

# 基于流声耦合的调节阀空化噪声数值预测

郑忠良<sup>1</sup>, 陈修高<sup>2</sup>, 谭术洋<sup>3</sup>, 张希恒<sup>2</sup>, 贾建波<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军海军装备部 北京 100841; 2. 兰州理工大学石油化工学院 甘肃 兰州 730050;  
3. 中国核动力研究设计院反应堆系统设计技术重点实验室 四川 成都 610041)

**摘要:** 针对工程应用中调节阀普遍出现的空化以及由其产生的噪声问题, 提出基于流声场耦合的调节阀空化噪声数值预测方法, 首先选择大涡模拟和空化模型对调节阀进行瞬态流场计算, 然后联合声学边界元法利用流场信息计算噪声场特征, 分别数值计算一种轴流式调节阀在空化和无空化工况时的噪声。结果表明: 监测点处的声压级频率响应曲线整体趋势基本一致, 计算结果符合实际规律; 空化工况时的声压级频率响应曲线具有较多的峰值点, 而无空化则较为平稳, 可作为判断调节阀是否产生空化的依据; 数值计算得到的监测点处总声压级与理论预测计算的相对误差低于 7.1%, 证明了数值计算的准确可行性。

**关键词:** 调节阀; 空化; 噪声; 流声耦合; 数值预测

中图分类号: TB533; TB535; TH134 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2018)06-0042-06

doi: 10.3969/j.issn.1673-159X.2018.06.008

## Numerical Prediction and Analysis on Cavitation Noise of Control Valve Based on Fluid – Acoustic Coupling Method

ZHENG Zhongliang<sup>1</sup>, CHEN Xiugao<sup>2</sup>, TAN Shuyang<sup>3</sup>, ZHANG Xiheng<sup>2</sup>, JIA Jianbo<sup>2</sup>

(1. PLA Naval Equipment Department, Beijing 100841 China;

2. College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050 China;

3. Science Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041 China)

**Abstract:** As for the cavitation problem could commonly occurring in the control valve in engineering application and the noise caused by it, a method of numerical predicting the cavitation noise value in the control valve based on the fluid – acoustic coupling method is proposed. And this method was used to numerically calculate the noise of an axial flow control valve in cavitation and no cavitation conditions, respectively. The large eddy simulation and cavitation model were selected by the fluid – acoustic coupling method to calculate the transient flow field of the control valve at first. Then the acoustic boundary element method was used to calculate the noise field characteristics by using the flow field information. The results indicate that the overall trend of the frequency response curve at the sound pressure level of the monitoring point is approximately the same. The sound pressure level frequency response curve in cavitation condition has more peak points. However, no cavitation is more stable, which can be used as the basis for judging whether to generate cavitation in the control valve. The relative error between the total sound pressure level at the monitoring point obtained by the numerical calculation and the theoretical prediction is less than 7.1%, it could prove the accuracy and feasibility of numerical calculations.

**Keywords:** control valve; cavitation; noise; fluid – acoustic coupling method; numeral calculations

收稿日期: 2018-02-18

第一作者: 郑忠良(1978—)男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为核动力系统总体、泵阀科研与设计。

ORCID: 0000-0002-7242-1643 E-mail: zzl98321@sohu.com

引用格式: 郑忠良, 陈修高, 谭术洋, 等. 基于流声耦合的调节阀空化噪声数值预测[J]. 西华大学学报(自然科学版) 2018, 37(6): 42-47.

ZHENG Zhongliang, CHEN Xiugao, TAN Shuyang, et al. Numerical prediction and analysis on cavitation noise of control valve based on fluid – acoustic coupling method[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition) 2018, 37(6): 42-47.

调节阀被广泛应用于石油化工等领域,其主要作用是不断通过调节开度来实现对介质流量、压力的控制,在某些特定工况下由于压力的急剧减小,很容易使阀门内某些位置的压力小于液体的饱和蒸气压而产生空化现象。空化通常会造成阀体材料的剥蚀、振动、噪声,甚至使阀门失效,缩短阀门使用寿命,所以如何准确有效地检测阀门的空化程度,是目前阀门安全检测的主要任务之一。随着近年来声学检测技术的发展,利用空化噪声信号对空化状态程度判别已经成为空化检测的一种手段<sup>[1]</sup>,所以对调节阀空化噪声进行分析预测是非常有必要的。

