

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250395

# 基于双向流固耦合的泵站钢制流道内非定常湍流振动特性研究

张凤勇<sup>1</sup>, 汪 涛<sup>1</sup>, 赵路静<sup>1</sup>, 张燎军<sup>2</sup>

(1. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为研究泵站钢制流道和非定常湍流相互作用时的振动特性, 基于 ADINA 软件建立了基于钢制流道的泵房—泵—水体全耦合振动分析模型, 研究了全流道流体压力脉动的规律, 分析了钢制流道结构振动位移的时程变化和频谱特性。结果表明, 在钢制流道内流体压力脉动产生于叶轮处并分别向进水流道和出水流道传递; 钢制流道结构的振动特性与流体的压力脉动的规律相似, 从而说明钢制流道的振动主要是受叶轮转动引起的水体压力脉动与流道管壁相互作用的影响。

**关键词:** 钢制流道; 非定常湍流; 脉动压力; 振动特性; ADINA

中图分类号: TV675; TV332

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0163-05

## Study on Unsteady Turbulent Vibration Characteristics of Steel Channel for Pumping Stations Based on Bidirectional Fluid Structure Coupling

ZHANG Feng-yong<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, ZHAO Lu-jing<sup>1</sup>, ZHANG Liao-jun<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydro-electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310002, China;  
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To study the vibration characteristics when the steel flow channel of the pumping station interacts with unsteady turbulence, this article establishes a fully coupled vibration analysis model of pump room-pump-water system with steel flow channel using ADINA software. The law of fluid pressure pulsation in the entire flow channel is studied. The time history and frequency spectrum characteristics of the vibration displacement of the steel flow channel structure are analyzed. The results show that fluid pressure pulsation in the steel flow channel is generated at the impeller and transmitted to the inlet and outlet channels, respectively. The vibration characteristics of the steel flow channel structure are similar to the pressure pulsation of the fluid, indicating that the vibration of the steel flow channel is mainly affected by the interaction between the water pressure pulsation caused by the rotation of the impeller and the pipe wall of the flow channel.

**Key words:** steel channel; unsteady turbulence; fluctuation pressure; vibration characteristics; ADINA

## 1 引言

随着计算流体动力学的不断发展, 对于非定常湍流的研究也逐渐取得了突破性的进展<sup>[1-5]</sup>。赵路静等<sup>[6]</sup>通过建立泵站混凝土结构—钢制流道一体的三维模型, 研究了泵站结构振动的安全评价; 周颖等<sup>[7]</sup>通过对泵站机组反向发电的数值模拟, 研究了导叶、转轮等位置的脉动压力变化规律; 谢伟等<sup>[8]</sup>采用 CAD/CAE 一体化系统对泵站钢制流道进行仿真模拟, 提高了流固耦合数值仿

真的设计—分析—优化效率; 高海司等<sup>[9]</sup>通过 ANSYS 有限元软件和 APDL 命令对叶轮部件的干湿模态特性进行分析, 研究了预应力和金属结构的杨氏模量对叶轮各阶固有频率的影响; 蔡克伦等<sup>[10]</sup>通过模型试验和有限元分析相结合的方式, 研究了内外压力的不同会对结构在湿模态下的固有频率产生影响; 侯程程等<sup>[11]</sup>通过流固耦合的模态分析方法对立式轴流泵站泵房振动的研究, 分析了泵房在水体作用下的应力和变形情况。目前, 关于非定常湍流在水力机械中的研究大都集中于离心泵和水轮机, 且流体流道通常采用混

收稿日期: 2025-03-05, 修回日期: 2025-04-08, 接受日期: 2025-04-10

作者简介: 张凤勇(1990-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为泵站流固耦合、结构抗震等, E-mail: 1554474209@qq.com

凝土结构,大体积混凝土在施工过程中产生大量水化热容易造成裂缝,采用钢制流道大大提高了流道的强度和刚度,降低了施工难度,但采用钢结构的流道受到湍流影响时容易发生振动,因此研究钢制流道和非定常湍流相互作用的振动特性具有重要意义。为此,本文基于 ADINA 软件建立了钢制流道泵站的泵房—泵—水体全耦合三维分析模型,分析了流道内非定常湍流的流场分布及压力脉动传递规律,并研究了钢制流道受到流体脉动压力作用后的振动特性,获得了一些有益的结论,可供借鉴。

