

# 考虑流固耦合效应的水洞模态分析及试验验证

蒋国庆, 麻越垠, 马斌

(中国空气动力研究与发展中心设备设计与测试技术研究所 绵阳, 621000)

**摘要** 为准确获得某水洞洞体回路的动力学特性,根据流固耦合基本原理,研究了静水状态和工作状态下水洞模态分析流程。首先,分析了2种状态下水洞结构的动力学特性;其次,进行了相应的模态试验;最后,对数值仿真结果和试验结果进行了对比分析。结果表明:考虑流固耦合效应的水洞模态分析模型具有较高的预示精度;该分析流程的关键在于准确获得水洞洞体回路流道内壁的压力分布,而误差产生的主要原因在于该模型难以精确模拟实际结构的刚度分布和质量分布。

**关键词** 水洞;流固耦合;模态试验;动力学特性

**中图分类号** TH113.1

## 引言

水洞应用于先进推进器的性能试验验证,其结构设计时对流场品质和背景噪声提出了高标准、严要求<sup>[1-4]</sup>。实际工程经验表明,地面扰动会降低水洞的流场品质。因此,需要准确获得水洞结构的动力学特性,以便进行高效的减振结构设计。

水洞正常工作时,其内部充满水,因而计算水洞结构的动力学特性需要把水的因素考虑进去。水与水洞结构之间的相互作用为一种典型的流固耦合。目前,报道水洞模态的相关信息较少,而与之接近的结构,如输液管道、充液容器等,则有较多文献进行了相关结构模态研究。

对于输液管道、充液容器等结构,其模态分析方法主要包括理论求解法、声固耦合法、附加质量法及流固耦合法等。Jeong等<sup>[5]</sup>提出了一种部分充水的矩形开口容器固有频率的解析方法,其预测结果与有限元方法具有较高的吻合度。Meng等<sup>[6]</sup>提出了一种提取矩形刚性容器中液体与弹性挡板相互作用时振动特性的半解析数学模型,分析了挡板参数对固有频率、振型和动力响应的影响。理论求解方法通常具有较高的预示精度,但其适用范围有限。陈德锦等<sup>[7]</sup>根据声固耦合基本原理建立了输流管道数值分析模型,分析了内部分别为空气、水和原油时管道的散频特性。肖斌等<sup>[8]</sup>采用附加质量法建立了某输流直管的有限元模型,分析了内流流速对结构振动特性的影响。声固耦合法和附加质量法相对容易

实现,且计算效率较高,但其计算精度难以满足要求。文献[9-12]采用流固耦合方法从不同角度研究了输液管道的动力学特性,分析了管道参数对管道动力学特性的影响。相对于上述3种方法,流固耦合法不仅具有较高的计算精度,也有可接受的计算效率,在相关研究中被越来越多的学者所采用。

笔者针对某立式水洞,根据流固耦合基本原理,研究该水洞在静水状态和工作状态下的模态分析流程,计算其在不同状态下的动力学特性,并开展相应的模态试验,以校核数值仿真结果的准确性,为类似的大型设备的模态分析提供方法借鉴。

## 1 水洞简介

某水洞为一种立式布局的水闭循环设备,由拐角段、稳定段、试验段及轴流泵段等组成,其结构材料为304L。根据水洞三维几何模型,对其进行片体抽取、片体缝合后,采用壳单元对水洞片体几何模型进行网格离散,并根据水洞壁厚分布情况对壳单元赋予相应的厚度。水洞结构有限元模型如图1所示。



图1 水洞结构有限元模型

Fig.1 Finite element model of the water tunnel structure

当水洞内部处于无水状态时,只需采用经典方法对图 1 中水洞结构有限元模型进行模态分析,即可得到无水状态下水洞结构的动力学特性。水洞处于满静水状态或正常工作状态时,水洞内部充满水,水处于静止状态或者流动状态。为了准确获得水洞的动力学特性,需要考虑水与水洞结构之间的流固耦合效应。

## 2 流固耦合基本原理

流固耦合是一种常见的自然现象。随着计算流体力学和计算固体力学的迅速发展,流固耦合相关理论及数值仿真技术广泛应用于水利、航天及化工等领域。基于流固耦合基本原理对水洞结构进行模态分析,其核心在于对水洞流体运动控制方程、水洞结构振动方程及流固耦合方程进行联合求解。

将水洞中的循环流体视为不可压缩流体,其流动控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程及能量守恒方程<sup>[13]</sup>,分别为

