

盲通分支管流致声共振压力脉动传播数值研究

王 民, 蒋刘义, 周临震*, 高刘宇

盐城工学院机械工程学院, 江苏 盐城

收稿日期: 2026年8月4日; 录用日期: 2026年8月28日; 发布日期: 2026年9月3日

摘 要

在管路系统中, 由主管道与盲通分支管组合结构流致声共振引起的压力脉动会沿主管道上、下游传播。然而, 不同分支管结构对压力脉动传播特性的影响尚不明确。本文采用大涡模拟对单盲通分支管与对称盲通分支管内流致声共振进行了数值模拟, 并结合动态模态分解方法分析了空间传播特性。结果表明: 单盲通分支管与对称盲通分支管在流致声共振下的压力脉动传播特性存在显著差异。单盲通分支管内压力脉动受分支管一阶声学模态控制, 并沿主管道上、下游传播。而对称盲通分支管改变了主管道内压力脉动的频率组成, 表现为一阶声学模态与次频共同作用, 其一阶声学模态频率为流场主要脉动成分, 次频及二阶声学模态来源于流动非线性作用下的流声耦合机制, 并促进压力脉动由分支管向主管道传播。这些研究结果为特定工况下复杂管路系统压力脉动传播特性提供了初步认识, 并为后续结构优化研究提供参考。

关键词

盲通分支管, 流致声共振, 压力脉动传播, 动态模态分解

Numerical Investigation of Pressure-Fluctuation Propagation in Flow-Induced Acoustic Resonance of Blind Branches

Min Wang, Liuyi Jiang, Linzhen Zhou*, Liuyu Gao

School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Received: August 4, 2026; accepted: August 28, 2026; published: September 3, 2026

*通讯作者。

文章引用: 王民, 蒋刘义, 周临震, 高刘宇. 盲通分支管流致声共振压力脉动传播数值研究[J]. 现代物理, 2026, 16(5): 163-173. DOI: 10.12677/mp.2026.165018

Abstract

In piping systems, pressure fluctuations induced by flow-induced acoustic resonance in combined main-duct and blind-branch configurations can propagate both upstream and downstream along the main duct. However, the influence of different branch configurations on the propagation characteristics of pressure fluctuations remains unclear. In this study, large-eddy simulations were performed to investigate flow-induced acoustic resonance in single and symmetric blind-branch configurations, and dynamic mode decomposition was employed to analyze the spatial propagation characteristics of pressure fluctuations. The results demonstrate significant differences in the pressure-fluctuation propagation behaviors between the two configurations. For the single blind branch, the pressure fluctuations are primarily governed by the first-order acoustic mode of the branch and propagate along the upstream and downstream directions of the main duct. In contrast, the symmetric blind-branch configuration modifies the frequency composition of pressure fluctuations in the main duct, exhibiting a propagation behavior jointly influenced by the first-order acoustic mode and higher-frequency components. The first-order acoustic mode represents the dominant fluctuation component of the flow field, while the higher-frequency components and the second-order acoustic mode originate from nonlinear aeroacoustic coupling and facilitate the propagation of pressure fluctuations from the branches into the main duct. These findings provide preliminary insights into pressure-fluctuation propagation characteristics in complex piping systems under specific operating conditions and offer a reference for further structural optimization studies.

Keywords

Blind Branch, Flow-Induced Acoustic Resonance, Pressure-Fluctuation Propagation, Dynamic Mode Decomposition

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在管路系统[1]-[3]中,主管道与盲通分支管组成的结构易诱发流致声共振现象。当主管道气体流经分支管开口时,分支管开口前缘处形成剪切层并产生涡旋脱落;若涡旋脱落频率与分支管内部某一声学模态在频率与相位上匹配,就会诱发声共振现象[4]。流致声共振通常伴随着强烈的辐射噪声、结构振动,甚至导致结构疲劳损坏。例如,在核电站沸水反应堆中,蒸汽干燥器在声共振激励下会导致高循环疲劳损伤[5];在天然气管道的分支管中,分支管内诱发的声共振会导致剧烈结构振动[6]。此外,声共振产生的压力脉动不仅局限于分支管内部,还会沿着主管道上、下游进行传播,进一步影响管路结构安全。然而,目前针对分支管内压力脉动沿主管道传播特性的研究仍相对有限。因此,深入研究其压力脉动传播规律对避免结构振动及优化结构设计等具有重要的工程应用价值。

目前,大多数现有流致声共振研究主要集中于声共振发生时分支管内的流场流动、空气声学 and 声共振抑制方法。张辉等[7]通过实验研究了单盲通分支管声共振特性,发现分支管壁面压力脉动的频率分布呈现阶梯状的锁频现象,且随着分支管长度的增长,压力脉动幅值和频率下降,但锁频特征保持不变。Okuyama 等[8]使用粒子图像测速(Particle Image Velocimetry system)技术对声共振流场进行了可视化研究,发现分支管开口前缘涡的脱落频率与壁面压力脉动频率高度一致,表明了涡旋是声共振的气动声源。Jiang

等[9]采用数值模拟方法对单盲通圆形分支管与等效方形分支管的声共振特性进行了对比研究,发现两种结构发生声共振的 St (Strouhal number) 区间一致且发生声共振的机制相似。Xiao 等[10]进一步对单盲通分支管开口处倒角宽度对声共振的影响进行了实验研究,发现无量纲化的壁面压力脉动振幅和 St 随着倒角宽度的增加而显著减小。