目前,研究者们已经对空化噪声进行了大量的研究。王勇等<sup>[2-4]</sup>通过实验和模拟的方法研究了离心泵不同空化状态下噪声特性的变化规律;周云龙等<sup>[5]</sup>利用流声耦合法对离心泵的空化噪声进行了数值模拟研究;文献[6-10]对螺旋桨的空化噪声进行了研究,并初步实现了利用声学方法判定空化状态;文献[11-12]利用数值模拟的方法研究了水翼的空化噪声,并用实验进行了验证且结果误差较小。在阀门空化噪声方面,Xin Fu等<sup>[13]</sup>研究了滑阀的空化噪声,指出空化噪声可以用作判定空化过程的良好标志;A. Osterman等<sup>[14]</sup>利用实验研究了液升提升阀中的空化噪声信号,并通过声信号确定空化和无空化状态。而对于利用数值分析方法研究阀门空化噪声却很少,陆亮<sup>[15]</sup>用理论和实验的方法对节流阀空化流动及其噪声进行了研究;杨国来等<sup>[16]</sup>利用CFD(Computational Fluid Dynamics)研究了调节阀内的空化位置,使用理论计算的方法研究了空化噪声的影响因素。实验方法有成本高、周期长、数据少的缺点<sup>[17]</sup>,并不能普遍适用各种阀门,而单纯使用CFD方法研究噪声的准确度不高<sup>[18]</sup>,理论方法也仅能计算某点上的噪声,不能研究整个辐射声场的特征。

本文利用CFD软件和LMS Virtual lab基于流声耦合方法对调节阀空化噪声进行了数值预测,目的是为通过声学信号定量检测调节阀空化程度提供帮助,同时也为工业阀门空化噪声预测研究提供一种新方法,对于工程应用具有重要意义。

## 1 流场计算

### 1.1 几何模型与网格划分

本文以典型轴流式调节阀为研究对象,使用SolidWorks2016建立三维管阀系统模型,并对模型作适当简化处理,管阀系统如图1所示。然后在

ANSYS Workbench提供的DM(Design Modeler)模块中反向建模,抽取阀内部流体流动区域,进行流场计算,流道如图2所示。

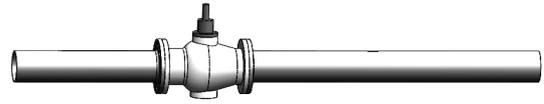


图1 三维管阀系统模型



图2 调节阀的流道及网格划分

利用ANSYS ICEM CFD对调节阀流道区域划分网格,网格采用六面体与四面体混合的网格划分技术,并对阀门内部网格进行局部加密处理,使 $y^+ \leq 30$ ,网格划分结果如图2所示。图3为网格无关性检验,划分不同数量的网格,计算并比较阀门出口的平均质量流量。当网格数量增加至 $5.12 \times 10^5$ 以上后,阀门出口的平均质量流量基本保持稳定,所以网格数量选用 $5.12 \times 10^5$ 。

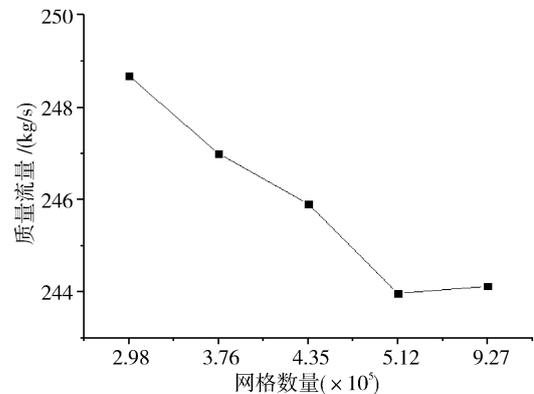


图3 网格无关性检验

### 1.2 数学模型

#### 1.2.1 Navier-Stokes 方程

在对稳态空化流场的数值模拟中,以求解Navier-Stokes方程为基础,方程如下:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p - \frac{2}{3} \nabla (\mu \nabla \cdot \vec{u}) + \nabla \cdot (2\mu \vec{S}) + \rho \vec{f} \quad (1)$$

式中 $\vec{S}$ 是应变速率张量,其表达式为

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

#### 1.2.2 空化模型

空化模型使用Zwart-Gerber-Belamri空化模型,它更能体现出空化核数量对空化行为的影响<sup>[19]</sup>,以及计算结果更加接近于实际值<sup>[4,20-21]</sup>。其控制方

