水管及尾水闸墩等细部结构。

有限元计算模型包括坝体与基础岩体,基岩的模拟范围取矩形区域,基岩边界值:深度方向由结构最低点向下延伸 100 m,左、右岸方向与坝段同宽,上下游方向由边界处分别向上、下游延伸 50 m。模型整体坐标系的原点设在坝段右侧底部与地基相交处,沿水流方向指向下游为 X 轴正方向;沿高度方向铅直向上为 Y 轴正方向;垂直水流方向指向右岸为 Z 轴正方向。整体模型网格剖分基本采用 8 结点六面体实体单元 SOLID45, 厂房结构网格尺寸不大于 1.0 m, 地基网格尺寸不大于 10.0 m, 地基与厂房相接部分通过四面体单元进行过渡。整体有限元计算模型见图 1。

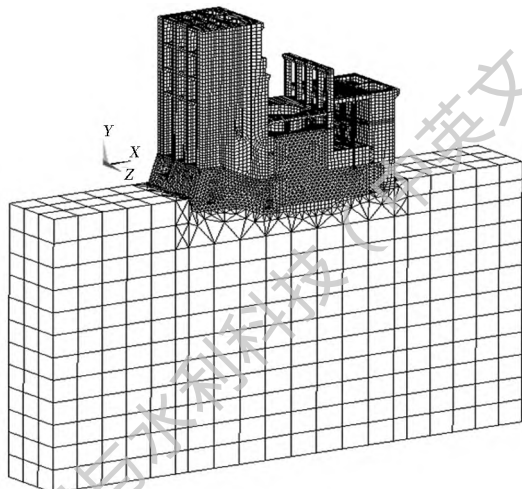


图 1 整体有限元计算模型

Fig. 1 Whole finite element model

### 2.2 计算假定

根据水电站厂房结构特点及其相关研究成果<sup>[21]</sup>, 本文在三维有限元计算中, 做如下假定:

1 各坝段间设置有横缝,因此各坝段独立承受荷载,坝段间无相互作用,且由于横缝作用,在计算模型中厂房两侧无约束,基岩上下游面及左右侧面施加法向约束,底面施加三向约束。

° 充分考虑结构材料分区,计算中假定混凝土、基础岩体为均质、弹性、各向同性的连续体。

» 坝体与地基连接可靠,不存在相互脱离的情形,满足连续性条件,不考虑非线性接触。

### 3 自振频率与各影响因素的关联度分析

#### 3.1 各部分弹模对自振频率的影响度

水电站厂房混凝土结构总体上一般分两期施工,一期混凝土主要包括流道底板、尾水管、下游胸墙等下游及下部基础结构,二期混凝土主要包括上游胸墙、蜗壳、发电机墩、座环基础、流道及发电机层以上混凝土结构等。根据各部分结构特点与功能,一期和二期分别采用不同标号的混凝土,其材料参数不同。

不同标号混凝土的弹性模量不同,现设置以下三组方案,分析一期混凝土、二期混凝土及地基三者的弹性模量对水电站厂房自振频率的影响,各方案取值见表 1。其中 A 组方案中地基弹模保持不变,厂房一、二期混凝土等级标号分别取为 C10、C15、C20、C25、C30、C35 及 C40,弹模由 17.5 GPa 变化至 32.5 GPa,且二者保持一致(根据最新水电工程水工建筑物抗震设计规范<sup>[22]</sup>,混凝土动态弹性模量可较静态提高 50%,后文中混凝土及地基的弹模取值皆为静态标准值  $E_0$ ,在模态计算中取为  $1.5E_0$ ); B 组方案中厂房一、二期混凝土标号不变(C30),地基弹模根据一般工程地质资料由 7.4 GPa 变化至 11.0 GPa;为研究一期和二期混凝土对厂房自振频率的影响程度大小,C 组方案中地基弹模保持不变,厂房一期和二期混凝土分别取不同标号。三组研究方案中一期、二期混凝土容重都取为  $25 \text{ kN/m}^3$ ,泊松比取为 0.167;地基的泊松比取为 0.25,不考虑地基的容重。

表 1 各方案下混凝土和地基的弹性模量取值

Tab.1 Elastic modulus values of concrete and foundation under different schemes

× 1.5 GPa

方案分组	A 组							B 组						C 组					
	方案	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	C5
一期混凝土弹模	17.5	22.0	25.5	28.0	30.0	31.5	32.5	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	17.5	22.0	25.5	28.0	30.0	31.5
二期混凝土弹模	17.5	22.0	25.5	28.0	30.0	31.5	32.5	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	22.0	25.5	28.0	30.0	31.5	32.5
地基弹模	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	7.4	8.6	9.0	9.4	10.0	11.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