本文重点研究单盲通分支管与对称盲通分支管流致声共振下的压力脉动传播特性。首先,采用大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)方法对单盲通分支管与对称盲通分支管的声共振流场进行瞬态数值模拟。随后,提取流场稳定后的压力脉动数据进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)以分析压力脉动在系统中的传播规律。同时,针对 1000 个流场稳定后的对称盲通分支管流场快照数据进行动态模式分解(Dynamic Mode Decomposition, DMD)与统计量处理,以进一步揭示压力脉动的空间分布特征。最后,对比分析单盲通分支管与对称盲通分支管流致声共振下压力脉动传播特性。

2. CFD 数值方法

2.1. 几何模型

本文研究的单盲通分支管几何模型如图 1(a)所示,其主要结构尺寸参考了张辉[7]等针对单盲通分支管实验研究的几何参数($D = 50 \text{ mm}$)。此外,为了对比单盲通分支管与对称盲通分支管在流致声共振激发时主管道内的压力脉动传播特性,在单盲通分支管的基础上进一步对称布置了方形空腔结构(图 1(b))。为降低计算成本并保证流动在进入分支管开口前充分发展,对主管道截取保留了分支管开口上、下游 $5D$ 长度。同时,在分支管前后 $2.5D$ 主管道中心处设置 P_{in} 、 P_{out} 进行压力脉动监测,用于分析压力脉动沿主管道的传播特性。

当流致声共振激发时,单盲通主管内会呈现稳定的四分之一波长特征,其中分支管顶部为声压反节点,开口处为压力节点。故此,在分支管顶部 P_{end} 处设置压力脉动监测点以判断不同工况下流致声共振的激发状态。所有数值模拟采用大涡模拟(LES)方法对流致声共振流场进行瞬态计算。

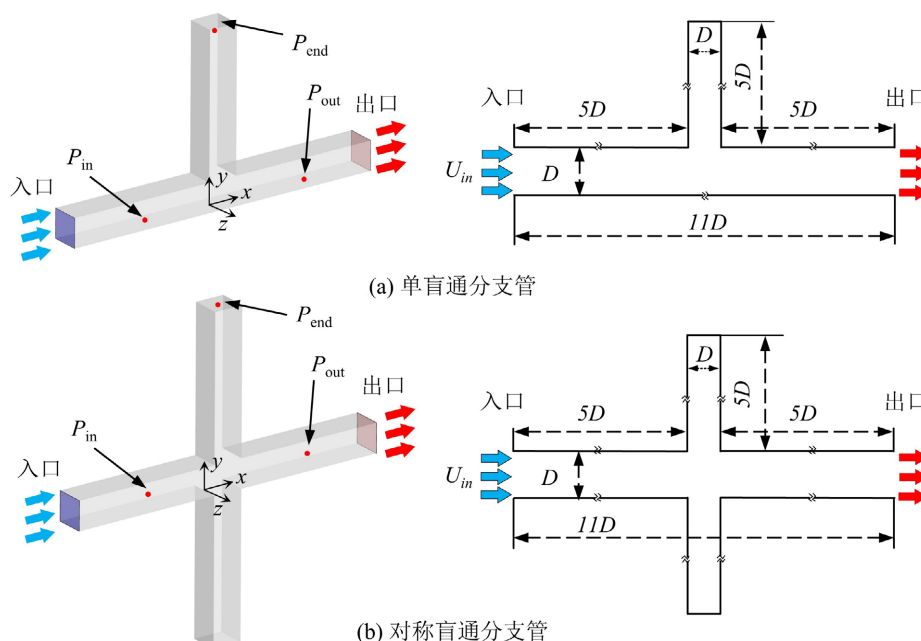


Figure 1. Schematic geometries of the single blind branch and symmetric blind branches
图 1. 单盲通分支管与对称盲通分支管几何模型示意图

2.2. 大涡模拟

LES 通过空间滤波将瞬时流场分解为可解析的大尺度涡结构和不可解析的亚格子(Sub-Grid Scale, SGS)涡结构。其中, 大尺度涡由控制方程直接求解, 小尺度涡则通过亚格子模型进行建模。滤波后的可压缩 Navier-Stokes 方程可表示为:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial[u_i(\rho E + p)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j \sigma_{ij} \right) \quad (3)$$

其中, ρ 为流体密度, u_i 为速度分量, p 为静压, E 为总能量, k 为导热系数, σ_{ij} 为黏性应力张量。LES 滤波过程中引入的亚格子尺度应力张量定义为:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4)$$

其中, τ_{ij} 表征滤波后未解析小尺度湍流对大尺度流动的作用。本文采用壁面自适应局部涡黏模型(Wall-Adapting Local Eddy-viscosity, WALE)建立亚格子尺度模型, 其涡黏系数表达式为:

$$\nu_{sgs} = (C_w \Delta)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (5)$$

其中, C_w 为 WALE 模型常数, 取 0.325; Δ 为滤波尺度; $\bar{S}_{ij}$ 为应变率张量; S_{ij}^d 为速度梯度张量的偏对称部分。WALE 模型能够在近壁面区域自动衰减涡黏系数, 较好地描述壁面附近湍流结构及剪切层演化过程, 因此被广泛应用于流声共振问题的数值模拟研究[11]。

2.3. 计算方法与结果可靠性验证

为验证 CFD (Computational Fluid Dynamics, CFD)数值方法对单盲通分支管内流致声共振流场计算的可靠性, 首先进行了网格无关性验证, 并将计算结果与张辉等[7]实验结果进行对比。如图 2 所示, 计算域采用六面体结构化网格, 网格单元总数约为 87.5×10^4 。为满足 LES 对近壁面流动解析的要求, 设置 $y^+ = 1$ 以解析方形主管道内壁上的边界层流动。此外, 由于分支管开口处存在流动分离引起的涡旋脱落, 对分支管开口处沿用相同的边界层网格进行局部加密。