程如下:

当  $P_v \geq P$  时,

$$R_e = F_{\text{vap}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}}(1 - \alpha_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3\rho_1}} \quad (2)$$

当  $P_v < P$  时,

$$R_c = F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2(p - p_v)}{3\rho_1}} \quad (3)$$

式中:  $P_v$  为饱和蒸汽压;  $\alpha_{\text{nuc}}$  为空化汽相成核处体积分分数;  $\alpha_v$  为蒸汽相体积分分数;  $R_e$  为蒸发相生成率;  $R_B$  为空泡半径;  $R_c$  为凝结相生成率;  $F_{\text{vap}}$  为汽化校正系数;  $F_{\text{cond}}$  为凝结校正系数。

### 1.3 计算方法与边界条件

由于本文采用的是流声耦合法, 需要通过流场计算得到激励信息, 再利用得到的流场激励信息进行声场计算。

稳态计算中使用 Mixture 混合模型和 RNG  $k - \varepsilon$  湍流模型, 压力项、密度、动量、湍动能的离散采用二阶迎风格式<sup>[22]</sup>。瞬态流场计算以稳态计算结果为初值, 使用 LES 大涡模拟, 时间步长设置为  $5 \times 10^{-5}$  s, 采样频率为 20 kHz, 根据采样定律, 最大分析频率可达到 10 kHz。

### 1.4 计算结果与分析

分别选取调节阀的空化和无空化工况, 对结果进行分析, 图 4 为调节阀中间面节流处流场计算结果。

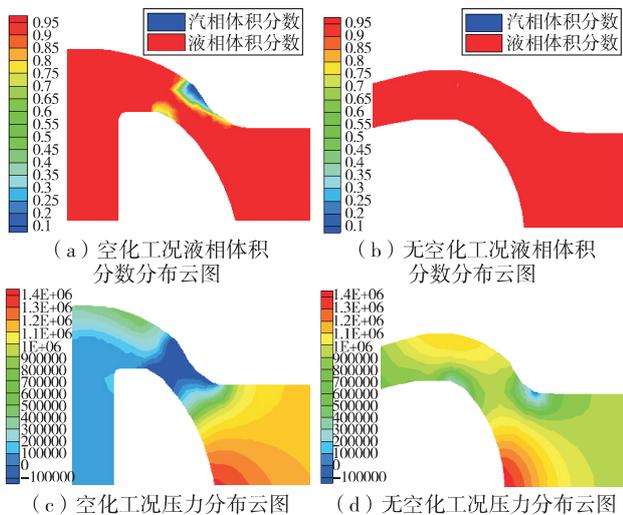


图 4 流场计算结果图

图 4(a) 和 (b) 分别为有空化和无空化工况下液相体积分分数分布云图。由图 4(a) 可以得到空化区域主要发生在阀门节流入口处, 而在接下来的流道拐角处汽相区域达到最大。图 4(c) 为阀门空化工况节流处压力云图。由于在截流入口处流通面积

突然减小, 流体流动速度急剧增大, 同时流体流动的方向发生改变而产生边界层分离, 在这个部位出现负压区, 使得调节阀内流体通过此处时低于液体饱和蒸气压而产生空化。而在无空化工况时, 如图 4(d) 所示, 节流处的压力明显高于液体饱和蒸气压, 不会产生空化现象。

## 2 声场计算

### 2.1 声类比理论方程

在完成瞬态声源信息提取计算后, 需要将流场和声场两个物理场联系起来, 利用声类比理论通过流场声源信息计算流致噪声, 其方程如下:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} [(p' \delta_{ij}) \frac{\partial f}{\partial x_j} \delta(f)] + \frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta(f)] \quad (4)$$

式中:  $T_{ij} = \rho u_i u_j + (p' - c_0^2 \rho') \delta_{ij} - \sigma_{ij}$ , 为 Lighthill 应力张量;  $\rho' = \rho + \rho_0$ ,  $\rho$  和  $\rho_0$  分别是受扰动时和未受到扰动时的流体密度;  $c_0$  为等熵条件下的声速;  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 函数;  $u_i$  为流体速度;  $p'$  为流体所受到的压强变化量;  $f$  为边界控制函数。