基于上述有限元计算模型,由表 1 中各方案取值,运用 ANSYS 有限元软件对水电站厂房进行模态分析,得到各方案下水电站厂房的自振频率,为说明厂房自振频率随结构弹模变化的一般性规律,将 A 组中各方案下厂房的前 20 阶自振频率做以比较,见图 2。

模量的增大而增大,且这种增大效应在高阶频率上更为明显,在低频增幅较小;其次,弹模的变化幅度与频率变动幅度基本一致,符合频率增量与弹模增量呈线性关系的理论规律。B 组六个方案中,由于地基的弹性模量变化范围较小,其各阶频率偏差较大,与方案 A5 相似。C 组六个方案中,厂房一期和二期混凝土标号不同,但都各自自由小变大,其各阶频率的规律性与 A 组七个方案相类似,在此不做赘述。

采用上述三组共 17 个方案的计算结果,以厂房的各阶自振频率为参考序列,以一期混凝土弹模、二期混凝土弹模及地基弹模三个影响因子作为比较序列,根据(1)~(4)式编写 Matlab 程序计算出影响因子与参考序列的关联度见表 2。

由表 2 可知,总体上,水电站厂房的自振频率对地基的弹性模量最为敏感,其次是一期混凝土,二期混凝土弹模对厂房自振频率的影响最小。其中一、二期混凝土弹模与自振频率的关联度较为接近,大部分在 0.45 至 0.5 之间,变化趋势一致且波动不大,地基弹模与各阶自振频率的关联度浮动较大,但都

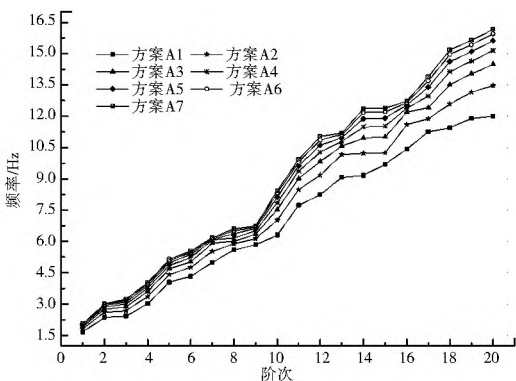


图 2 A1~A7 方案下各阶自振频率

Fig.2 Each vibration frequency of A1~A7 schem

由图 2 可知,厂房的自振频率随着混凝土弹性

大于其它两因素的关联度,大部分在 0.65 以上,相关性较好,与水电站厂房自振频率的关联最为密切。

前 20 阶自振频率与一期弹模、二期弹模及地基弹模的关联度平均值分别为 0.486 0、0.450 0、0.658 0。

表 2 弹性模量与前 20 阶自振频率的关联度

Tab. 2 Degree of correlation between elastic modulus and top 20 vibration frequencies

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
一期弹模	0.5171	0.4872	0.4809	0.4827	0.4836	0.4818	0.5007	0.4756	0.4851	0.4838	0.4856	0.4842	0.4929	0.4822	0.4761	0.4925	0.4722	0.4842	0.4860	0.4848
二期弹模	0.4825	0.4543	0.4457	0.4489	0.4464	0.4486	0.4653	0.4411	0.4492	0.4463	0.4491	0.4463	0.4637	0.4467	0.4367	0.4546	0.4390	0.4429	0.4434	0.4485
地基弹模	0.6609	0.6534	0.5956	0.5964	0.6715	0.6582	0.6707	0.7937	0.7957	0.5988	0.6551	0.6004	0.6874	0.5816	0.6781	0.6996	0.7285	0.6136	0.6273	0.5926

### 3.2 各部分容重对自振频率的影响度

为研究一期、二期混凝土容重对水电站厂房自振频率的影响,根据实际工程中的取值范围,将混凝土容重由 23.0 kN/m<sup>3</sup> 变化至 26.0 kN/m<sup>3</sup>,设置以下两组方案见表 3。其中,D 组中两期混凝土容重变化一