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla(\rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_f \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla(\rho_f \mathbf{v} \mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}_f) = \mathbf{f}_f \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_f h_{\text{tot}})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho_f \mathbf{v} h_{\text{tot}}) = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(\mathbf{v} \boldsymbol{\tau}_f) + \mathbf{v} \rho_f \mathbf{f}_f + S_E \quad (3)$$

其中: $t$ 为时间; $\mathbf{f}_f$ 为体积力矢量; $\rho_f$ 为流体密度; $\mathbf{v}$ 为流体速度矢量; $h_{\text{tot}}$ 为流体总焓; $\lambda$ 为导热系数; $S_E$ 为能量源项; $\boldsymbol{\tau}_f$ 为剪切力张量; $T$ 为流体温度; $\nabla$ 表示 Nabla 算子。

$\boldsymbol{\tau}_f$ 可表示为

$$\boldsymbol{\tau}_f = (-p + \mu \nabla \mathbf{v}) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{e} \quad (4)$$

其中: $p$ 为流体压力; $\mu$ 为动力黏度; $\mathbf{e}$ 为应变率张量。

$\mathbf{e}$ 可表示为

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \quad (5)$$

对于水洞结构,其振动方程<sup>[13]</sup>为

$$\rho_s \ddot{\mathbf{d}}_s = \nabla \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s \quad (6)$$

其中: $\rho_s$ 为水洞结构密度; $\boldsymbol{\sigma}_s$ 为柯西应力张量; $\mathbf{f}_s$ 为体积力矢量; $\ddot{\mathbf{d}}_s$ 为水洞结构加速度矢量。

在水洞内部水与水洞内壁的交界部位,需要满足应力、位移等变量相等或守恒<sup>[13]</sup>,即

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}_f \mathbf{n}_f = \boldsymbol{\tau}_s \mathbf{n}_s \\ \mathbf{d}_f = \mathbf{d}_s \\ q_f = q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\mathbf{n}$ 为交界面的单位法向量; $\mathbf{d}$ 为位移; $q$ 为热量;  $T$ 为温度。

本研究根据流固耦合基本原理,分别建立水洞流体动力学模型、水洞结构有限元模型和水洞流固交界面模型,并利用流固交界面模型实现水洞流体动力学模型向水洞结构有限元模型的数据传递,分别对静水状态和工作状态下的水洞进行模态分析。

## 3 水洞模态分析流程及算例

### 3.1 静水状态

静水状态下,水洞内部充满水。在重力作用下,水对水洞洞体承压回路内壁产生了沿竖直方向线性分布的静水压力。静水压力对水洞结构进行作用,改变了水洞结构的刚度,此时水洞结构的模态分析可以处理为含预应力的流固耦合模态分析。

在流体动力学软件中根据水洞洞体承压回路内壁建立水体流动模型,并进行自重状态下的迭代计算。静水状态下水洞内壁压力云图如图 2 所示。把图 2 中的压力加载到图 1 中模型的相应位置并进行静力学分析,再对水洞结构有限元模型进行含预应力的模态分析,即可得到静水状态下水洞结构的动力学特性。静水状态下水洞结构模态分析流程见图 3。

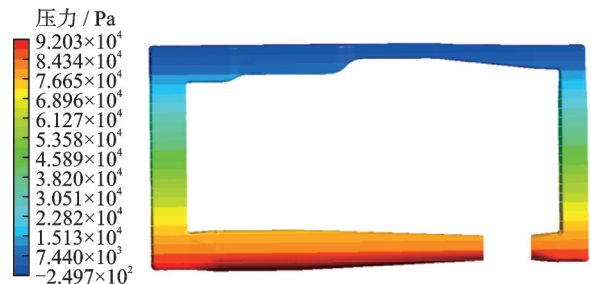


图 2 静水状态下水洞内壁压力云图

Fig.2 Pressure nephogram on inner wall of water tunnel under still water condition

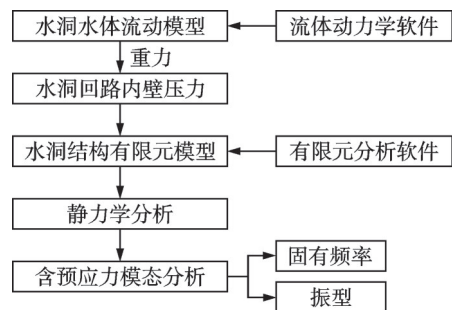


图 3 静水状态下水洞结构模态分析流程

Fig.3 Modal analysis process for the water tunnel structure under still water condition