### 2.2 声场计算网格模型

声场计算使用边界元法, 声学网格与结构网格划分如图 5 所示, 结构与声学网格为四面体类型, 声学网格即为结构网格的外壁面。在划分声学网格时, 网格大小要一致。

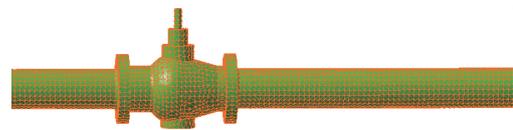


图 5 声学与结构网格划分

为了计算调节阀外部辐射声场, 还需要设置场点网格<sup>[23]</sup>。场点网格设置结果如图 6 所示, 场点网格为两个互相垂直的平面<sup>[24]</sup>, 网格类型为正方形。

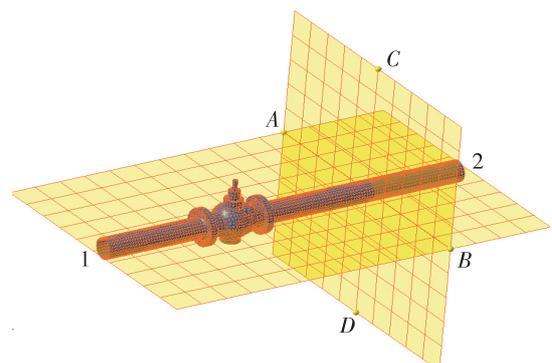


图 6 场点网格与监测点设置

根据最新标准《IEC 60534 - 8 - 2 - 2015 工业过程控制阀 第 8 - 2 部分噪声的考虑:通过控制阀的流体产生的噪声的实验室测量》中关于监测点设置的规定,设置 4 个监测点 A、B、C、D,如图 6 所示,与阀门出口距离为 1 m,且与管道壁面距离为 1 m。

### 2.3 结构模态计算与结果分析

模态是结构材料和约束的综合结果反映<sup>[25]</sup>,计算调节阀外部辐射声场要利用流场信息激励管阀系统内壁,通过管阀系统的结构材料和约束最后得到外部噪声,所以需要先计算管阀系统的结构模态。设置管阀系统结构材料属性:杨氏模量为  $1.75 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,泊松比为 0.3,密度为  $7800 \text{ kg/m}^3$ 。根据调节阀的实际使用工况,对调节阀的管阀系统根据实际工况条件添加约束,进口管段 1 固定,出口管段 2 简支,如图 5 所示。

表 1 为调节阀管阀系统的前四阶固有频率,其中一阶固有振动频率为 41.52 Hz。图 7 为调节阀管阀系统的前四阶模态振型图,由模态振型图可知一、二阶模态振型主要表现为阀门流道方向振动,三阶模态振型主要表现为阀门沿垂直于流道方向振动,四阶模态振型主要表现为管阀摆动和扭转振动组合。

表 1 前四阶管阀系统固有频率

模态	1	2	3	4
固有频率/Hz	41.52	41.63	148.36	164.05

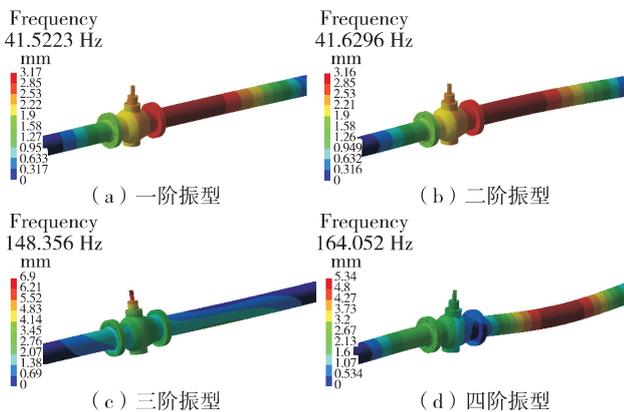


图 7 管阀系统的四阶模态振型图

### 2.4 声学响应计算与结果分析

外部辐射声场流体域为空气,将声学网格的流体材料设置为空气,密度为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,声速为  $340 \text{ m/s}$ 。将流场激励信息通过快速傅里叶变换 (FFT, Fast Fourier Transformation) 转移至结构网格上,并将时域数据转化为频域,最后进行声学响应计算,得到外部声场分布特征以及声压级频率响应