致;E 组中为得出各部分混凝土容重对自振频率的影响度,根据关联度分析中原始数据的需要,两期混凝土容重不同且有各自的变化规律。各方案中一期、二期混凝土弹性模量取为 28 GPa,泊松比取为 0.167;地基弹性模量取为 8 GPa,泊松比取为 0.25。

表 3 各方案下混凝土和地基的容重取值

Tab. 3 Bulk density values of concrete and foundation under different schemes

单位(kN/m<sup>3</sup>)

方案分组	D 组					E 组					
	D1	D2	D3	D4	D5	E1	E2	E3	E4	E5	E6
一期混凝土容重	23.0	24.0	24.5	25.0	26.0	24.5	24.0	25.5	25.0	26.0	24.5
二期混凝土容重	23.0	24.0	24.5	25.0	26.0	23.5	25.5	24.5	23.5	25.0	25.0

根据表 3 各方案,对水电站厂房进行模态分析,得到水电站厂房的各阶自振频率。为分析厂房自振频率随混凝土容重变化的一般性规律性,将 D 组中各方案下水电站厂房的前 20 阶自振频率做以比较,见图 3。可知,与弹模对自振频率的影响不同,水电站厂房的自振频率随着混凝土容重的增大而减小,但其减小程度与弹模的影响一致,在高阶频率上更为明显,在低频减幅较小。

响略大于一期混凝土,其重要性程度二者相差不大。由于结构混凝土容重的实际变化范围相对较小,上述结论只针对仅考虑容重变化时的规律性,当同时考虑容重和其他因素的变化时,容重相对于其他因素对水电站厂房自振频率的影响度如何,在下文会做进一步研究。

采用 D、E 两组方案的模态分析结果,以厂房各阶自振频率为参考序列,以一期、二期混凝土容重两个影响因子作为比较序列,计算出各期混凝土容重与各阶自振频率的关联度如表 4 所示。

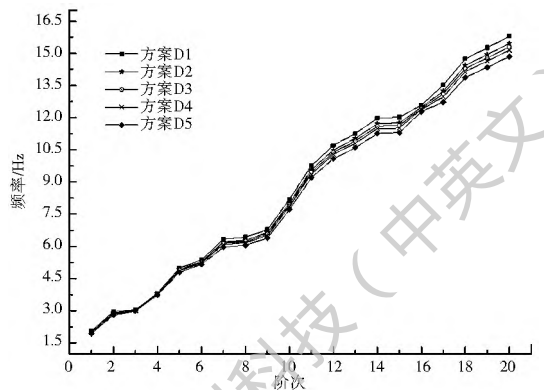


图 3 D1 至 D5 方案下各阶自振频率

Fig. 3 Each vibration frequency of D1~ D5 scheme

由表 4 可知,一期混凝土容重与厂房各阶自振频率的性关度略小于二期混凝土,二者极为接近,差值小于 0.038,前 20 阶自振频率与一期混凝土容重、二期混凝土容重关联度平均值分别为 0.509 5、0.544 7。可见,二期混凝土容重对厂房自振频率影

表 4 混凝土容重与前 20 阶自振频率的关联度

Tab. 4 Degree of correlation between concrete density and top 20 vibration frequencies

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
一期容重	0.512 3	0.514 3	0.506 8	0.510 1	0.511 8	0.507 6	0.510 0	0.509 3	0.508 6	0.510 4
二期容重	0.550 9	0.554 1	0.549 0	0.553 3	0.546 9	0.545 7	0.543 7	0.541 6	0.538 8	0.545 1
阶次	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
一期容重	0.508 0	0.509 1	0.508 1	0.512 4	0.511 8	0.510 4	0.507 7	0.511 5	0.510 2	0.500 4
二期容重	0.536 4	0.541 1	0.536 7	0.551 3	0.549 0	0.553 3	0.535 5	0.548 5	0.544 5	0.528 0

### 3.3 弹模和容重影响度综合分析

上述以单因子变量法分别分析了水电站厂房各部分弹性模量和容重与其自振频率的相关度。得到了只考虑弹模和只考虑容重时,各部分对应参数与厂房自振频率的普遍规律及其影响程度。然而,厂房自振频率与这两个因素都有着较为密切的联系,实际工程中往往需要掌握最为敏感的因素,以便更加有效地对其自振频率加以控制。现同时考虑弹模和容重