## 2 理论与方法

### 2.1 非定常湍流的基本方程

由于泵站流道结构形式非常复杂多变,因此导致流道内流体的流态是复杂的非定常湍流,但其运动规律满足 N-S 方程和连续性方程<sup>[9]</sup>。采用动量形式表达的 N-S 方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

式中,  $x_i, x_j$  均为自变量;  $u_i, u_j$  为流体流速在不同坐标轴方向上的分量;  $F_i$  为质量力;  $\rho$  为流体密度;  $p$  为动水压力;  $\mu$  为流体动力粘度。

连续性方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

### 2.2 RNG $\kappa$ - $\epsilon$ 湍流模型

模拟非定常湍流最关键的是选择合适可行的湍流模型。RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  湍流模型<sup>[11]</sup>为:

$$\rho \frac{D\kappa}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\kappa \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_\kappa - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{\kappa} - R \quad (4)$$

式中,  $\kappa$  为湍流动能;  $\alpha_\kappa, \alpha_\epsilon$  为有效普朗特数;  $\mu_{\text{eff}}$  为有效粘性系数;  $G_\kappa$  为由于平均速度梯度引起的湍动能  $\kappa$  的产生项;  $\epsilon$  为湍流的耗散率;  $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$  为方程中的经验常数;  $R$  为附加项,表示平均应变率对  $\epsilon$  的影响。

### 2.3 双向流固耦合的求解

双向流固耦合考虑了流体和固体的相互作用,更加符合实际情况。双向流固耦合的求解方法有直接求解法和迭代求解法两种,本文采用迭代求解法来分析流固耦合系统。其具体过程见图 1。

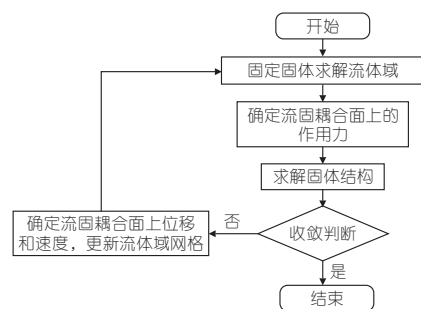


图 1 流固耦合系统迭代求解流程

Fig. 1 The iterative solution process for fluid structure coupling system

## 3 泵站计算模型与参数

### 3.1 全耦合仿真模型

为研究泵站钢制流道与水体的双向流固耦合作用,选取设计工况进行模拟,泵站工程设计流量为  $86 \text{ m}^3/\text{s}$ ,底孔三孔一联共两联,站身共 6 孔,采用  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  箱涵,因此单孔流量为  $14.33 \text{ m}^3/\text{s}$ ,单孔净宽为  $6.5 \text{ m}$ 。站下最低水位  $4.25 \text{ m}$ ,设计水位  $4.75 \text{ m}$ ,站上设计水位  $11.13 \text{ m}$ ,设计工况净扬程  $6.38 \text{ m}$ 。泵站拟采用 2000ZLB-70 型立式轴流泵,叶轮直径为  $1950 \text{ mm}$ ,水泵转速为  $214.5 \text{ rpm}$ 。

在泵站振动过程中,为分析由机械和水力振动对泵站下部结构和钢制流道造成的影响,将电机层以上梁柱结构简化为有效节点质量。本文仅对单个机组段进行建模分析,依据泵、转轴、楼板、墙、机墩、钢制流道及加劲肋板等结构形式,精细划分了有限元网格。其中,泵及转轴等金属结构采用 3D-Solid 单元模拟,钢制流道采用 Shell 单元模拟,加劲肋采用 Beam 单元模拟,泵房混凝土结构采用 3D-Solid 单元模拟,全流道流体采用 3D-fluid 单元模拟。泵站单机组模型共划分 82 594 个单元,104 764 个节点。图 2 为泵站单机组模型纵剖面透视图。

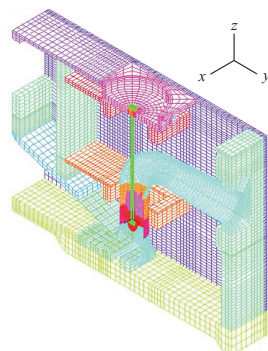


图 2 泵站单机组模型纵剖面透视图

Fig. 2 The longitudinal section model of pump station single unit

全流道流体采用三维流体单元模拟,全流道流体网格沿水流方向划分为 4 个区,包括钢制流道进水口区(进水流道收缩段和弯肘段流体)、叶轮区(导流帽和叶轮周围流体)、固定导叶区(固定导叶周围流体)和钢制流道出口区(出水流道转弯段和平直段流体),4 个区域的流体需采用六面体单元,划分的单元数分别为 32 076、36 695、13 300、54 040 个。图 3 为全流道流体有限元图,具体 4 个子区域的流体有限元网格见图 4。

