

# COMSOL 流固耦合有限元协同 BP 神经网络实现泄洪闸室结构安全预测及其数值模拟

龚成勇<sup>1,2</sup>, 翁伟涛<sup>1</sup>, 王银莹<sup>1</sup>, 陈超<sup>1</sup>, 李仁年<sup>1</sup>, 谢庚淼<sup>2</sup>, 许浪<sup>2</sup>,

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学黄河流域水生态与水工程研究院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 泄洪闸室结构具备挡水和泄水两重主要功能的水工建筑物, 工作中因水位变幅较大, 加之泄流振动的水流动水压力不断突变, 尤其水工闸门的启闭过程所形成的缝隙流对闸室结构产生严重危害。为此, 以大藤峡深孔泄洪闸室为研究对象, 研究其结构应力应变特征。首先对 COMSOL 流固耦合有限元与 BP 神经网络两种方法进行重构形成研究方法, 针对大流量泄洪闸室泄流振动条件的结构应力应变研究重构后的方法可以发挥两种方法的优势; 然后以 COMSOL 开展闸室泄流水体与闸室结构的流固耦合有限元模拟, 获得泄流激励条件下坝身振动特征与应力变形规律; 随后构建 BP 神经网络分析模型, 分别开展了创建网络结构、确定计算参数、选择训练函数、选择预测模型、分析预测误差和拟定期望与预测等研究, 并生成流固耦合有限元分析结果数据为神经网络训练集; 最后通过 BP 神经网络预测泄洪孔道流场与泄洪闸室结构的应力应变特征, 并以此重构闸室流场与结构应力应变。基于研究过程与结果的验证, 验证本文探索开展重构的研究方法的可行性。

**关键词:** 泄洪闸室结构; 流固耦合有限元模拟; BP 神经网络; 泄流激励振动; 数值模拟  
中图分类号: TV663 文献标识码: A

DOI:

**Collaborating COMSOL fluid-structure coupling finite element and BP Neural Network to predict the Flood Sluice chamber Structure for it Safety and its numerical simulation**  
**GONG Cheng-yong<sup>1,2</sup>, WENG Wei-tao<sup>1</sup>, WANG Yinying<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup> LI Ren-nian<sup>1</sup>, XIE Geng-miao<sup>2</sup>, XU Lang<sup>2</sup>,**

(1. college of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Institute of Water Ecology and Water Engineering in Yellow River Basin, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China)

**Abstract:** The structure of the sluice gate is a hydraulic structure with two main functions of retaining water and discharging water. Due to the large variation of water level and the sudden change of water flow pressure caused by the vibration of the sluice gate, especially the gap flow formed during the opening and closing process of the sluice gate causes serious harm to the sluice gate structure. Therefore, the structural stress and strain characteristics of Dantengxia deep hole flood sluice chamber are studied. Firstly, COMSOL fluid-structure coupling finite element method and BP neural network method are reconstructed to form a research method. The reconstructed method can give full play to the advantages of the two methods to study the structural stress and strain under the discharge

\* 收稿日期:

**课题项目:** 科技部创新方法工作专项(2020IM030400); 流体与动力机械教育部重点实验室开放基金(LTDL2020-001), 甘肃省教育科学“十四五”规划 2024 年度课题(GS[2024]GHBZ199); 兰州理工大学研究生课程思政示范项目(KCSZ-SF202402009); 兰州理工大学 2024 年度高等教育研究项目(GJ2024B-62); 教育部高等学校能源动力类教学研究与实践项目(NSJZW2021Y-09); 甘肃省教育厅 2024 年大中小学课程教材专项研究课题(GSJG-Y2024034); 《住房和城乡建设高质量发展要素和人才支撑》科研项目(CCLI2023R0014)。

**作者简介:** 龚成勇(1979.12-), 男, 云南镇雄人, 博士, 副教授; 主要研究方向: 多物理场耦合机理与数值模拟及其水工结构数字孪生优化, 创新方法推广应用; E-mail:mars@lut.edu.cn。

vibration condition of the large discharge gate chamber. Then the fluid-structure coupling finite element simulation of sluice body and sluice chamber structure is carried out by COMSOL to obtain the vibration characteristics and stress deformation law of dam body under discharge excitation. Then, the BP neural network analysis model is constructed, and the research on network structure creation, calculation parameters determination, training function selection, prediction model selection, prediction error analysis and expectation and prediction is carried out, and the fluid-structure coupling finite element analysis result data is generated as the neural network training set. Finally, BP neural network is used to predict the stress-strain characteristics of the sluice channel flow field and the sluice chamber structure, and then the sluice chamber flow field and the structure stress-strain are reconstructed. Based on the verification of the research process and results, the feasibility of the research method of reconstruction explored in this paper is verified.

**Keywords:** Flood sluice chamber structure; Fluid-structure coupling finite element simulation; BP neural network; Discharge excitation vibration; Numerical simulation

## 0.引言

1949年后,我国新建了众多的泄洪闸室工程,但是闸室泄洪作业过程中当水流通过泄洪闸室时会产生激振效应<sup>[1]</sup>。泄洪作业中水流受到突变、扩散和反射等多种因素的影响,引起水流激振,再加上泄洪过程中水位变幅巨大,二者共同作用下会导致闸室结构被破坏,对泄洪安全造成严重威胁。因此研究泄流激振条件下坝身的振动特征及应力变形规律,对闸室的安全泄洪至关重要。