在数值模拟过程中, 选择 LES 湍流模型进行瞬态计算, 设置流体介质为 ideal-gas, 并根据可压缩介质特性打开能量方程(Energy)。定义主管道入口与出口为质量流量入口(Mass-Flow Inlet)与压力出口(Pressure Outlet)边界条件, 其余计算域壁面设置无滑移(No-slip)边界条件。同时, 压力-速度耦合选择 PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators)算法, 空间离散格式设置二阶迎风格式, 瞬态离散开启二阶隐式格式以提高计算精度。

为验证 CFD 数值方法对流致声共振流场计算的可靠性, 选择 $U_m = 36.49$ m/s 工况下 P_{end} 处压力脉动

信号进行网格无关性验证。如图 3(a)所示,选择 P_{end} 处压力脉动稳定后的数据进行均方根(RMS)处理,当网格数量增加达到 52.5×10^4 后,不同网格之间的压力脉动波动趋于稳定。随后,当网格数量进一步增加到 113.8×10^4 时,其压力脉动计算结果相较于 87.5×10^4 的误差小于 5% 以内,表明继续增加网格数量对计算结果影响较小。因此,本文选取 87.5×10^4 为网格无关解并作为后续数值模拟的计算网格。

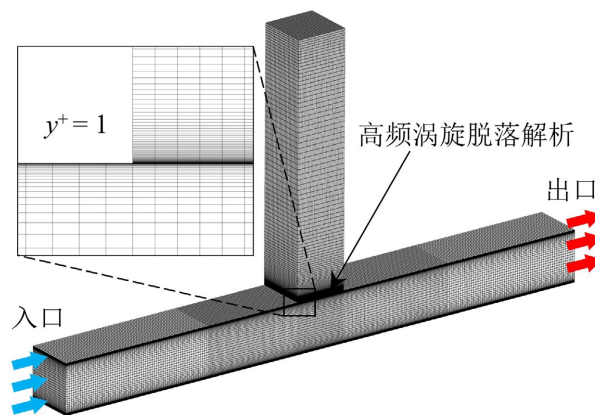


Figure 2. Computational mesh
图 2. 网格划分

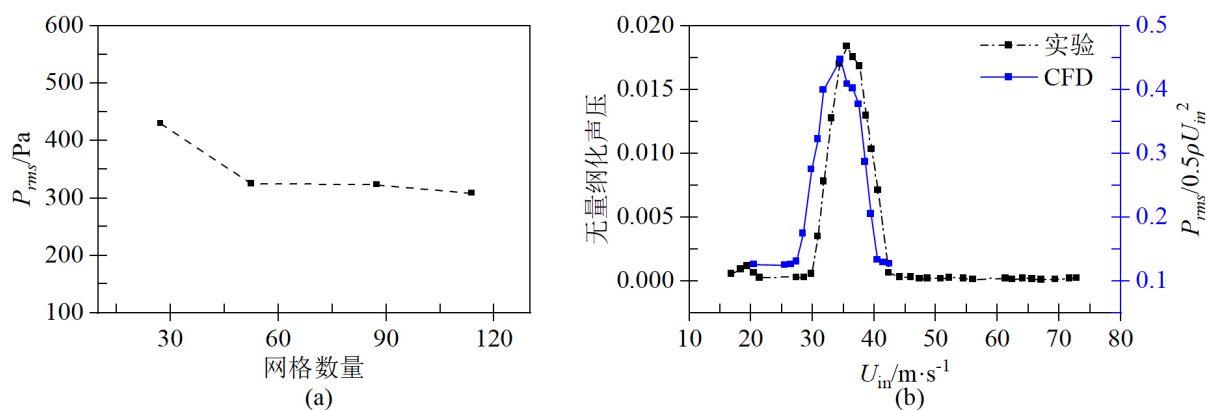


Figure 3. Validation of the numerical simulation: (a) grid independence test; (b) experimental validation
图 3. 数值模拟结果可靠性验证: (a) 网格无关性验证, (b) 实验验证

2.4. 实验验证

在网格无关性验证基础上,进一步采用本文数值方法对张辉等[7]实验得出的高幅值声共振区间进行数值模拟。图 3(b)所示展示了数值模拟得到的 P_{end} 处压力脉动振幅分布与实验结果中声压振幅分布对比结果。需要注意的是,实验中展示的是分支管顶端 P_{end} 处声共振发生时声压振幅分布,而 CFD 数值模拟中展示的是 P_{end} 处流场水动力压力振幅分布,二者所对应的物理量存在一定差异。

CFD 数值模拟结果能够准确捕捉单盲通分支管内高幅值声共振的主要激发区间,其计算得到的共振范围与实验结果基本一致,但相较实验结果存在超前的趋势。这是由于在本文 CFD 数值模拟中,设置了流体域为刚性壁面边界条件,忽略了实验中流体域与分支管薄壁固体域之间的流固耦合影响,使得流致声共振超前激发。综上所述,本文计算结果的网格无关性与实验结果声共振区间的一致性,验证了本文数值方法对单盲通分支管共振流场计算的可靠性。

3. 动态模态分解

动态模态分解(Dynamic Mode Decomposition, DMD)是一种基于数据驱动的流场分析方法,用于从实验或数值模拟得到的时间序列流场数据中提取具有代表性的流场结构及其对应的时间演化特征。假设基于数值模拟得到了 N 个按时间顺序构成的流场快照序列:

$$X_1^N = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\} \quad (6)$$

其中, X_k 为第 k 个时刻的流场状态向量,规定任意两个相邻快照的时间间隔为 Δt 。同时,为描述流场的时间演化关系,将流场快照序列分为两个相邻的子矩阵:

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_{N-1}], \quad X' = [X_2, X_3, \dots, X_N] \quad (7)$$

在 DMD 方法中,假设相邻时刻的流场满足线性关系:

$$X' = A X \quad (8)$$

其中,矩阵 A 包含了流场从时刻 t_k 演化到时刻 t_{k+1} 的时间演化信息。由于线性矩阵 A 的维度通常极高,直接求解困难,因此将快照矩阵 X 进行奇异值分解:

$$X = U \Sigma V^* \quad (9)$$

随后,构造线性矩阵 A 的低阶近似矩阵:

$$A' = U^* X' V \Sigma^{-1} \quad (10)$$

进一步对 A' 进行特征值分解:

$$A' W = W \Lambda \quad (11)$$

其中, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$ 为特征值对角矩阵, W 为特征向量矩阵。由此可构造 DMD 模态,并计算各模态对应的频率:

$$\Phi = X' V \Sigma^{-1} W, \quad f_i = \frac{\text{Im}[\ln(\lambda_i)]}{2\pi\Delta t} \quad (12)$$

其中, Φ 的每一列对应一个 DMD 模态, f_i 表征流场中的一个主导相干结构,为第 i 个模态对应的特征频率。关于 DMD 推导过程和数学形式的全面理解可参考 SCHMID 所著的相关文献[12]。

4. 结果与讨论

4.1. 单盲通分支管与对称盲通分支管的流致声共振特征

当流致声共振发生时,分支管内会形成稳定的声学驻波结构,并伴随压力脉动沿着主管道向上、下游传播。对于理想声学边界条件下的单盲通分支管,其共振频率可用波长公式进行计算。单盲通分支管顶部对应压力反节点,开口处近视为压力节点,因此其声学边界条件满足“四分之一波长”共振形式,其模态频率可表示为:

$$f_n = \frac{(2n-1)c}{4L} \quad (13)$$

其中, f 为模态频率, c 为声速, n 为模态阶数, L 为分支管内气柱长度[5][13]。相对之下,对称盲通分支管两端均为封闭端,分支管两端均对应压力反节点,因此满足“二分之一波长”共振形式,其模态频率可表示为:

$$f_n = \frac{nc}{2L} \quad (14)$$

因此, 单盲通分支管与对称盲通分支管虽然具有相同的几何尺寸, 但由于声学边界条件不同, 其主导声学模态频率存在明显差异。如图 4 所示, 在入口流速 $U_{in} = 36.49 \text{ m/s}$ 下, 单盲通分支管与对称盲通分支管顶端 P_{end} 处均形成稳定的周期性压力脉动振荡, 表明两种结构分支管内形成稳定的流声反馈机制。同时, 值得注意的是, 相同的入口流速下, 对称盲通分支管内产生的压力脉动幅值明显高于单盲通分支管, 表明对称结构能够使得流声共振更加剧烈。

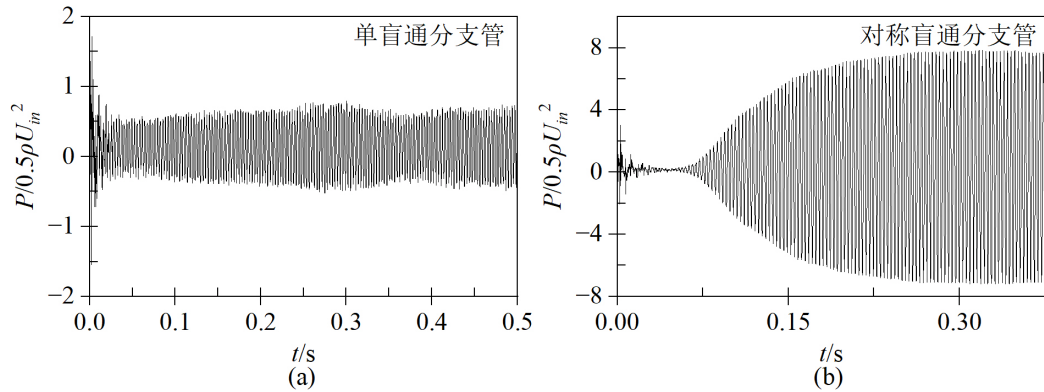


Figure 4. Time histories of pressure fluctuations at $U_{in} = 36.49 \text{ m/s}$: (a) single blind branch; (b) symmetric blind branches
图 4. $U_{in} = 36.49 \text{ m/s}$ 下的压力脉动时域图: (a) 单盲通分支管, (b) 对称盲通分支管