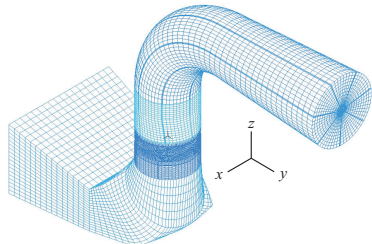


图 3 全流道流体有限元模型

Fig. 3 The finite element model of full channel fluid

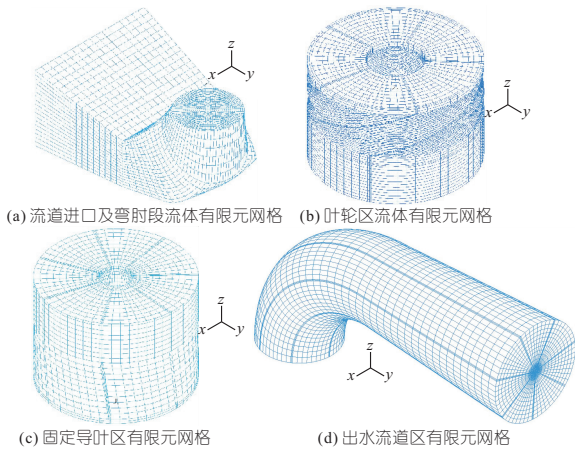


图 4 全流道各区流体有限元模型

Fig. 4 The partition finite element model of full channel fluid

3.2 材料参数与边界条件

泵站在正常运行条件下,泵站结构的材料因机组转动或水力脉动产生的应力一般并非很大,结构材料一般处于线弹性阶段,因此泵站模型中的金属结构和混凝土结构材料均仅考虑材料线弹性阶段,金属结构材料均采用同一种规格的钢材,表 1 为泵站模型中所使用的材料参数。

表 1 材料参数

Tab. 1 The material parameters

| 材料      | 密度<br>/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量<br>/GPa | 泊松比   |
|---------|--------------------------------------------|--------------|-------|
| 金属结构    | 7 800                                      | 210          | 0.300 |
| 泵站混凝土结构 | 2 400                                      | 28           | 0.167 |

对湍流的有限元计算,施加初始条件的合理性对模型的计算尤为重要,良好的初始条件能够促进计算的快速收敛。全流道流体边界为:①进口边界。根据实际的设计流量  $86 \text{ m}^3/\text{s}$ ,可计算

进口断面的流速为  $1.33 \text{ m/s}$ ;进水口断面中心处设计工况下的站下淹没水头为  $5.54 \text{ m}$ ,因此在进口处还要施加淹没水头产生的压力,也视为压应力均匀分布在进口流体断面上;为提高模型的收敛速度,需在流道进口断面施加 RNG  $\kappa\text{-}\epsilon$  湍流模型的初始条件,其中湍动能  $\kappa$  和耗散率  $\epsilon$  为 ADINA 软件中默认的近似公式来计算。②出口边界。出水口断面中心处设计工况下的站上淹没水头为  $3.68 \text{ m}$ ,因此在出口断面处施加淹没水头产生的压力,视为压应力均匀分布在出口流体断面上。③流固耦合界面。采用流固耦合交界面上流体质点和固体质点依附在一起,不考虑他们之间的滑移条件,使得交界面上流体和固体可相互作用,流体的运动作用于固体上,构成了固体结构的动力边界条件,固体结构的变形也会反作用于流体,组成了流体的位移边界条件。因此,在流固耦合界面上应满足动力边界条件和运动边界条件。④内部边界。在泵站钢制流道内,处于旋转运动状态的叶轮周围流体与其他过流部件周围流体存在相对滑移运动,因此在叶轮上下区域一定的距离内设置滑移边界,采用滑移网格技术分离动静区域。

3.3 计算方法与步骤

全耦合模型中采用的流体为三维非定常湍流,湍流模型选取 RNG  $\kappa\text{-}\epsilon$  模型。采用滑移网格技术分离动静区域,滑移网格的位置建立在叶轮上下一定区域内,结合动静干涉真实时间法模拟动静干涉。流体用 FCBI-C 单元模拟,并利用 SIMPLEC 算法求解压力耦合方程。