两个因素,分析厂房的自振频率与此二者的关联性,以量化弹模和容重对厂房自振频率的敏感度。

根据实际工程,在混凝土弹性模量和容重的合理取值范围内,设置 12 种不同取值组合见表 5(为与前文区别,此 12 种方案设为 F 组)。各方案中一期、二期混凝土泊松比都取为 0.167;地基的泊松比取为 0.25,弹性模量取为 8 000 MPa,不考虑地基的容重。

表 5 各方案下混凝土弹模及容重取值

Tab. 5 Elastic modulus and density values of concrete under different schemes

方案分组 方案	F 组											
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
混凝土弹模/( $\times 1.5$ GPa)	25.5	28.0	30.0	22.0	17.5	28.0	31.5	25.5	30.0	32.5	28.0	22.0
混凝土容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	25.0	23.0	24.5	23.0	25.0	25.5	26.0	24.5	24.0	25.5	23.5	24.5

表 6 混凝土弹模和容重与前 20 阶自振频率的关联度

Tab. 6 Degree of correlation between elastic modulus or density of concrete and top 20 vibration frequencies

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
混凝土弹模	0.603 3	0.602 9	0.573 7	0.570 1	0.578 2	0.581 2	0.630 9	0.631 4	0.610 4	0.602 4
混凝土容重	0.649 3	0.643 6	0.560 6	0.581 6	0.626 0	0.616 6	0.694 9	0.688 5	0.700 2	0.574 1
阶次	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
混凝土弹模	0.601 6	0.601 8	0.611 0	0.614 3	0.629 9	0.570 4	0.639 3	0.608 0	0.598 4	0.607 3
混凝土容重	0.612 5	0.573 9	0.683 2	0.570 7	0.605 0	0.737 5	0.648 3	0.573 9	0.584 4	0.576 9

采用 F 组 12 种方案取值设置混凝土弹模和容重,对水电站厂房进行模态分析,得到个方案下厂房的前 20 阶自振频率。以厂房的各阶自振频率为参考序列,分别以混凝土弹性模量和容重作为比较序列,计算出弹模和容重与水电站厂房自振频率的关联度见表 6。

0.6 以上,相关关系较好,各阶频率与弹模和容重的关联度大小无固定排序,对基频的影响,容重因素大于弹模因素,其它大部分阶次中,自振频率与容重的关联度亦大于与弹模的关联度,前 20 阶自振频率与混凝土弹模和容重的关联度平均值分别为 0.603 3、0.625 1。可知,总体上,混凝土容重对水电站厂房自振频率的影响大于其弹性模量的影响。

至此,以三种情况(只考虑弹模、只考虑容重、同时考虑弹模和容重)分析了部分材料参数对水电站厂房自振频率的影响,每种情况都分别求出了各考虑因素与厂房自振频率的关联度。图 4 为三种情况下对应影响因素与水电站厂房前 20 阶自振频率关联度的平均值对比。

## 4 结论

本文用 ANSYS 有限元软件对水电站厂房结构进行模态分析,以灰色关联分析法为基础编写 Matlab 计算程序,对厂房自振频率与其材料影响参数的相关度进行了计算分析。主要结论如下:(1)水电站厂房自振频率与其各部分弹性模量和容重密切相关。其中,自振频率会随着弹性模量的增大而增大,随容重的增大而减小,且频率变幅与弹模或容重的