在1960年以前,人们通过手工计算,有一定的局限性,因此对于复杂的建筑物必须通过简化其结构,得到一个大致的结果。其在计算闸室结构时的做法是把底板和闸墩分成独立的两部分再计算,其中闸墩会被简化成悬臂梁,底板被简化为基础梁,前者用材料力学或结构力学计算,后者用查表的方法计算。<sup>[2]</sup>之后演变成两种比较成熟的模型即将闸室和地基看作一个整体,并将其模拟成平面框架结构和将底板和地基看作为一个整体,假定其为基础板。这两种模型均采用数值法或半解析法计算<sup>[3][4]</sup>。前者虽然能够在平面内考虑各组成部分的相互作用,可是无法确定结构的空间效应。进入21世纪以来,各种分析软件的出现,对泄洪闸室的分析有突破进展,目前水工模型试验,有限元数值分析,原型观测已成为研究水工结构应力应变规律,对结构进行安全预测的主要手段。

贾冬<sup>[5]</sup>以锦屏二级水闸工程为研究对象,以水闸和基础为整体,对闸室结构进行了有限元静动力分析。计算了水闸基础在施工期,运营期和地震过程中的应力和应变分布,综合评估了整个闸室基础结构的安全性和合理性。刘冬梅<sup>[6]</sup>结合工程实例,利用有限元软件对有限元法在闸室结构设计中的应用进行了系统地研究,应用有限元软件建立了优化闸室结构上部框架的模型。极大地提高了对闸室结构应力应变的计算的精度,为闸室安全预测提供了更为可靠的数据基础。

随着信息技术的高速发展,神经网络也在水利水电工程领域被广泛应用。赵斌、杨杰、吴云芳、吴秀娟等人<sup>[7]-[10]</sup>在文章中介绍BP神经网络运用于大坝安全监测系统应用,分别将其用来预测坝体顶部竖向位移、坝基水平位移、以及风险评价等指标,结果证明了BP神经网络具有良好的鲁棒性和自适应性。董霄峰等<sup>[11]</sup>使用遗传算法优化BP神经网络,得到了更为精确的面板堆石坝变形预测模型。

基于对前述研究问题和研究成果的分析,本文以大藤峡的深孔泄洪闸室为研究对象,研究其泄流激励条件下坝身振动特征与应力变形规律。结合前人的研究经验,提出将COMSOL流固耦合有限元协同与BP神经网络相协同,以实现泄洪闸室结构安全预测。利用COMSOL开展闸室泄流水体与闸室结构的有限元模拟,获得泄流激振条件下坝身的振动特征与应力变形规律。再利用

MATLAB 中的热力图对闸室在激振条件下对其主要影响因子进行相关性分析，获得各个影响因子对应应力应变影响的相关系数，选择相关的影响因子赋予相关的权重和偏置再输入到 BP 神经网络模型中，进而预测目标变量，实现闸室流场的重构，进而分析闸室的安全性和稳定性。因此本文将构建模拟分析的方法，如图 1 所示，其中分为研究对象简化、边界简化、模型选择、模拟方法和模拟应用五个部分组成。