在该泵站正常运行时,转速为  $214.5 \text{ r/min}$ ,转频  $f_n=3.575 \text{ Hz}$ 。为保证模型计算结果的合理性,设置时间步长为  $0.001 \text{ s}$ ,共计算  $8\,000$  步,每个步长转过  $1.29^\circ$ ,需要  $280$  步旋转一周。站上和站下采用设计水位,在设计工况下计算每个时间步固体结构和流体的振动响应。

4 钢制流道内非定常湍流及结构振动特性研究

4.1 钢制流道内非定常湍流研究

由于流道内流体受到旋转作用的影响,脉动压力在靠近流道壁面处的值较大,因此在全流道内共布置  $5$  个压力测点,见图 5。

图 6 为流道内各个部分的流体压力分布,表 2 为全流道流体测点脉动压力的第一、第二主频的频率和幅值。由表 2 可看出, $\#1$ 、 $\#2$  测点的第

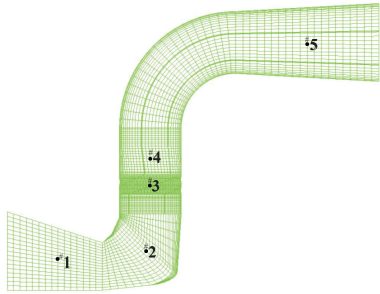


图 5 流道内流体测点布置示意图

Fig. 5 The schematic diagram of fluid measuring point in the channel

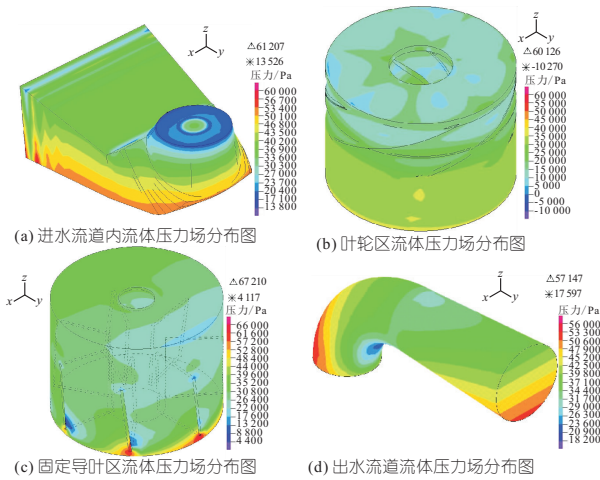


图 6 全流道流体压力分布图

Fig. 6 Full channel fluid pressure distribution diagram

表 2 全流道流体测点脉动压力的频率及幅值

Tab. 2 The pulsating pressure frequency and amplitude of fluid measuring point in the channel

| 测点  | 第一主频    |        | 第二主频    |        |
|-----|---------|--------|---------|--------|
|     | 频率/Hz   | 幅值/kPa | 频率/Hz   | 幅值/kPa |
| # 1 | 3. 673  | 0. 138 | 7. 012  | 0. 066 |
| # 2 | 3. 673  | 0. 173 | 7. 012  | 0. 116 |
| # 3 | 17. 702 | 5. 904 | 35. 091 | 1. 816 |
| # 4 | 17. 702 | 0. 157 | 35. 091 | 0. 026 |
| # 5 | 3. 673  | 0. 111 | 7. 012  | 0. 083 |

一主频为 3. 673 Hz,约等于叶轮转频 3. 575 Hz,幅值分别为 0. 138、0. 173 kPa,表明此处流体的压力脉动主要受叶轮转动的影响, # 3、# 4 测点的第一主频为 17. 702 Hz,约等于叶轮转频 3. 575 Hz 与叶片数 5 的乘积,幅值分别为 5. 904、0. 157 kPa,表明叶轮区和固定导叶区流体的脉动压力主要受叶轮转动和固定导叶的相互作用引起的动静干涉的影响, # 5 测点的第一主频为 3. 673 Hz,约等于叶轮转频,幅值为 0. 111 kPa,第一主频和振动幅值较叶轮区流体明显减小,说明叶轮区旋转的流体经过固定导叶的调流作用后,脉动已大幅减弱。在出水流道内,脉动压力沿水流方向持续递减,在接近出口处脉动压力的幅值仅为 0. 111 kPa,说明出水流道受叶片旋转产生的脉动