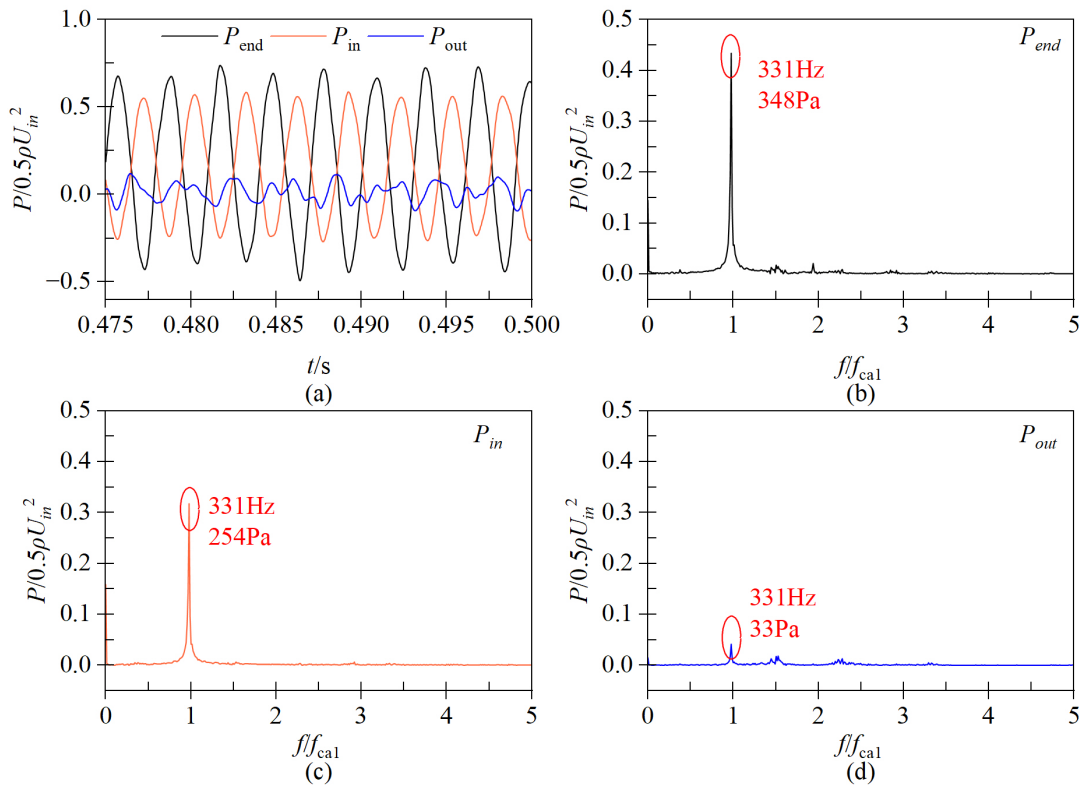


Figure 5. Frequency-domain analysis of pressure fluctuations in the single blind branch at $U_{in} = 36.49 \text{ m/s}$
图 5. 单盲通分支管在 $U_{in} = 36.49 \text{ m/s}$ 下的压力脉动频域分析

为进一步分析单盲通分支管与对称分支管内压力脉动的传播特性, 图 5、图 6 分别给出了两种结构中压力脉动时域与频域特征。其中, 压力幅值采用入口动压($0.5\rho U_{in}^2$)对进行无量纲化, 频率采用各分支管一阶声学模态频率(f_{ca1})进行无量纲化。对于单盲通分支管的声共振流场中, 陷入分支管内(P_{end})的主要压力脉动沿着主管道上、下游(P_{in} 、 P_{out})进行传播, 其中主导频率始终保持为分支管一阶声学模态频率, 表明压力脉动主要由分支管内一阶声学模态控制, 并沿主管道方向传播。

相比之下, 对称盲通分支管中的压力脉动传播表现出明显不同特征, 如图 6 所示, 虽然分支管(P_{end})内压力脉动仍由一阶声学模态主导, 但在主管道不同位置出现了不同频率成分。其中, 主管道上游(P_{in})处同时出现了 327 Hz、639 Hz 频率成分, 而下游(P_{out})处主要表现为 639 Hz 的单一频率。需要注意的是, 639 Hz 并非对称盲通分支管理论本征声学模态频率, 而是一阶声学模态频率的次频分量。根据式(14), 对称盲通分支管两端均满足压力反节点边界条件, 其理论声学模态满足“二分之一”波长驻波形式, 其中允许存在整数阶模态。因此, 对称盲通分支管内部流致声共振不仅激发了一阶声学模态, 更在结构尺寸的特征频率处激发了次频响应。