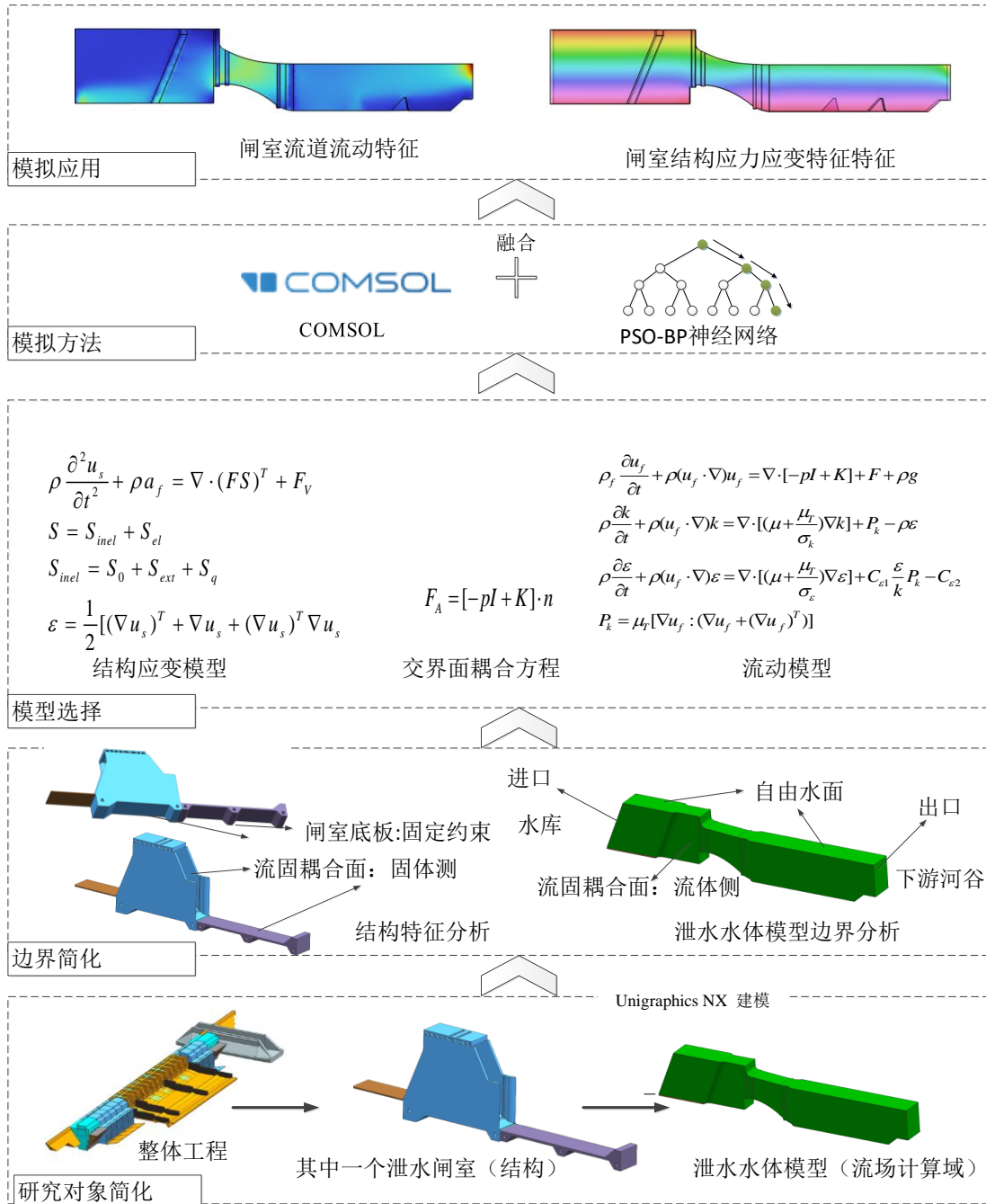


图 1 模拟仿真方法设计

## 1. 确定研究对象

由于大藤峡的泄水口每个都是呈平行分布的独立作业闸室，闸室结构复杂，且体积大，底板上的水位发生变化时，闸室结构的内力也会改变。为了研究大藤峡水电站泄水闸室流道流体的流动特征以及闸室应力应变特征，本文选取大藤峡一个中部深孔闸室作为研究的主体，并以 Unigraphics NX

平台创建相应的泄水水体三维模型作为流场的计算域，研究主体模型在三维空间上的基本尺寸为  $x \times y \times z = 17\text{m} \times 210\text{m} \times 52\text{m}$ 。将计算域划分为闸室结构和水体模型，并在闸室结构建立固体力学模型，在水体模型上建立  $k-\varepsilon$  湍流模型，并利用流固耦合模型分析闸室结构的应力应变特征。

## 2 建立模型

### 2.1 湍流模型( $k-\varepsilon$ )

COMSOL 分析软件提供了大量的计算模型，如  $k-\varepsilon$  湍流模型  $k-\omega$  湍流模型等，其中每一大类的湍流模型又包含若干个子类模型。本文对闸室流场的流动特点进行分析，确定闸室流场内流动的质点运动杂乱无章除了平行于管道轴线的运动以外还存在着剧烈的横向运动的湍流。考虑到本文所研究的对象不考虑强旋流动的影响。故本文选用了  $k-\varepsilon$  类湍流模型建立流场的数学模型如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_f \frac{\partial u_f}{\partial t} + \rho(u_f \cdot \nabla)u_f = \nabla \cdot [-pI + K] + F + \rho g \\ \rho \nabla \cdot u_f = 0 \\ K = (\mu + \mu_T)(\nabla u_f + (\nabla u_f)^T) \\ \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(u_f \cdot \nabla)k = \nabla \cdot [(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k})\nabla k] + P_k - \rho \varepsilon \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(u_f \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot [(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon})\nabla \varepsilon] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \\ \mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ P_k = \mu_T [\nabla u_f : (\nabla u_f + (\nabla u_f)^T)] \end{array} \right. \quad (1)$$

上式是  $k-\varepsilon$  湍流模型的数学建模，其中包括湍动能  $k$  的传输方程、湍耗散率  $\varepsilon$  的传输方程，湍动能  $k$  的生产项等方程；且  $u_f$  流体速度， $\mu_T$  为湍流黏度， $k$  湍动能， $\varepsilon$  湍耗散率，模型常数有： $C_\mu$ 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ ；并利用有限元体积法对其进行求解。<sup>[12]</sup>

### 2.2 建立固体力学数学模型

Solid Mechanics 模块是建立在求解运动方程和本构模型的基础上，可根据不同需求调节所使用的平面应力或平面应变假设，并可计算位移、应力和应变等结果。本文借助 Solid Mechanics 模块建立固体力学的微分方程，从而建立闸室结构作业过程的数学模型，为流固耦合的研究做理论和技术铺垫。

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} + \rho a_f = \nabla \cdot (FS)^T + F_v \\ F = I + \nabla u_s \\ S = S_{inel} + S_{el} \\ \varepsilon_{el} = \frac{1}{2} (F_{el}^T F_{el} - I) \\ F_{el} = FF_{inel}^{-1} \\ S_{inel} = J_i F_{inel}^{-1} (C : \varepsilon_{el}) F_{inel}^{-T} \\ S_{inel} = S_0 + S_{ext} + S_q \\ \varepsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u_s)^T + \nabla u_s + (\nabla u_s)^T \nabla u_s] \\ C = C(E, \nu) \end{array} \right. \quad (2)$$

上式是闸室结构力学的数学建模过程，其中包括闸室结构力学的微分方程，虎克定律和闸室结构应变与位移等关系式；且  $S$  是应力， $S_0$  预应力， $S_{ext}$  外部应力， $S_q$  粘性应力， $u_s$  为结构速度， $F$  为体积， $\varepsilon$  总应变。利用上述数学模型构建闸室结构进行计算分析。

### 2.3 建立流固耦合模型

流固耦合力学研究对象是变形固体在流场作用下的各种行为以及固体变形对流场的影响。其重点是两相介质之间的交互作用即固体在流体载荷作用下会产生变形或运动而固体变形或运动又反过来影响流场从而改变流体载荷的分布和大小从而产生流固耦合现象<sup>[13]</sup> 本文将闸室流场与闸室结构相结合，采用 COMSOL 构建流-固耦合数学模型如下：

$$F_A = [-pI + K] \cdot n \quad (3)$$

### 3 边界条件

闸室流场的边界条件包括进出口，壁和自由面四种类型，其中与坝前水库水体相接面为入口边界面，下游相接面为出口边界面，水流波动面为自由边界面，其余为壁边界。具体设置为：