影响很小。

图 7 为流道内各测点的脉动压力时程变化曲线和频谱分析图。由图 7 可看出:① 5 个测点的时程曲线大都在 5. 0 s 之前波动较大,在 6. 0 s 之后脉动基本达到稳定。② 叶轮处流体 # 3 测点的脉动压力振动幅值最大,并分别向进出水口流道明显递减,表明在钢制流道内流体脉动压力产生于叶轮处分别向进水流道和出水流道传递。

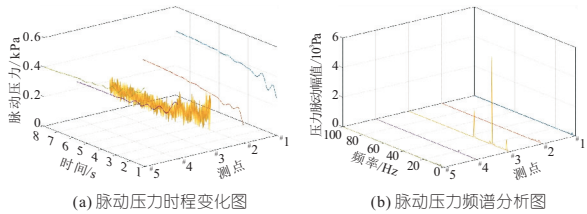


图 7 全流道各测点脉动压力时程变化及频谱分析图

Fig. 7 The fluctuation pressure time history variation and frequency spectrum analysis diagram of measuring point in the channel

4.2 钢制流道结构振动特性研究

选取与全流道流体测点对应位置的 5 个振动位移测点(图 8),表 3 为钢制流道各测点振动位移的第一、二主频的频率和幅值。由表 3 可看出, # 1'、# 5'测点的第一主频约等于叶轮转频,说明这些钢壳测点的位移振动主要与叶轮转动造成的, # 2'~# 4'测点的第一主频均约等于叶轮转频与叶片数的乘积,为叶轮的通过频率,与表 2 对比可知,除 # 2'测点第一主频与对应位置的流体测点压力脉动主频不一致外,其余测点均与流体脉动的主频相等,说明钢制流道的振动主要是受叶轮转动引起的水体压力脉动与管壁相互作用的影响。

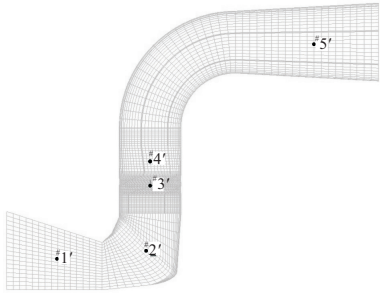


图 8 钢制流道钢壳测点布置示意图

Fig. 8 The schematic diagram of measuring point on steel channel shell

表 3 钢制流道各测点振动位移的频率及幅值

Tab. 3 The vibration displacement frequency and amplitude of measuring point on steel channel shell

| 测点   | 第一主频    |        | 第二主频    |        |
|------|---------|--------|---------|--------|
|      | 频率/Hz   | 幅值/mm  | 频率/Hz   | 幅值/mm  |
| # 1' | 3. 673  | 0. 203 | 7. 012  | 0. 159 |
| # 2' | 17. 702 | 0. 045 | 35. 091 | 0. 023 |
| # 3' | 17. 702 | 0. 071 | 35. 091 | 0. 040 |
| # 4' | 17. 702 | 0. 035 | 35. 091 | 0. 009 |
| # 5' | 3. 673  | 0. 011 | 7. 012  | 0. 008 |

图 9 为钢制流道结构各测点在 7.0~8.0 s 的振动位移时程变化曲线和频谱分析图。由图 9 可看出:①<sup>#</sup>1'测点的波动范围较其他测点明显增大,主要是由于<sup>#</sup>1'测点位于钢制流道进口处,矩形薄钢板结构组成的进水流道刚度较小造成的。②<sup>#</sup>1'测点的第一主频为 3.673 Hz,振动幅值为 0.203 mm,明显大于其他测点,与时程变化图的波动范围相对应。其余各测点的位移振动规律与对应位置的流体脉动压力的脉动规律相似,顺着水流的方向,振动位移的脉动幅值总体呈现以叶轮为中心向两侧递减的趋势,总的来说,钢制流道的振动位移呈现较小的状态,且产生振动的原因与对应位置的流体脉动压力有直接关系。

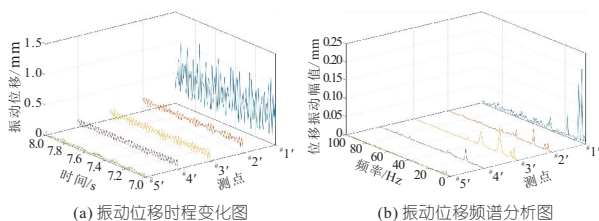


图 9 钢制流道结构各测点振动位移时程变化及频谱分析图

Fig. 9 The vibration displacement time history variation and frequency spectrum analysis diagram of measuring point on steel channel shell