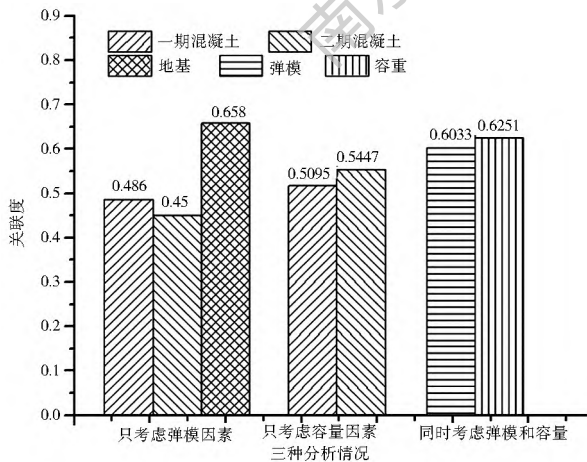


图 4 各因子与前 20 阶自振频率关联度平均值

Fig. 4 Correlation average between each factor and top 20 vibration frequencies

由表 6 可知,混凝土弹模和容重对水电站厂房各阶自振频率的影响效果相当,大部分关联度在

变幅基本呈线性关系; (2) 只考虑弹性模量时, 地基弹模对厂房自振频率的影响最大, 关联度达到 0.65 以上, 明显大于结构混凝土与其自振频率的关联度, 说明在厂房选址、地基勘探试验及数值模拟中合理确定地基参数的重要性, 当水电站厂房结构形式和材料分区与文中所研究的厂房相类似时, 一期混凝土弹模与厂房自振频率的关联度略大于二期混凝土; (3) 只考虑混凝土容重时, 对于类似结构的厂房, 二期混凝土容重与其自振频率的关联度大于一期混凝土, 二者相差不大, 关联度值都在 0.5 以上, 在选择各部分混凝土标号及材料参数时, 可适当考虑此因素的影响; (4) 同时考虑弹模和容重因素时, 容重对水电站厂房自振频率的影响程度略大于弹性模量, 二者关联度大小分别为 0.6251、0.6033, 可见在控制厂房结构自振频率过程中应优选影响权重高的容重作为主要控制因素。

文中利用灰色关联分析法直观量化了各材料参数对水电站厂房自振频率的影响程度, 但只是局限于部分可以量化的因素, 对其他因素及其他自振特性参数未做讨论。其次, 厂房的自振频率与其结构形式有很大关系, 文中所得到的部分结论仅适用于类似结构的河床式厂房, 但对于其他结构形式的水电站厂房, 亦可用本文的研究方法分析其影响因素的重要性程度, 优选控制参数。此外, 现行灰色关联度理论及算法, 其模型本身具有一定缺陷, 很难同时满足保序性和规范性, 其模型检验准则和具体量化标准还不够成熟。这些问题还有待于在今后的实践中进一步深化研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 练继建, 王海军, 秦亮. 水电站厂房结构研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (LIAN Jì jian, WANG Hāi jūn, QIN Lǐ āng. Study on the structure of hydropower station [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 黑灿, 伍鹤皋, 傅丹, 等. 基于不同网架模拟方式的水电站厂房振动特性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 26-30. (HEI Cān, WU Hè gāo, FÙ Dān, et al. Study of vibration characteristics of hydropower house based on different simulation methods of grid roof [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016, 38(1): 26-30. (in Chinese)) DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2016.01.006
- [3] 孙伟, 何蕴龙, 苗君, 等. 水体对河床式水电站厂房动力特性和地震动力响应的影响分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 119-127. (SUN Wēi, HÈ Yǔn lóng, MIÀO Jūn, et al. Effects of water body on dynamic characteristics and seismic responses of run of river hydropower house [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(9): 119-127. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdbx.20150916
- [4] 陈娟, 张燎军. 混凝土强度和钢管厚度对钢管混凝土排架结构抗震性能的影响[J]. 水电能源科学, 2011(11): 90-93. (CHEN Juan, ZHANG Liāo jūn. Influence of concrete and steel pipe thickness on aseismic performance of concrete filled steel tubular bent structure [J]. Water Resources and Power, 2011(11): 90-93. (in Chinese))
- [5] 张龔, 练继建, 刘昉, 等. 基于原型观测的厂顶溢流式水电站厂房结构振动特性研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2015(7): 584-590. (ZHANG Yān, LIAN Jì jian, LIU Fāng, et al. Vibration characteristics of powerhouse structure of roof overflow hydropower station based on prototype observation [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015(7): 584-590. (in Chinese)) DOI: 10.11784/tdxbz201312046
- [6] 霍学平. 大型水电站地面厂房动力特性与抗振分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2015. (HUO Xué píng. Dynamic characteristics and vibration analysis for ground hydropower house [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [7] Amorosi A, Boldini D, di Lernia A. Seismic ground response at Lotung: Hysteretic elastoplastic based 3D analyses [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 85: 44-61. DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.03.001
- [8] Wei S, Zhang L. Vibration analysis of hydropower house based on fluid structure coupling numerical method [J]. Water Science and Engineering, 2010, 3(1): 75-84. DOI: 10.3882/j.issn.1674-2370.2010.01.008
- [9] 陈玲玲, 戴湘和, 彭定. 三峡电站厂房钢衬蜗壳不同埋设方式抗震分析[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 51-54. (CHEN Lǐng líng, DAI Xiāng hē, PÉNG Dìng. Anti-seismic study on different embedment options for steel lined spiral case in the Three Gorges Hydropower Plant [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(2): 51-54. (in Chinese))
- [10] 尹吉娜, 杨杰, 任杰, 等. 基于灰色关联分析的边坡稳定影响因素敏感性评估[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2015(1): 75-78. (YIN Jī nà, YÁNG Jiē, RÈN Jiē, et al. Study on impact factors sensitivity of slope stability based on grey correlation analysis [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2015(1): 75-78. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2015.01.016
- [11] 姬宏, 田盛. 基于灰色关联度的干旱区社会经济子系统需水量协调研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(3): 42-44. (Jǐ Hōng, TIĀN Shèng. Coordination study on water demand of socioeconomic subsystem in arid area based on grey relational grade [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(3): 42-44. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.03.012
- [12] Kuram E, Ozcelik B. Multi objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro milling of Al 7075 material with ball nose end mill [J]. Measurement, 2013, 46(6): 1849-1864. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.02.002
- [13] Thanigaivelan R, Arunachalam R. Optimization of process parameters on machining rate and overcut in electrochemical micromachining using grey relational analysis [J]. Journal of Scientific and Industrial Research, 2013, 72: 36-42.