- ① 进口边界设置为质量流进口；
- ② 出口边界设置为压力出口，计算域水体参考压力设置为静水压力如（4）式所示：

$$p_f = \rho g \Delta h \quad (4)$$

- ③ 壁边界设置为无滑移墙；
- ④ 自由面边界设置为稳态自由液面。

流场模拟类型为瞬态分析，分析时长为 60s，子步时长为 0.01s，重力加速度为 9.8066m<sup>2</sup>/s，坝内水流初始条件为静止状态，速度为 0m/s，静水压力为  $p_f = \rho g \Delta h$ 。闸室结构在初始状态下的结构速度场和位移场均为 0m。在闸室底板与坝基相接的齿墙设置固定约束边界，

### 4. 数据分析

通过构建上述数学模型和边界条件在 COMSOL 软件运行并计算得到以下仿真数据。

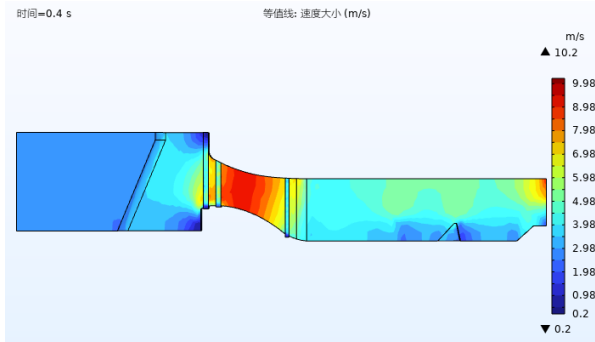


图 2 t=0.4s 时水体流速

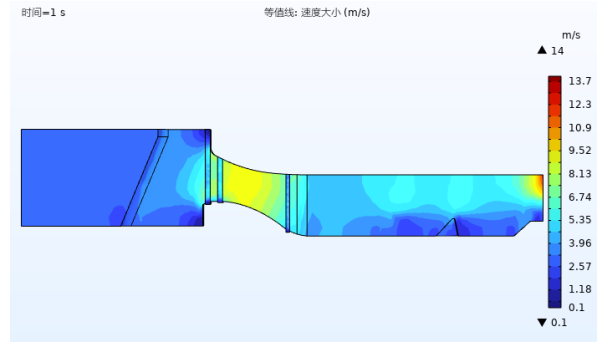


图 3 t=1s 时水体流速

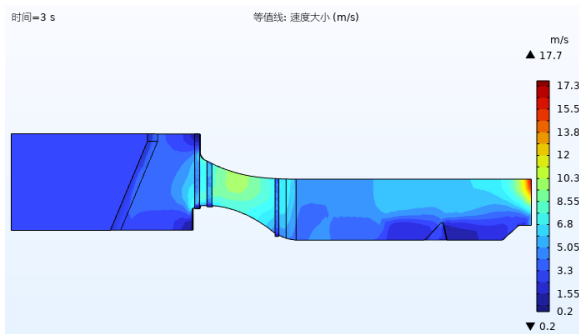


图 4 t=3s 时水体流速

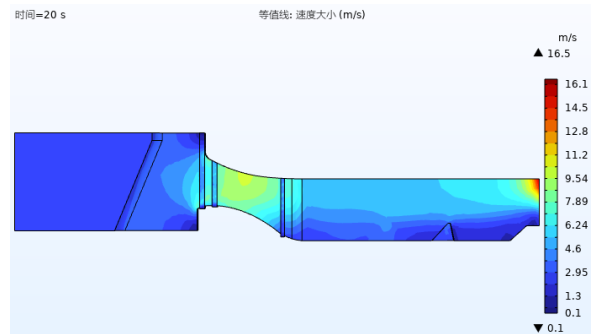


图 5 t=20s 时水体流速

上述图 2~ 5 是随时间进程流场中的水流速度。当  $t=0.4s$  时，水流速度最快的部位在于闸室内，水库中水流速度在  $2m/s \sim 7m/s$  之间，而消力池的水流速度则在  $3m/s \sim 9m/s$  之间，如图 2 所示；随着时间的推移，水库和闸室内的水流速度基本在  $t=1s$  之后基本保持不变，如图 3 所示；而消力池中的水流则在  $t=3s$  时达到最高速度，其尾部速度最大，达到  $17.7m/s$ ，如图 4 所示；然后缓慢保持平衡，在  $t=20s$  之后泄洪闸室内水流速度不会在发生变化，其速度最大处为消力池尾部，数值为  $16.5m/s$ ，如图 5 所示。