## 5 结论

a. 在进水流道和出水流道内流体由于远离叶轮转动的影响,第一主频约等于叶轮的转频,压力脉动较弱;在叶轮区周围流体压力脉动主频约为叶轮转频与叶片数的乘积,受叶轮转动的影响较为明显,且压力脉动幅值达到最大,分别向进出水口流道明显递减,表明了钢制流道内流体压力脉动产生于叶轮处并分别向进水流道和出水流道传递。

b. 钢制流道的振动特性与流体的压力脉动的规律相似,说明钢制流道的振动主要是受叶轮转动引起的水体压力脉动与管壁相互作用的影响,为泵站钢制流道截断振动传递路径和疲劳验算的研究具有重要的意义。

### 参考文献:

- [1] VU T C, SHYY W. Performance prediction of viscous flow analysis for francis turbine runner[J]. Journal of fluids engineering, 1994, 116(1): P116.
- [2] VU T C, HEON K, SHYY W. An integrated CFD tool for hydraulic turbine efficiency prediction[C]// IAHR Symposium, Paris, France, 1993.
- [3] SABOURIN M, LABRECQUE Y, DE HENAU V. From components to complete turbine numerical simulation[M]//Hydraulic Machinery and Cavitation. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996: 248-256.
- [4] SONG C C S, HE J M, CHEN X Y. Calculation of turbulence flow through a Francis turbine runner and an elbow draft tube[C]//Proceedings of international Power Generation Conference San Diego CA: ASME, 1991.
- [5] VENTIKOS Y, SOTIROPOULOS F, PATEL V C. Modelling complex draft-tube flows using near-wall turbulence closures[M]//Hydraulic Machinery and Cavitation. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996: 140-149.
- [6] 赵路静, 张燎军, 张汉云, 等. 钢制流道立式轴流泵站振动特性分析及安全评价[J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 146-149. (ZHAO L J, ZHANG L J, ZHANG H Y, et al. Vibration characteristics analysis and safety evaluation of steel-made flow passage in vertical axial-flow pumping station[J]. Water resources and power, 2016, 34(1): 146-149. (in Chinese))
- [7] 周颖, 郑源, 何中伟, 等. 大型轴流泵反向发电压力脉动及流固耦合[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(6): 480-485, 490. (ZHOU Y, ZHENG Y, HE Z W, et al. Pressure fluctuation and fluid-solid coupling in reverse power generation of large axial flow pump[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2019, 37(6): 480-485, 490. (in Chinese))
- [8] 谢伟, 陈坚. 基于 CAD/CAE 的泵站装置流固耦合数值仿真[J]. 人民黄河, 2021, 43(10): 114-118. (XIE W, CHEN J. Numerical simulation of pumping station equipment through fluid-structure interaction analysis based on CAD/CAE integration[J]. Yellow river, 2021, 43(10): 114-118. (in Chinese))
- [9] 高海司, 裴吉, 袁寿其, 等. 蜗壳式混流泵叶轮部件湿模态流固耦合分析[J]. 流体机械, 2018, 46(1): 46-51, 5. (GAO H S, PEI J, YUAN S Q, et al. Fluid-structure coupling dynamic analysis for the impeller in a mix flow pump[J]. Fluid machinery, 2018, 46(1): 46-51, 5. (in Chinese))
- [10] 蔡克伦, 刘玉红, 朱亚强, 等. 刚-液-柔耦合结构湿模态试验与仿真分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(23): 128-134, 147. (CAI K L, LIU Y H, ZHU Y Q, et al. Wet modal tests and numerical simulation for a rigid-liquid-flexible coupled structure[J]. Journal of vibration and shock, 2020, 39(23): 128-134, 147. (in Chinese))
- [11] 侯程程, 荐威, 鲁健, 等. 基于流固耦合的立式轴流泵站振动特性数值模拟研究[J]. 江苏水利, 2024(4): 11-15. (HOU C C, JIAN W, LU J, et al. Numerical simulation of vibration characteristics of vertical axial flow pump station based on fluid-structure coupling[J]. Jiangsu water resources, 2024(4): 11-15. (in Chinese))