函数。

图 8 为有空化工况 4 个监测点处的声压级频率响应曲线。从图中可以看出,各监测点数值计算结果虽然在具体数值上有点差异,但整体趋势基本一致,这也符合标准中监测点设置的基本原理。从图中可以得出声压级在低频 60、160 和 260 Hz 时具有 3 个明显的峰值点,在中频 820 和 1700 Hz 时有两个峰值点,这些峰值点是调节阀空化噪声的主要组成部分。

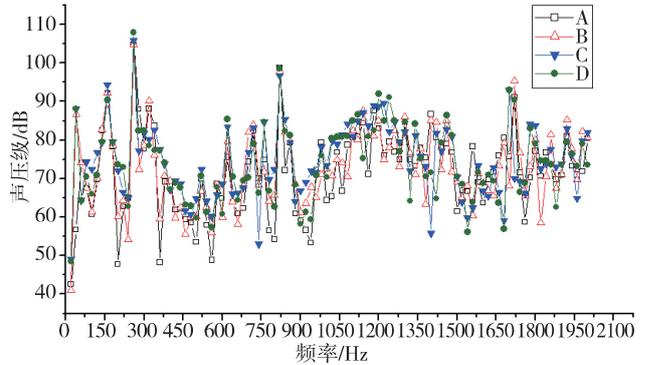


图 8 声压级频率响应曲线

图 9 是调节阀管阀系统在不同峰值点频率下的声压级分布云图。从图中可得,声压级是沿调节阀管阀系统呈现对称分布的,此现象符合噪声辐射实际规律。计算 4 个监测点处的总声压级,如表 2 所示,总声压级在 89.39 dB 上下范围内波动。

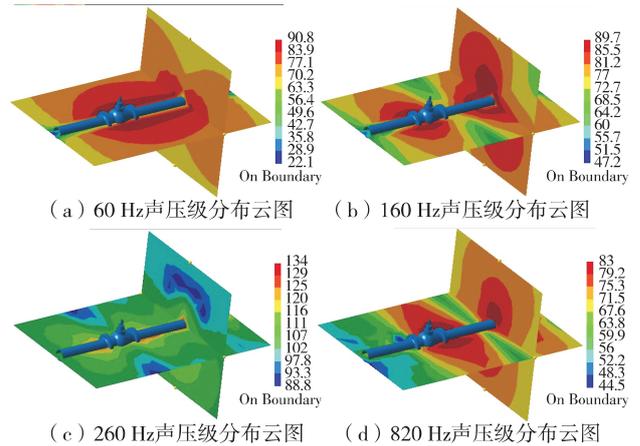


图 9 声压级分布云图

表 2 监测点处总声压级

监测点	A	B	C	D
总声压级/dB	88.78	89.73	89.92	89.13

图 10 为监测点 A 空化和无空化工况的声压级频率响应曲线。由图可以看出,空化工况的噪声峰值点明显多于无空化工况,在 20 ~ 200 Hz 范围内,两者的变化略有差异,但整体趋势基本一致,峰值点

的频率相同,噪声数值上也相差不大。当频率大于 200 Hz 后,空化工况时出现的峰值点较多,而无空化工况曲线整体变化趋势较稳定。考虑到空化过程中伴随着气泡的产生与溃灭,在空化过程中气泡溃灭会释放能量,产生较大的压力脉动,这是产生峰值的一个重要原因。由此可见,多峰值点是空化工况的一个典型特征,且峰值点频率较为固定。

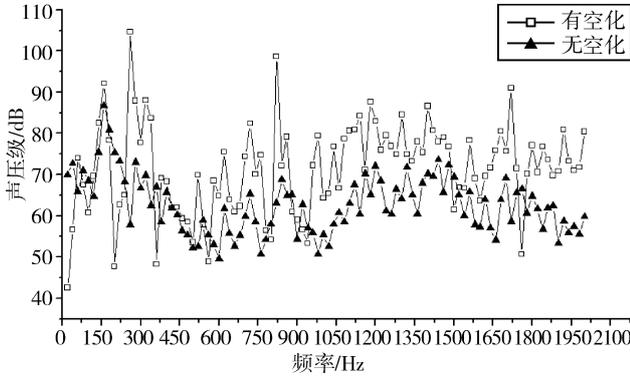


图 10 有空化和无空化工况声压级频率响应曲线

### 2.5 理论预测方法与结果

根据最新标准《IEC60534-8-4-2015 工业过程控制阀 第 8-4 部分噪声的考虑:液体动力流产生噪声的预测》中关于调节阀内有空化流的噪声计算方法如下<sup>[26]</sup>。