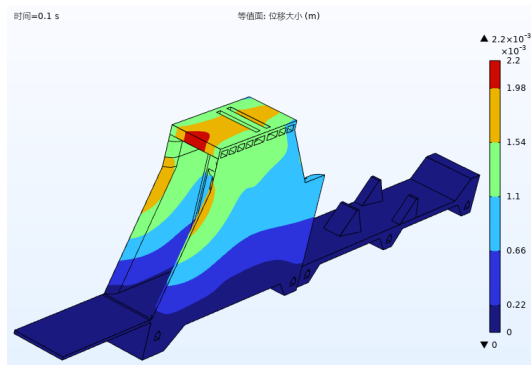


图 6 t=0.1s 时形变总位移

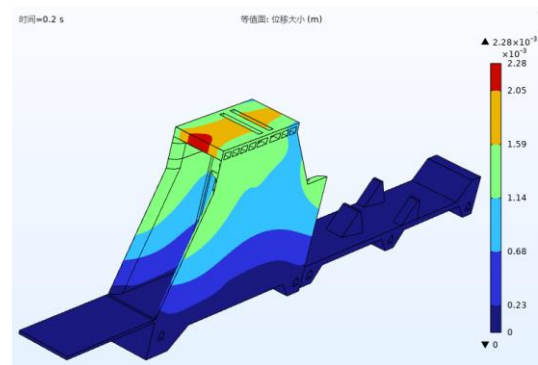


图 7 t=0.2s 时形变总位移

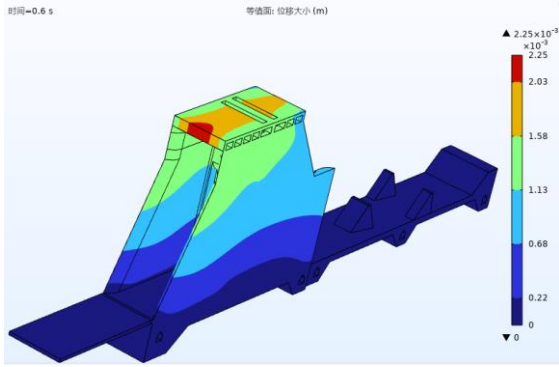


图 8 t=0.6s 时形变总位移

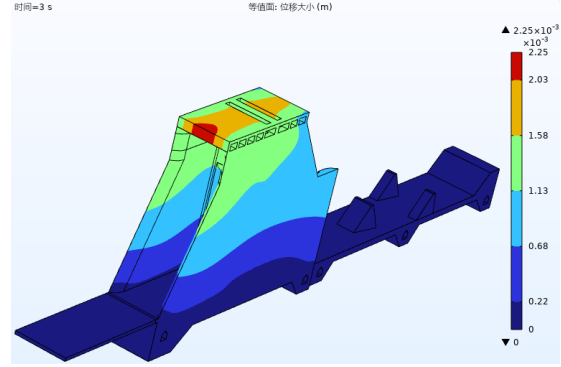


图 9 t=3s 时形变总位移

上述图 6~9 是随时间进程流场中闸室的形变总位移，当  $t=0.1s$  时，闸室的形变总位移在  $0mm \sim 2.2mm$  之间，其中闸室上表面及靠近水库的闸墩产生的形变位移最大，其数值为  $2.28mm$ ，而消力池的底板产生的形变总位移则在  $0mm \sim 0.22mm$ ，如图 6 所示；随着时间的推移，靠近水库的闸墩的形变位移逐渐减少，在  $t=0.6s$  闸室的形变总位移之后基本保持不变，此时闸室形变总位移最大处仍为闸室上表面中部，其数值为  $2.25mm$ ，如图 7~9 所示。

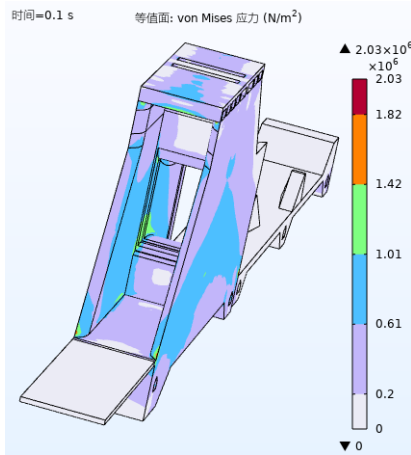


图 10 t=0.1s 时间室应力图

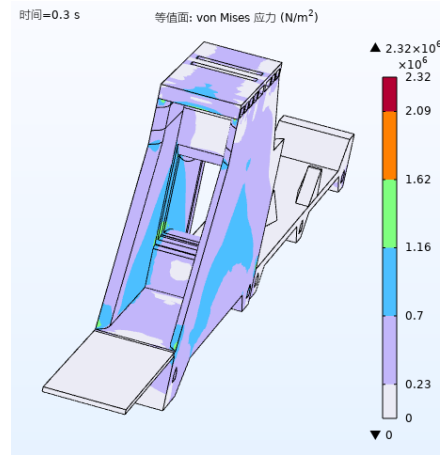


图 11 t=0.3s 时间室应力图

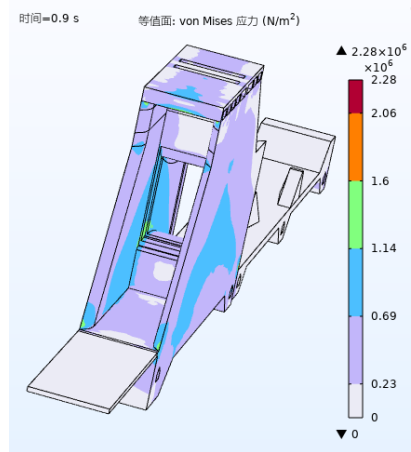


图 12 t=0.9s 时间室应力图

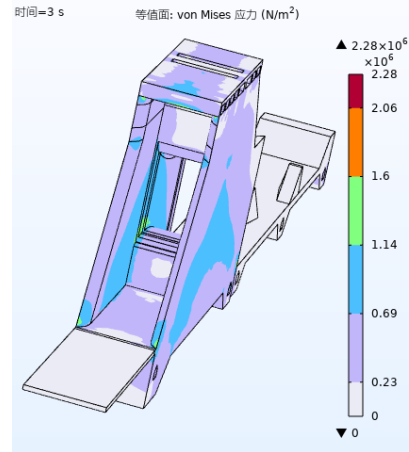


图 13 t=3s 时间室应力图

上述图 10~13 是随时间进程流场中闸室的应力变化图，当  $t=0.1s$  时，闸室的应力变化在  $0Pa \sim 2.03 \times 10^6 Pa$  之间，且与闸室中轴线呈对称分布，其中闸墩与水库接触的底面及闸室顶部与水库水体接触处应力最大，其数值为  $2.03 \times 10^6 Pa$ ，闸墩上呈现中间大并且汪四周扩散逐渐减小