静水状态下水洞结构前 2 阶固有频率及振型如图 4 所示。由图可知:静水状态下水洞第 1 阶振型主要表现为回路上端相对回路下端的同向摆动,其中第 1 拐角段振幅最大;水洞第 2 阶振型主要表现为回路上端相对回路下端的反向摆动,其中第 4 拐角段振幅最大。水洞回路下端布置有固定支座,且其余支座均为单向滑动支座;回路上端则为自由端。因此,水洞前 2 阶振型表现为回路上端相对回路下端的摆动是合理的。

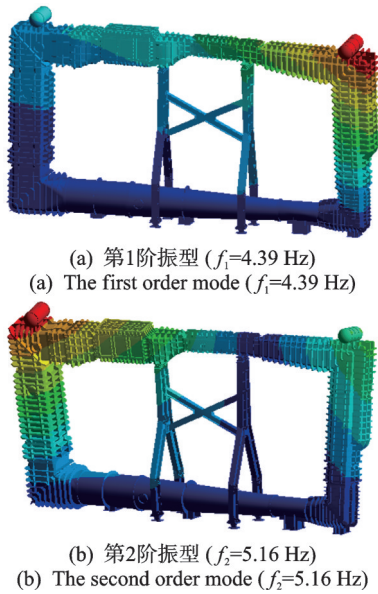


图 4 静水状态下水洞结构前 2 阶固有频率及振型

Fig.4 The first two natural frequency and mode of the water tunnel structure under still water condition

### 3.2 工作状态

工作状态下,水根据试验段的设计流速在水洞洞体承压回路进行循环流动。由于重力、沿程压力损失等因素的影响,水洞各段内壁的压力具有较大的差异。因此,工作状态下水洞结构模态分析的核心在于获得给定流速下各部段的压力分布。水流动状态下,各部段压力分布的计算方法包括双向流固耦合分析和单向流固耦合分析。其中,双向流固耦合分析方法的计算精度相对更高,但其计算成本也相对更高。对于水洞这种大型钢结构而言,为保证结构的流场品质,在设计之初便赋予了洞体结构足够的刚度,即在设计流速范围内水洞洞体回路的变形相对较小。因此,本研究在综合考虑计算精度和计算成本的基础上,采用单向流固耦合分析方法计算各部段的压力分布。

在建立的水洞水体流动模型中,把轴流泵出口

位置设置为速度进口,进口速度根据试验段和轴流泵出口面积的比值确定;把轴流泵进口位置设置为压力出口,根据沿程压力损失、试验段入口目标压力和高程水压计算轴流泵出口压力。利用软件计算试验段不同设计流速下各部段的压力,某工作状态下水洞内壁压力云图如图 5 所示。

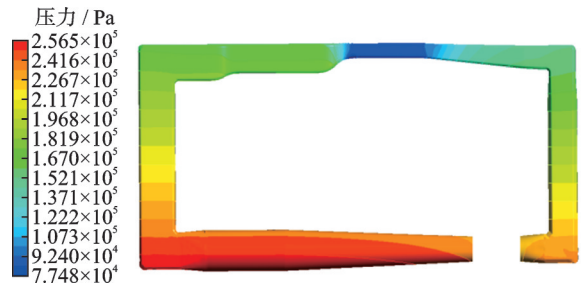


图 5 某工作状态下水洞内壁压力云图

Fig.5 Pressure nephogram on inner wall of water tunnel under certain working condition

把图 5 中的压力加载到图 1 中模型的相应位置并进行静力学分析,再对水洞结构有限元模型进行含预应力的模态分析,即可得到工作状态下水洞结构的动力学特性。工作状态下水洞结构模态分析流程如图 6 所示。

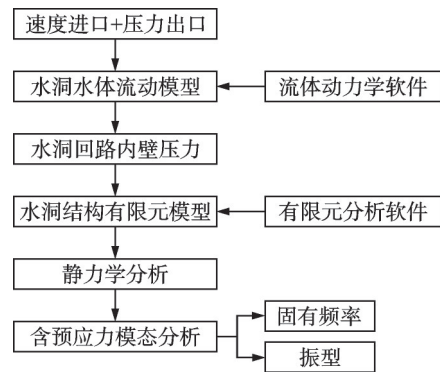


图 6 工作状态下水洞结构模态分析流程

Fig.6 Modal analysis process for the water tunnel structure under working condition