空化流状态下频率为  $f_i$  的内部声压级为

$$L_{pi}(f_i) = L_{pi} + 10 \log_{10} \left[ \frac{\eta_{turb}}{\eta_{turb} + \eta_{cav}} 10^{0.1F_{turb}(f_i)} + \frac{\eta_{turb}}{\eta_{turb} + \eta_{cav}} 10^{0.1F_{cav}(f_i)} \right] \quad (5)$$

频率为  $f_i$  时的传播损失为

$$TL(f_i) = TL_{fr} + \Delta TL(f_i) \quad (6)$$

频率为  $f_i$  时外部 1 m 处的声压级为

$$L_{pe,1m}(f_i) = L_{pi}(f_i) + TL(f_i) - 10 \log_{10} \left( \frac{D_i + 2t_s + 2}{D_i + 2t_s} \right) \quad (7)$$

外部 1 m 处总声压级为

$$L_{pAe,1m}(f_i) = 10 \cdot \log_{10} \left( \sum_{i=1}^{33} 10^{[L_{pe,1m}(f_i) + \Delta L_A(f)]/10} \right) \quad (8)$$

式中:  $L_{pi}(f_i)$  为  $f_i$  频率下的内部声压级;  $L_{pi}$  为内部声压级;  $\eta_{turb}$  和  $\eta_{cav}$  分别是紊流和空化流状态下的声效率系数;  $F_{turb}(f_i)$  和  $F_{cav}(f_i)$  分别为紊流和空化流状态下频率分布函数;  $TL_{fr}$  为环形频率最小传播损失;  $\Delta TL(f_i)$  为修正  $f_i$  的传播损失;  $D_i$  和  $t_s$  分别为下游管道内径和管道壁厚;  $\Delta L_A(f_i)$  为“A”权重因子。

利用以上理论预测方法,计算距离阀门出口为

1 m,且距离管道壁面为 1 m 处有空化流和无空化流的总声压级,如表 3 所示。图 11 为理论预测和数值计算结果对比图。

表 3 理论计算总声压级

工况	有空化流	无空化
总声压级/dB	83.46	62.16

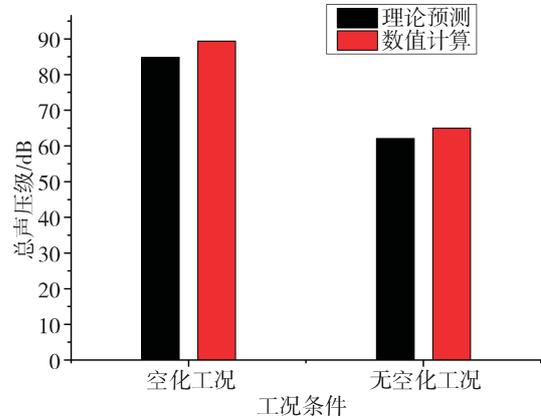


图 11 理论预测与数值计算结果对比图

计算通过理论预测得到的结果与数值计算结果相对误差,空化工况下为 7.1%,无空化工况下为 4.6%,证明了数值计算的准确可行性。从图 11 中可以看出,数值计算结果大于理论预测计算结果。由于在数值计算时对模型进行了简化处理,对结构材料和结构约束的定义不完备,造成数值计算具体结果与实际情况存在误差,后期可以通过具体化模型、细致化定义减小误差。

### 3 结论

1) 本文介绍了基于流声耦合的阀门空化噪声数值计算方法的具体流程,并运用此方法计算了一种轴流式调节阀空化和无空化工况时的噪声,通过对计算结果中监测点处频谱特征和声压级分布云图的分析,结果符合实际规律。

2) 当频率大于 200 Hz 时,空化工况的峰值点较多且频率较为固定,主要出现在低频 260 Hz、中频 820 和 1 700 Hz 附近。而无空化工况时响应曲线较为平稳,可用无空化工况时的声压级频率响应为基准,通过声学检测技术监测特定频率下峰值声压级,来判断阀门是否产生空化。