的趋势，其数值在  $0.23 \times 10^6 \text{ Pa} \sim 1.14 \times 10^6 \text{ Pa}$  之间，而消力池的底板产生的应力很小仅在  $0 \sim 0.23 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，如图 10 所示。随着时间的推移，闸室各处的应力分布变化并不大，数值则逐渐增大，当  $t=0.9\text{s}$  之后，闸室应力基本保持不变，其最大值位于闸室的相接的应力集中处，其数值为： $2.28 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，普遍的应力则在  $0.23 \times 10^6 \text{ Pa} \sim 1.6 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，如图 11~13 所示。

通过分析整理仿真的数据，并在模型中设置多个监测点，以监测在流场运动过程中的监测点的相关数据。

## 4 分析影响因素

通过有限元法对泄洪水位工况下多荷载作用的闸室结构动力响应进行分析可以知道，影响闸室应力应变的主要因子有：应变变量，湍流变量张量，剪切力，流固密度比，水压力，水流速度，主应力和闸室结构总位移。

(1) 应变变量：是指闸室结构在外力作用下的几何变化，直接反映了材料的应变状态。

(2) 湍流变量张量：闸室流场为高速流动流场，湍流变量描述了流场的不规则性。它影响流体对固体表面的压力分布，进而影响剪切力和水力荷载，导致更大的形变和内部应力。

(3) 剪切力：是由于流体流动对固体表面的摩擦产生的力，直接影响固体结构的局部应力分布，特别是在边界层区域。高剪切力可能导致局部应力集中，对闸室结构的耐久性构成威胁。

(4) 流固密度比：比较流体与固体的密度，对于理解流体动力对固体的影响至关重要。密度比大差异意味着流体动力效应显著，也会对闸室的应力应变产生相应影响。

(5) 水压力：由水流产生的压力，直接影响固体结构的受力状态，是设计阶段考虑强度和稳定性的重要因素。

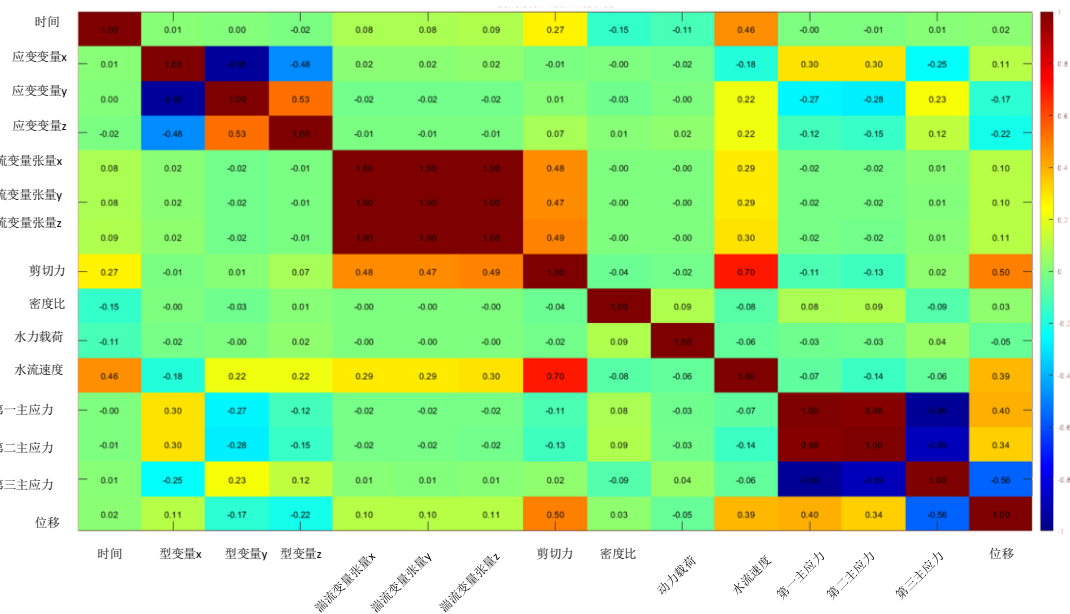


图 14 闸室应力应变的主要影响因素相关性分析

(6) 水流速度：水流速度的增加会导致水力荷载和剪切力的增加，从而影响结构的形变量和内部应力分布。

(7) 第一、第二、第三主应力：是应力张量的三个主成分，代表结构内部三个主要方向上的应力大小。它们决定了材料的应力状态，其中第一主应力通常是最大的，对结构破坏最为关键。在流固耦合中，不同方向上的主应力分布不均可能引起局部疲劳或断裂。



(8) 固体结构形变总位移：是所有形变量的累积效果，影响结构的整体稳定性和功能。

综上所述，这些参数在流固耦合仿真中相互交织，共同决定了闸室结构的响应。为了探究各个影响因子对闸室结构的影响，本文采用 MATLAB 分析并利用热力图来分析各个影响因子之间的相关性，分析结果如图 14 所示：

从图中可以看出，x 方向上的形变变量与第一、第二主应力呈强正相关，相关性均为 0.3，与第三主应力和水流速度强负相关，相关系数为-0.25，-0.18。总位移与剪切力，水流速度为强相关性，相关系数为 0.5 和 0.39，剪切力与水流速度为强相关，相关系数为 0.7，湍流张量变量只与剪切力有强相关性，其与其他影响因子的相关性并不明显，时间与水流速度和剪切力均有正相关性，密度比至于时间有较明显的相关性，相关系数为-0.15，形变量与主应力及闸室结构的总位移均有较明显的相关性。