(下转第 203 页)

- [15] 林其文. 竖井贯流式水轮机组的设计[J]. 中国制造业信息化, 2011, 40(17): 81-83. (LIN Qiwen. Design of vertical circulating water turbine group [J]. Manufacturing Information Engineering of China, 2011, 40(17): 81-83. (in Chinese))
- [16] SL140-2006. 水泵模型及装置模型验收试验规程[S]. (SL140-2006. Code for model pump and its installation acceptance tests [S]. (in Chinese))
- [17] 严登丰. 推荐采用绕流管法测定泵站流量[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 140-142. (YAN Dengfeng. Recommending circumferential flow pipe for flow measurements at pump stations [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 140-142. (in Chinese))
- [18] 杨正东, 袁聪. 淮安二站水泵改型测试与验证[J]. 江苏水利, 2015(5): 28-29. (YANG Zhengdong, YUAN Cong. Test and verification of water pump retrofitting at Huai'an No. 2 Pumping Station [J]. Jiangsu Water Resources, 2015(5): 28-29. (in Chinese)) DOI: 10.16310/j.cnki.jssl.2015.05.012
- [19] 段中喆. ANSYS FLUENT 流体分析与工程实例[M]. 电子工业出版社, 2015. (DUAN Zhongzhe. Examples of ANSYS FLUENT fluid analysis and engineering [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese))
- [20] 徐磊, 陆林广, 陈伟, 等. 竖井贯流泵装置水力设计方案比较研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5): 207-215. (XU Lei, LU Lirong, CHEN Wei, et al. Study on comparison of hydraulic design schemes for shaft tubular pump system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5): 207-215. (in Chinese))

(上接第 196 页)

- [14] 曹洪洋, 王禹, 满兵. 基于改进灰色关联分析的泥石流危险性评价[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 91-94. (CAO Hongyang, WANG Yu, MAN Bing. Risk evaluation of potential debris flow based on the improved grey correlation method [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 91-94. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdpk.2015.01.021
- [15] Deng J L. Control problems of grey systems [J]. Systems & Control Letters, 1982, 5(5): 288-294.
- [16] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002. (DENG Julong. The basis of grey theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002. (in Chinese))
- [17] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046. (LIU Sifeng, CAI Hua, YANG Yingjie, et al. Advance in Grey incidence analysis modeling [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2013, 33(8): 2041-2046. (in Chinese))
- [18] 张莎. 灰色关联分析新算法研究及其意义[D]. 长春: 东北师范大学, 2012. (ZHANG Sha. The study on the new algorithms of grey relational analysis and its significances [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012. (in Chinese))
- [19] 刘思峰, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (LIU Sifeng, XIE Naoming. Grey system theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [20] 东亚斌, 段志善. 灰色关联度分辨系数的一种新的确定方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2008, 40(4): 589-592. (DONG Yabin, DUAN Zhishan. A new determination method for identification coefficient of grey relational grade [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2008, 40(4): 589-592. (in Chinese))
- [21] 李守义, 肖静. 河床式水电站厂房横缝止水布置形式研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(5): 165-168. (LI Shouyi, XIAO Jing. Study on waterstop arrangements of transverse joints of hydropower house in river channel [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 165-168. (in Chinese))
- [22] NB 35047-2015. 水电工程水工建筑物抗震设计规范[S]. (NB 35047-2015. Code for seismic design of hydraulic structures of hydropower projects [S]. (in Chinese))