根据分析流程,可得试验段设计流速为 3 m/s 时水洞结构前 2 阶固有频率,如表 1 所示。工作状态下前 2 阶固有振型与图 4 中相应的振型一致。

表 1 设计流速为 3 m/s 时水洞结构固有频率

Tab.1 Natural frequency of the water tunnel structure when the designed velocity is 3 m/s

阶次	固有频率/Hz
1	4.42
2	5.21

## 4 水洞模态试验

### 4.1 试验简介

根据水洞实际结构,设计了水洞模态试验。该试验的主要设备包括若干三轴加速度传感器(INV9832-50)、力锤(最大冲击力幅值为40 kN)、LMS数据采集仪和Test.Lab 18数据采集与分析软件等。水洞模态试验原理如图7所示。

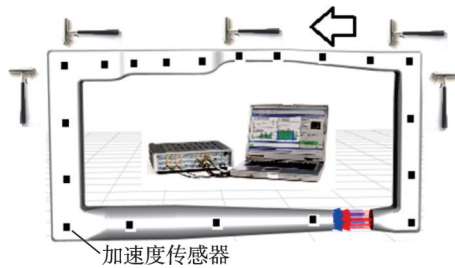


图7 水洞模态试验原理

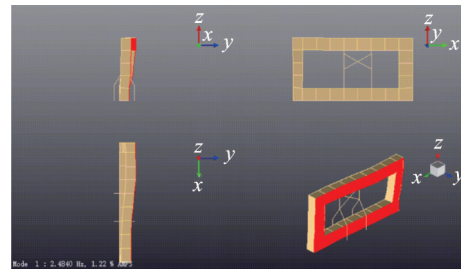
Fig.7 Schematic of the water tunnel modal experiment

试验时在保证安全和不干扰的前提下,把所需的三轴加速度传感器粘贴到洞体表面。由于水洞底部为水平单向滑动支座,底部结构只能沿水流方向滑动,顶部各部段之间为螺栓法兰连接,通过人字支架支撑在地面上。因此,底部布置传感器较少,顶部各部段均布置有传感器。水洞模态试验包括静水模态试验和工作模态试验。试验前在Test.Lab 18软件对应的试验模块中建立试验模型,检查传感器灵敏度设置及信号联通状态,确认无误后开始试验。静水状态下,水不流动,采用移动力锤的方式,敲击激励点并采集所有加速度传感器信号;工作状态下,轴流泵开始运转,当轴流泵转速增至并稳定在150 r/min时(此时试验段入口流速为3 m/s),采集所有加速度传感器信号。试验完成后通过Test.Lab 18数据采集与分析软件对试验数据进行后处理。

### 4.2 试验结果

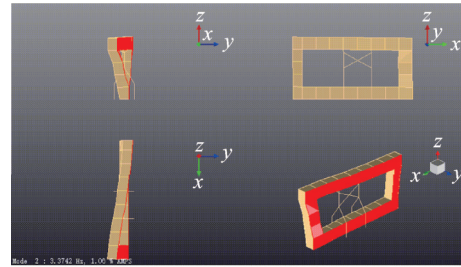
分别对静水状态和试验段流速为3 m/s时的水洞模态试验测量数据进行处理后,可得静水状态下水洞结构前2阶实测振型,如图8所示。工作状态下水洞的前2阶振型与静水状态下的相应振型类似。

2种状态下对水洞的前2阶固有频率的实测值与预示值进行了汇总,如表2所示。由表可知,2种状态下水洞固有频率实测值与预示值的最大误差为15.3%,最小误差为1.2%。对比图4和图8可知,



(a) 第1阶振型

(a) The first order mode



(b) 第2阶振型

(b) The second order mode

图8 静水状态下水洞结构前2阶实测振型

Fig.8 The first two order measured mode of the water tunnel under still water condition

表2 水洞固有频率实测值与预示值汇总表

Tab.2 Measured natural frequency and predicted natural frequency of the water tunnel

固有频率	实测值/Hz	预示值/Hz	误差/%
静水状态1阶频率	3.74	4.39	15.0
静水状态2阶频率	5.07	5.16	1.7
工作状态1阶频率	3.75	4.42	15.3
工作状态2阶频率	5.15	5.21	1.2

2种状态下水洞前2阶振型的实测值与预示值均十分接近。由此可见,考虑流固耦合效应后水洞的动力学特性预示效果比较理想。误差产生的原因主要为有限元模型难以精确模拟实际结构的刚度分布和质量分布。

## 5 结论

1) 基于流固耦合基本原理,分别给出了静水状态和工作状态下考虑流固耦合效应的水洞模态分析流程,分析了2种状态下水洞结构的动力学特性,开展了2种状态下的模态试验,并对比分析了水洞动力学特性实测结果与预示结果的区别。