综上所述，泄洪闸室应力应变的主要影响因子为水流速度，剪切力和形变量，但不能排除其他影响因子对其的影响，因此仍把全部变量作为 BP 神经网络模型的输入层节点个数。

## 5 BP 神经网络重构流场

BP 神经网络的样本由输入数据和期望输出数据组成，旨在解决总位移和应力拟合问题。为此，将闸室结构在激振条件下的总位移和应力数据作为神经网络的目标输出，同时将其对应的其他影响闸室应力应变的物理因素和空间位置坐标作为神经网络的输入。这个过程本质上是利用神经网络来建立输入层和输出层之间的函数关系。

本文选择在闸室泄洪仿真中布置节点模拟监测数据作为样本数据，共选取 10 个均布检测点，每个检测点包含 100 个样本数据，共 1000 个模拟数据，将前 700 个数据作为训练样本，剩余 300 个数据作为预测样本。为了提高神经网络的训练速度，降低因数据尺度不同导致的误差，本文将样本数据进行归一化处理，即将数据映射到[0,1]或者[-1,1]特定区间内组成新的数据集，如下式所示：

$$x = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\min} - x_{\max}} \quad (5)$$

上式中，x 为归一化后的数据； $x_i$  为第 i 个原始数据， $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  分别为数据集中的最大值和最小值。

Robert Hecht-Nielsen 证明了一种连续函数可以通过具有单个隐含层的 BP 神经网络在闭区间内进行逼近。这意味着只需要一个具有 3 层结构的 BP 神经网络就可以实现从 n 到 m 维度的输入输出映射<sup>[14]</sup>。因此，本文中使用的 BP 神经网络也是一个 3 层网络，包括输入层、输出层和一个隐含层。

在神经网络中，适当选择隐含层节点数量是决定网络应用成功与否的重要因素之一，直接影响到网络的泛化能力和训练速度。因此，在构建神经网络时，需要通过实验和经验来确定适当的隐含层节点数量，以平衡网络的表现能力、学习速度和泛化力。

目前经过长期对神经网络的应用，积累大量经验后提出一些经验公式可以确定隐含层节点数的范围，主要有以下的经验公式<sup>[15]</sup>：

$$l = \sqrt{n+m} + i \quad (6)$$

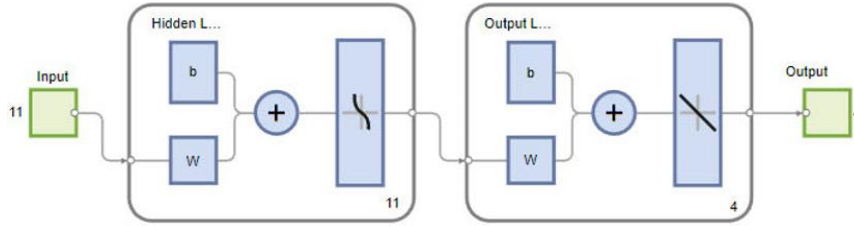


图 15 本文创建的 BP 神经网络分析模型

本文中设定隐含层节点数目为 10 个, 故建立结构为 11-15-4 的 BP 神经网络模型, 如图 15 所示。隐含层的传递函数为'tansig'函数, 输出层的传递函数使用'purelin'函数, 采用梯度下降法训练, 训练函数为'trainlm', 设定神经网络训练的目标误差为 0.001, 最大训练次数为 100 次, 学习速率为 0.01. 根据上述的 BP 神经网络模型, 将仿真采集到的数据样本进行训练, 训练结果如图 16~19 所示:

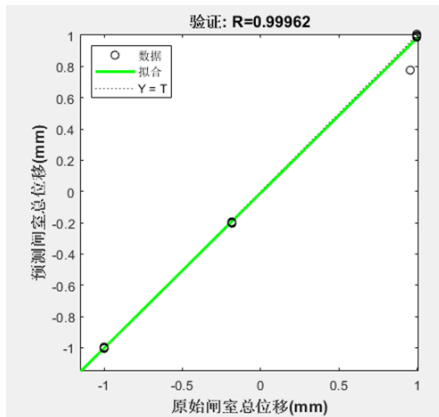


图 16 总位移

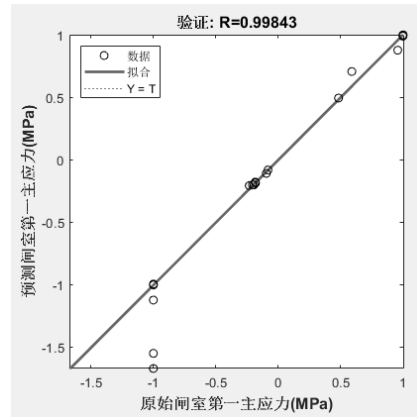


图 17 第一主应力

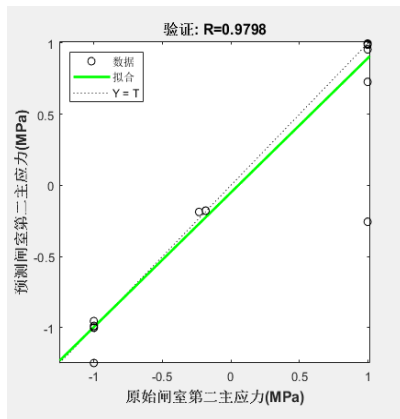


图 18 第二主应力

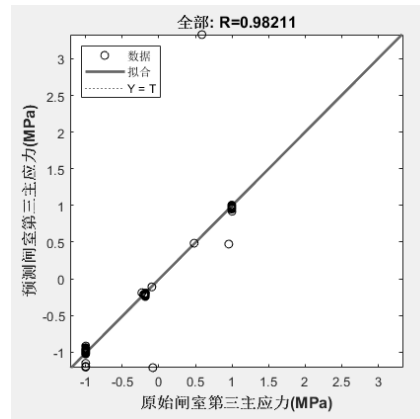


图 19 第三主应力

在 BP 神经网络中, 平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 是两种常用的评估模型预测能力的指标。MAE 指的是是预测值与实际值之间的平均绝对误差, MAE 的数值越小, 表示模型的预测误差越小, 预测能力越好; 而 RMSE 是指预测值与实际值之间的均方根误差, 即误差平方和除以样本数量后的平均值的平方根, RMSE 的数值越小, 表示的预测误差越小, 预测能力越好。

根据图 16 可知, BP 网络模型训练结果显示, 闸室结构总位移和三大应力在 11 个影响因子的影响下, 总位移的平均绝对误差 MAE=0.00013777; 均方根误差 RMSE=0.00016166; 对原始位移与预测位移进行线性拟合, R=0.99962, R 越接近 1 说明该网络模型拟合程度越高。图 17 为第一主应力在 11

个影响因子的影响下的训练结果,第一主应力的  $MAE=9.8185 \times 10^{-5}$ ,  $RMSE=0.00015048$ ,  $R=0.99843$ 。图 18 为第二主应力在 11 个影响因子的影响下的训练结果,第二主应力的  $MAE=0.00019562$ ,  $RMSE=0.00027$ ,  $R=0.9798$ 。图 19 为第三主应力在 11 个影响因子的影响下的训练结果,第三主应力的  $MAE=0.00021878$ ,  $RMSE=0.00028805$ ,  $R=0.98211$ 。

上述误差分析是评估神经网络预测精度和可靠性的关键工具,有助于确保网络预测输出符合预期的精度和可靠性要求,并且评估预测结果的可行性。

## 6 结论

本文依据大藤峡的现有资料利用 Unigraphics NX 建模平台简化并建立几何模型,依托此模型研究激振条件下泄洪流场的力学变化规律,把流场模拟的结果作为影响闸室结构的影响因子,并考虑其对闸室结构的响应分析。利用数值模拟得到的数据作为神经网络的数据样本,对闸室应力应变的影响因素进行相关性分析,进而构建 BP 神经网络对拱坝应力应变进行预测。并得到以下主要结论:

(1) 对泄洪闸室的应力应变特征进行详细研究,分析了时均应力和应变在泄流方向和水深方向的变化。泄洪闸室的时均应力在闸室顶板和闸墩应力集中处为最大,并且从时间上看为先减小后增大再减小最后趋于平稳,其应力在  $0Pa \sim 2.28 \times 10^6 Pa$  范围内波动,波峰最大值为  $2.32 \times 10^6 Pa$ ,而消力池处的应力较小并且变化也不大。闸室结构总位移与泄流激振过程正相关,闸室的形变位移传递方向与水压力分布特征也具有完全的相关性。

(2) 神经网络模型的输入样本包括应变变量因子,水压力因子,剪切力因子等 11 个主要影响因子,采用 MAE、RMSE 和 R 等指标对预测结果进行评估,表明模型在总位移、第一主应力、第二主应力和第三主应力的拟合程度较高,并且模型具有良好的泛化能力和收敛速度。说明模型能够对多数泄洪流道的应力应变特征能够准确预测。

## 参考文献

- [1] 崔广涛, 马斌. 泄流诱发水工结构振动问题的综合集成研讨[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(01):1-10.
- [2] 丁大约, 刘忠德. 弹性地基梁计算理论和方法[M]. 南京: 南京工学院出版社, 1986.
- [3] 彭宣茂, 张子明. 多块基础板与地基的相互作用[J]. 土木工程学报, 1988, (04):84-93.
- [4] 张子明, 彭宣茂, 傅作新. 用链杆法求解中厚度地基上基础板[J]. 岩土工程学报, 1988, (02):9-18.
- [5] 贾东. 厚覆盖层上的水闸三维有限元静力分析和动力响应分析研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [6] 刘冬梅. 闸室结构静动力分析及上部框架优化设计[D]. 南京: 河海大学. 2006: 1-69.
- [7] 赵斌, 吴中如, 张爱玲. BP 模型在大坝安全监测预报中的应用[J]. 大坝观测与土工测试, 1999, (06):1-4.
- [8] 杨杰, 吴中如, 顾冲时. 大坝变形监测的 BP 网络模型与预报研究[J]. 西安理工大学学报, 2001, (01):25-29.
- [9] 吴秀娟. 人工神经网络在大坝监测数据分析中的应用研究[D]. 武汉大学, 2003.
- [10] 吴云芳, 李珍照, 徐帆. BP 神经网络在大坝安全综合评价中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, (01):25-28.
- [11] 董霄峰, 王海军, 杨敏. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的面板堆石坝变形预测[J]. 水利水电技术, 2012, 43(12):22-25.
- [12] 龚成勇, 曾永亮, 李仁年, 等. 泵站前池改造前后水流流态分析及其节能降耗性能研究[J]. 中国农村水利水电, 2022, (05):87-94+100.
- [13] 王学. 基于 ALE 方法求解流固耦合问题[D]. 长沙: 国防科技大学. 2006
- [14] Hecht-Nielsen R. Neurocomputer applications[J]. Springer-Verlag New York, Inc. 1989.
- [15] 张正禄. 工程的变形监测分析与预报[M]. 测绘出版社, 2007