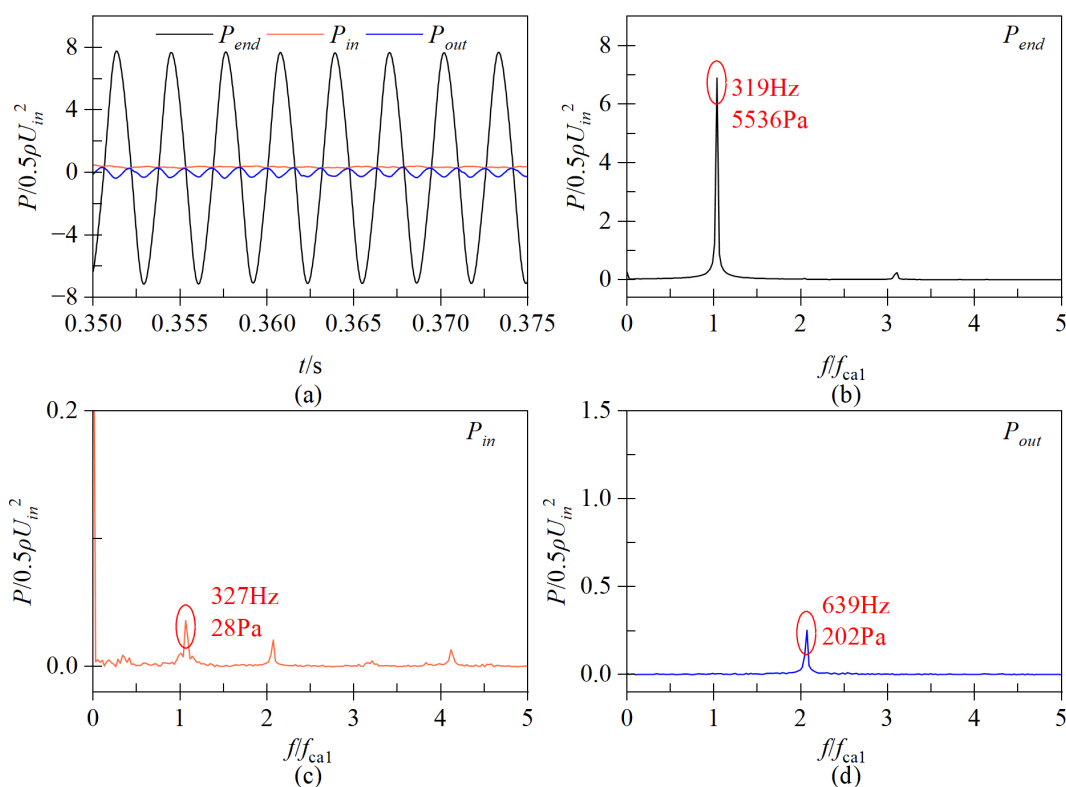


Figure 6. Frequency-domain analysis of pressure fluctuations in the symmetric blind branches at $U_{in} = 36.49$ m/s

图 6. 对称盲通分支管在 $U_{in} = 36.49$ m/s 下的压力脉动频域分析

上述结果表明, 相较于单盲通分支管, 对称盲通分支管不仅能够加剧流声共振强度, 同时改变了压力脉动沿主管道传播过程中的频率组成。因此, 有必要进一步对对称盲通分支管内流致声共振过程中的压力脉动场的空间分布特征进行 DMD 分析。

4.2. 对称分支管声共振流场的 DMD 分析

为进一步揭示对称盲通分支管内声共振流场的各频率压力脉动的空间传播特征与传播机理, 对入口

流速 $U_{in} = 36.49 \text{ m/s}$ 下的压力脉动场进行了 DMD 分析, 如图 7 所示提取了分支管内主要声学模态频率及其次频分量对应的 DMD 模态。

由图 7(a)与图 7(c)观察到, Mode 2、Mode 4、Mode 6 对应的特征值落于单位圆($x^2 + y^2 = 1$)上, 其模态系数随时间呈现出振幅稳定的周期性振荡特征, 表明流场已进入稳定的周期性振荡状态。随后, 由图 7(b)可知, 各 DMD 模态以正负频率模态在复平面在构成了一对稳定的共轭模态, 且流场由对称盲通分支管一阶声学模态频率(Mode 2)主导压力脉动, 一阶次频分量(Mode 4)与二阶声学模态(Mode 6), 零频 DMD 模态($f = 0 \text{ Hz}$)振幅较低, 这表明对称盲通分支管内的具有强周期性振荡的压力脉动场。

此外, 由图 7(d)中的模态能量分布可知, 前 7 阶 DMD 模态累积能量达 99.77%, 说明对称盲通分支管的压力脉动场主要由少数低阶动力学模态控制。因此, 选取主要共轭模态对(Mode 2、Mode 4、Mode 6)进一步分析其空间分布特征, 以揭示压力脉动在主管道中的传播机制。