2) 考虑流固耦合效应的模态分析模型具有较高的预示精度,前2阶振型的实测结果与相应预示结果十分接近,前2阶固有频率的实测值与相应预示值的最大误差不超过16%。

3) 考虑流固耦合效应的结构模态分析流程的关键在于准确获得水洞洞体承压回路内壁的压力分布,其误差产生的主要原因在于模型难以精确模拟实际结构的刚度分布和质量分布。

### 参 考 文 献

- [1] 战培国,王培.国外水洞试验设备建设研究综述[J].航空科学技术,2016(1):1-6.  
ZHAN Peiguo, WANG Pei. Review of foreign water tunnel test equipment construction research [J]. Aeronautical Science and Technology, 2016(1): 1-6.(in Chinese)
- [2] JAROSZEWICZ A. Estimation of MAV unsteady aerodynamic parameters from dynamic water tunnel testing [C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida: AIAA, 2011: 2011-1162.
- [3] DARIUSZ R, MIROSLAW N, ANDRZEJ Z, et al. Neural model of UAV unsteady aerodynamic characteristic from water tunnel test data[J]. AIAA Journal, 2013, 2: 1071-1085.
- [4] FURUICHI N, TERAOKA Y, WADA Y, et al. Friction factor and mean velocity profile for pipe flow at high Reynolds numbers [J]. The Physics of Fluids, 2015, 27: 095108.
- [5] JEONG K H, KIM J W. Free vibration analysis of liquid-filled open rectangular containers[J]. Ocean Engineering, 2015, 99: 72-84.
- [6] MENG X, ZHOU D, KIM M K, et al. Free vibration and dynamic response analysis of liquid in a rectangular rigid container with an elastic baffle[J]. Ocean Engineering, 2020, 216: 108119.
- [7] 陈德锦,严谨,罗杨阳,等.考虑声固耦合效应的输流管道声振特性分析[J].中国舰船研究,2021,16(3):137-143,151.  
CHEN Dejin, YAN Jin, LUO Yangyang, et al. Analysis of vibration and sound characteristics of fluid conveying pipeline considering the effect of acoustic-solid coupling [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(3): 137-143, 151.(in Chinese)
- [8] 肖斌,周玉龙,高超,等.考虑流体附加质量的输流管道振动特性分析[J].振动与冲击,2021,40(15):182-188.  
XIAO Bin, ZHOU Yulong, GAO Chao, et al. Analysis of vibration characteristics of pipeline with fluid added mass [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(15): 182-188. (in Chinese)
- [9] 田新伟,周帅,胡亮,等.基于流固耦合的高压油管振动疲劳特性研究[J].振动、测试与诊断,2018,38(6):1234-1239.  
TIAN Xinwei, ZHOU Shuai, HU Liang, et al. Research on vibration fatigue characteristics of high pressure tubing based on fluid-structure coupling [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1234-1239.(in Chinese)
- [10] 张倩,何文社,杨喜莲,等.气液两相流腐蚀管道流固耦合特性分析[J].热加工工艺,2021,50(22):38-42,48.  
ZHANG Qian, HE Wenshe, YANG Xilian, et al. Analysis on fluid-solid coupling characteristics of gas-liquid two-phase flow corrosion pipeline [J]. Hot Working Technology, 2021, 50(22): 38-42, 48. (in Chinese)
- [11] 赵江,俞建峰,楼琦.基于流固耦合的T型管振动特性分析[J].振动与冲击,2019,38(22):117-123,170.  
ZHAO Jiang, YU Jianfeng, LOU Qi. Modal analysis of T-shaped pipes based on a fluid-structure interaction model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(22): 117-123, 170. (in Chinese)
- [12] HUANG Y M, LIU Y S, LI B H, et al. Natural frequency analysis of fluid conveying pipeline with different boundary conditions [J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(3): 461-467.
- [13] 宋学官,蔡林,张华.ANSYS流固耦合分析与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2012:3-4.



**第一作者简介:**蒋国庆,男,1987年8月生,博士、工程师。主要研究方向为复杂结构分析与设计。曾发表《修正的响应面方法优化螺栓法兰连接结构几何参数》(《国防科技大学学报》2019年第41卷第5期)等论文。

E-mail: jianggq\_cardc@163.com

**通信作者简介:**马斌,男,1984年6月生,博士、工程师。主要研究方向为结构分析与设计、振动测试。

E-mail: 95288450@qq.com