3) 将数值计算得到的监测点处总声压级与理论预测计算得到的总声压级进行对比,结果显示两者之间相对误差较小,证明了数值计算的准确可行性。

## 参 考 文 献

- [1] 刘进, 阎兆立, 程晓斌, 等. 基于空化辐射噪声的检测方法实验研究[J]. 应用声学, 2014, 33(1): 60-65.
- [2] 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 叶片数对离心泵空化诱导振动噪声的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(11): 1405-1409.
- [3] 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 离心泵非设计工况空化振动噪声的试验测试[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 35-38.
- [4] 王勇, 赵宇琪, 董亮, 等. 基于流声耦合的超低比转数离心泵空化特性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 114-123.
- [5] 周云龙, 吕远征. 基于流声耦合的离心泵空化流动噪声特性研究[J]. 化工机械, 2016, 43(1): 83-88.
- [6] 谢骏, 笪良龙, 胡均川. 舰船螺旋桨空化低频辐射噪声时域仿真[J]. 声学技术, 2011, 30(4): 364-368.
- [7] 谢骏, 笪良龙, 唐帅. 舰船螺旋桨空化噪声建模与仿真研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(3): 294-300.
- [8] 杨琼方, 王永生, 张明敏. 不均匀伴流场中螺旋桨空化的黏性流数值模拟和低频噪声预报[J]. 声学学报, 2012(6): 583-594.
- [9] 魏应三, 王永生, 杨琼方, 等. 单叶片桨噪声相移叠加法预报多叶片船舶螺旋桨非空化低频噪声[J]. 声学学报, 2016(3): 390-397.
- [10] 王顺杰, 王易川, 戴卫国, 等. 片空化状态下对转螺旋桨噪声特性仿真分析[J]. 船舶力学, 2014(7): 778-785.
- [11] 阮辉, 廖伟丽, 黄永, 等. 水翼的空化噪声数值预报研究[J]. 西安理工大学学报, 2015(1): 67-71.
- [12] 朱明明, 黄彪, 王国玉, 等. 非正常空化流致噪声的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(11): 933-940.
- [13] FU X, LU L, RUAN X D, et al. Noise properties in spool valves with cavitating flow [C]// Intelligent Robotics and Applications, First International Conference, Icirac 2008, Wuhan, China, October 15-17, 2008 Proceedings. DBLP, 2008: 1241-1249.
- [14] OSTERMAN A, HOČEVAR M, ŠIROK B, et al. Characterization of incipient cavitation in axial valve by hydrophone and visualization[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2009, 33(4): 620-629.
- [15] 陆亮. 液控节流阀中的空化流动与噪声[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [16] 杨国来, 曹文斌, 刘小雄, 等. 调节阀噪声分析与气穴研究[J]. 新技术新工艺, 2013(1): 7-9.
- [17] 王靖宇, 于旭涛, 胡兴军, 等. 汽车外后视镜流致振特性及其流动机理[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(6): 1669-1676.
- [18] 郑荣部, 陈修高, 陈宗杰, 等. 基于 CFD 和 LMS 闸阀气体内漏的数值分析[J]. 甘肃科学学报, 2017, 29(6): 117-120.
- [19] 赵丁选, 王倩, 杜苗苗. 基于 Fluent 角型喷嘴内部空化行为的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(9): 1283-1287.
- [20] 李树勋, 丁强伟, 徐晓刚, 等. 超(超)临界多级套筒调节阀空化抑制模拟研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015(3): 37-41.
- [21] ZWART P J, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics [C]//Fifth International Conference on Multiphase Flow. Yokohama: ICMF, 2004: 1-11.
- [22] LIANG J, LUO X, LIU Y, et al. A numerical investigation in effects of inlet pressure fluctuations on the flow and cavitation characteristics inside water hydraulic poppet valves [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 103: 684-700.
- [23] 卢学军, 王开和. 管道系统振动声辐射的数值计算方法[J]. 机械强度, 2006, 28(2): 170-172.
- [24] 姜燕鹏. 高压降多级降压疏水阀及阀控管道振动噪声特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [25] 詹福良. Virtual Lab Acoustics 声学仿真计算从入门到精通[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013: 336-409.
- [26] IEC 60534-8-4-2015 Industrial-process control valve part 8-3: Noise considerations - Prediction of noise generated by hydrodynamic flow [S].

(编校: 夏书林)