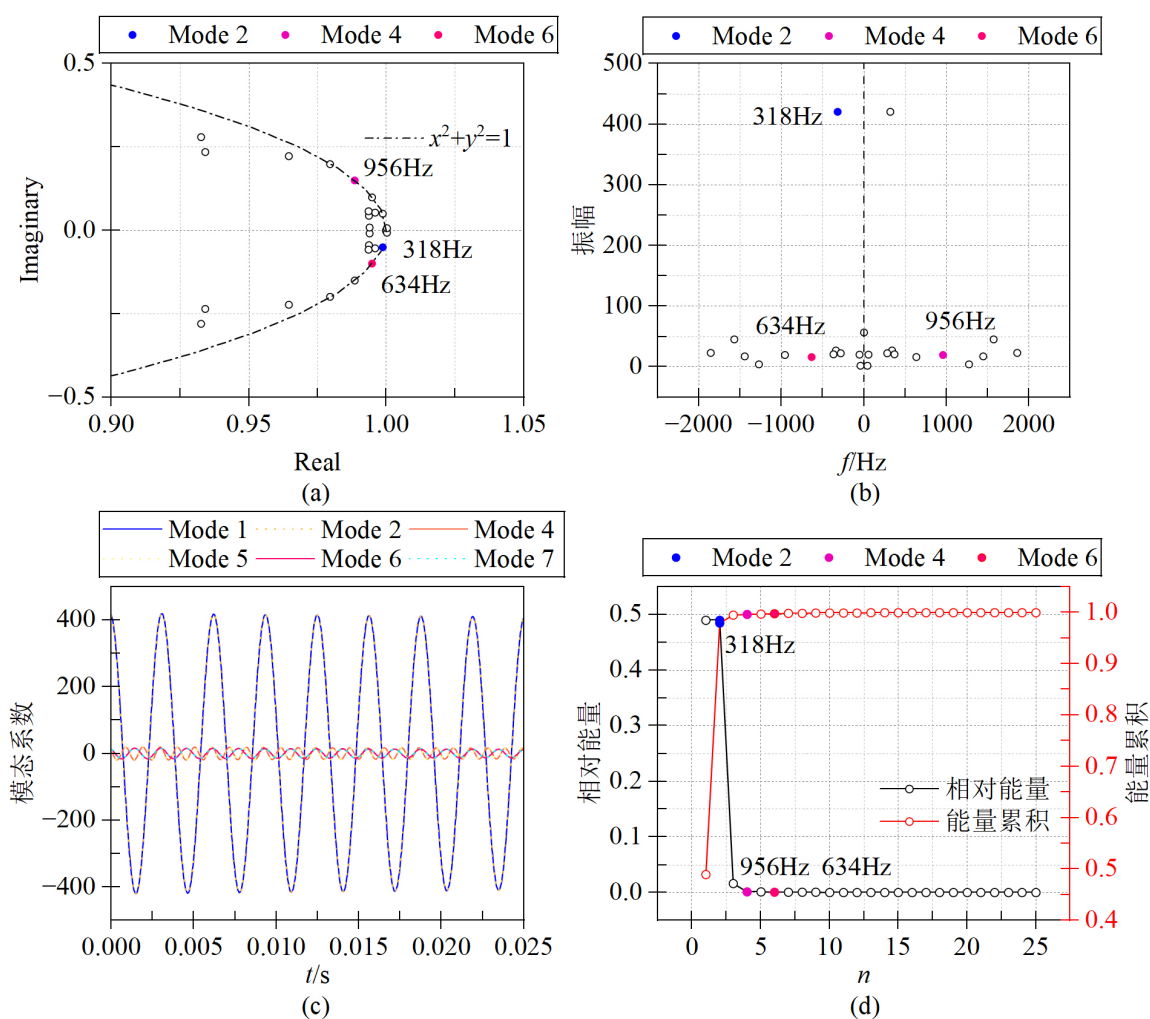


Figure 7. DMD analysis of the symmetric blind branches at $U_{in} = 36.49 \text{ m/s}$: (a) eigenvalue distribution, (b) modal frequency and amplitude distributions, (c) evolution of modal coefficients, (d) modal energy distribution and cumulative energy

图 7. $U_{in} = 36.49 \text{ m/s}$ 下的对称盲通分支管的 DMD 分析: (a) 特征值分布, (b) 模态频率与振幅分布, (c) 模态系数演化, (d) 各阶模态能量分布与能量累积

图 8 展示了对称盲通分支管在 $U_{in} = 36.49 \text{ m/s}$ 下的压力脉动均方根场及各主要 DMD 模态的空间分

布。压力脉动均方根场表明, 高幅值压力脉动主要集中于两侧分支管内, 说明对称盲通分支管流致声共振的压力脉动主要集中于分支管内部并沿着主管道向上、下游传播。在 DMD 模态空间分布中, Mode 2 (318 Hz) 的压力脉动呈现出一阶声学模态的半波长分布特征, 其分支管顶端对应压力反节点, 而分支管与主管道连接位置对应压力节点。因此, 该模态表现为分支管内的声学驻波结构, 并由于分支管与主管道连接位置压力脉动幅值低, 使得该模态难以向主管道内有效传播。同时, Mode 4 (956 Hz) 为对称盲通分支管的二阶声学模态(式(14)中 $n = 3$), 其模态能量远低于 Mode 2 (318 Hz), 对主管道内压力脉动传播贡献较小。相比之下, Mode 6 (634 Hz) 则表现出不同的压力脉动空间分布特征, 除分支管内仍存在一定压力脉动外, 该模态沿主管道方向连续分布。

从理想声学边界条件分析, 若分支管两端均对应同相压力反节点, 则分支管与主管道连接位置可形成反相压力反节点, 压力脉动便由此向主管道内进行传播。然而, 本文的主管道为介质直流通, 连接位置并非理想压力节点边界。因此, 在实际流声共振作用下, 部分非线性压力脉动会突破局限于分支管内的声学驻波结构, 以次频形式沿主管道传播。这些说明 Mode 6 (634 Hz) 模态已不再局限于分支管内部的声学驻波模态, 而是受一阶声学模态与流声共振开口剪切层非线性振荡共同形成的压力脉动传播模态。

因此, 在对称盲通分支管的流致声共振中, 一阶声学模态主要负责维持系统的声共振状态, 次频则增强了非线性流声共振中压力脉动沿主管道上、下游传播能力。

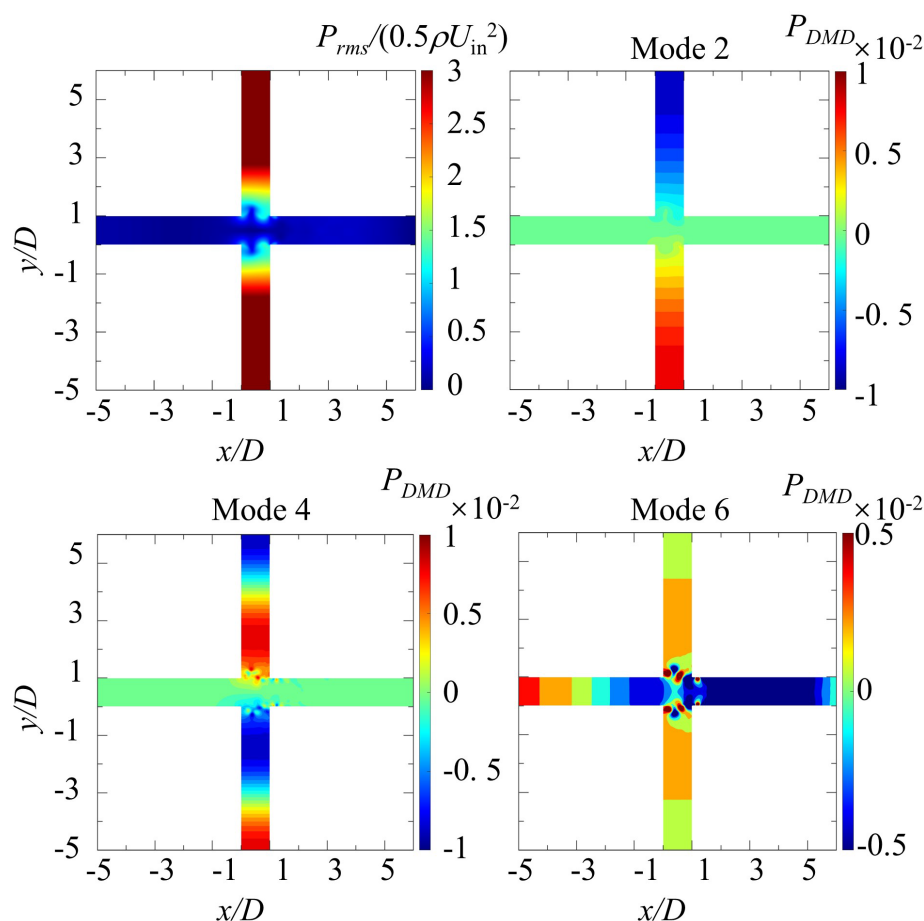


Figure 8. Spatial distributions of the DMD modes of the pressure fluctuation field in the symmetric blind branches at $U_{in} = 36.49$ m/s

图 8. 对称盲通分支管在 $U_{in} = 36.49$ m/s 下的压力脉动场各 DMD 模态的空间分布

5. 结论

本文采用大涡模拟对单盲通分支管与对称盲通分支管的流致声共振流场进行了数值模拟,并结合动态模态分解方法揭示了压力脉动传播特性。主要结论如下:

(1) 单盲通分支管与对称盲通分支管在流致声共振下表现的脉动传播特性存在显著差异。单盲通分支管内压力脉动主要受分支管一阶声学模态控制,并沿主管道上、下游传播。而对称盲通分支管布置能够加剧流致声共振强度,并改变主管道内压力脉动的频率组成,表现为一阶声学模态与次频共同作用的传播特征。

(2) 对称盲通分支管的压力脉动场 DMD 分析结果表明,一阶声学模态频率为流场主要脉动成分,而次频及二阶声学模态来源于流动非线性作用下的流声耦合机制,并促进压力脉动由局部分支管向主管道传播。

本文研究结果揭示了不同盲通分支管结构下流致声共振压力脉动传播特性差异,需要指出的是,未来仍需进一步开展不同入口流速、分支管长径比及结构参数变化条件下的系统研究,以验证上述压力脉动传播特性的普适性。

基金项目

本研究受盐城工学院校级科研项目资助(xjr2023001)。

参考文献

- [1] 祖洪彪, 张锴. 阀门共振腔声源特性的数值研究[J]. 核技术, 2013, 36(4): 111-115.
- [2] 赵伟, 肖瑶, 顾汉洋. 圆形封闭旁支管流致声共振实验研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(1): 70-75.
- [3] Jiang, L., Zhang, H., Duan, Q. and Zhang, Y. (2020) Numerical Study on Acoustic Resonance Excitation in Closed Side Branch Pipeline Conveying Natural Gas. *Shock and Vibration*, **2020**, 1-19. <https://doi.org/10.1155/2020/8857838>
- [4] 张正凡, 王鹏, 王炜哲, 等. 串列深腔流致声共振特性研究[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(1): 93-100.
- [5] Takahashi, S., Ohtsuka, M., Okuyama, K., Ito, T. and Yoshikawa, K. (2008) Experimental Study of Acoustic and Flow-Induced Vibrations in BWR Main Steam Lines and Steam Dryers. *ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference*, Chicago, 27-31 July 2008, 41-47. <https://doi.org/10.1115/pvp2008-61318>
- [6] 蒋刘义, 张宏, 王劲, 等. 流体诱发离心式动力输气管道振动分类及研究现状[J]. 油气储运, 2021, 40(8): 848-853.
- [7] 张辉, 张锴, 顾汉洋, 等. 方形封闭旁支管流致声共振实验研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(1): 86-91.
- [8] Okuyama, K., Takahashi, S., Tamura, A., Nishida, K., Ohtsuka, M. and Tsubaki, M. (2009) Flow Visualization of Acoustic Resonance for Safety Relief Valves in Power Upgraded BWRs. *17th International Conference on Nuclear Engineering*, Brussels, 12-16 July 2009, 11-18. <https://doi.org/10.1115/iconel7-75035>
- [9] Jiang, L., Zhang, H., Duan, Q. and Liu, X. (2021) Numerical Simulation of Acoustic Resonance Enhancement for Mean Flow Wind Energy Harvester as Well as Suppression for Pipeline. *Energies*, **14**, Article 1725. <https://doi.org/10.3390/en14061725>
- [10] Xiao, Y., Zhao, W., Gu, H. and Gao, X. (2018) Effects of Branch Length and Chamfer on Flow-Induced Acoustic Resonance in Closed Side Branches. *Annals of Nuclear Energy*, **121**, 186-193. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.07.037>
- [11] Wang, P., He, L. and Liu, Y. (2020) Acoustics-Driven Vortex Dynamics in Channel Branches with Round Intersections: Flow Mode Transition and Three-Dimensionality. *Physics of Fluids*, **32**, Article 025101. <https://doi.org/10.1063/1.5141609>
- [12] Schmid, P.J. (2010) Dynamic Mode Decomposition of Numerical and Experimental Data. *Journal of Fluid Mechanics*, **656**, 5-28. <https://doi.org/10.1017/s0022112010001217>
- [13] 张昕宇, 向阳, 张浪. 二回路蒸汽管路流固声耦合振动特性及机理分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2026, 47(2): 416-425.