

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202504007

立式船用离心泵噪声特性数值模拟

米建东, 梁泽民, 蒋 婷, 田 龙
(陕西航天动力高科技股份有限公司, 西安 710077)

摘 要: 为研究船用离心泵运行时的噪声特性, 采用计算流体力学与计算声学相结合的方法, 对某立式两级船用离心泵的水动力噪声进行了模拟分析。通过对船用离心泵内部非定常流动引起的噪声进行数值计算, 分析其水动力噪声的频谱特性和外声场的分布规律。结果表明: 离心泵内部流致噪声产生的主要原因是叶轮与隔舌的动静干涉, 尤其是在低频段时, 流致噪声的辐射声压级较高, 且呈现出离散的宽频谱特性; 通过对壳体附近声场的声压级云图进行分析, 发现离心泵内部声场的声压级幅值与频率无关, 而外部声场的声压级与频率相关; 在径向平面上, 低频段噪声指向性较弱, 但随着频率的增加, 噪声辐射的指向性逐渐呈现出偶极子特征, 在三倍叶频时辐射声压指向性初现偶极子特征, 在五倍叶频时则表现出四极子特征; 由径向平面壳体附近振速云图可知, 隔舌附近的振速较高, 成为噪声辐射的主要来源, 在低频段时尤为显著。

关键词: 船用离心泵; 流致噪声; 偶极子声源; 数值模拟

中图分类号: TH311

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2025)04-060-08



听语音
与作者
聊科研

Numerical Simulation of Noise Characteristics of Vertical Marine Centrifugal Pump

MI Jiandong, LIANG Zemin, JIANG Ting, TIAN Long
(Shaanxi Aerospace Power Hi-Tech Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

ABSTRACT: This study combined computational fluid dynamics and computational acoustics to simulate and analyze the hydrodynamic noise of a vertical two-stage marine centrifugal pump. The spectral characteristics of the hydrodynamic noise and the distribution of the external sound field were analyzed by numerically calculating the noise induced by unsteady flow within the centrifugal pump. The results indicate that the primary cause of the flow-induced internal noise is the rotor-stator interaction between the impeller and the volute tongue. In particular, in the low-frequency range, the radiated sound pressure level is high and exhibits discrete broadband characteristics. Comparative analysis of the sound pressure level sound maps near the pump shell reveals that the amplitude of the sound pressure level in the internal sound field is independent of frequency. In contrast, the sound pressure level in the external sound field varies with sound frequency.

收稿日期: 2024-10-14

修回日期: 2025-01-05

录用日期: 2025-01-20

第一作者: 米建东 (1995—), 男, 工程师, 主要从事流体机械内部流动分析及噪声研究。E-mail: mijiangdong@outlook.com

引用格式: 米建东, 梁泽民, 蒋婷, 等. 立式船用离心泵噪声特性数值模拟[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (4): 60-67. MI Jiandong, LIANG Zemin, JIANG Ting, et al. Numerical simulation of noise characteristics of vertical marine centrifugal pump[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (4): 60-67.

Low-frequency noise exhibits weak directivity in the radial plane. However, as frequency increases, the directivity of noise radiation gradually develops into dipole characteristics. The blade-passing frequency exhibits dipole characteristics at three instances, and quadrupole characteristics at five instances. The vibration velocity distribution near the radial plane shows that the vibration velocity near the volute tongue is significantly higher, identifying it as a major source of noise radiation, especially in the low-frequency range.

KEYWORDS: marine centrifugal pump; flow-induced noise; dipole sound source; numerical simulation

船用泵作为舰船管路系统的核心设备, 种类和数量繁多, 一回路、二回路的各种动力系统和船舶系统都设置有很多大小不一的泵^[1]。离心泵作为其中最主要的种类之一, 其良好的结构设计对噪声控制至关重要。因此, 研究船用离心泵的噪声特性对实现舰船低噪声水力设计具有至关重要的意义。船用泵的噪声来源众多, 主要分为结构噪声和水动力噪声2种。从船用泵结构设计优化角度出发, 相关研究热点主要集中在对水动力噪声的模拟计算。离心泵的水动力噪声根据其产生机理的不同可以分为流致噪声和流激振动噪声^[2]。流致噪声主要指离心泵内部非定常流动直接产生的辐射噪声^[3-4], 流激振动噪声是指非定常流动产生脉动压力所激励壁面产生的二次辐射噪声^[5]。目前, 国内外学者对离心泵噪声的研究主要集中在探究内部流动噪声产生的机理及其特性^[6-8]。

Guo等^[9]在综述中对流致噪声的产生机理和传播途径进行了详细总结, 并进一步指出, 未来工作需要将流场控制方程、弹性结构动力学方程和声场控制方程相结合, 进一步优化噪声分析方法。Gangipamula等^[10]总结了离心泵流致噪声源的相关研究成果, 表明离心泵噪声在频域中表现为离散噪声和宽带噪声。其中, 离散噪声主要与叶片通过频率和动静干涉有关, 宽带噪声主要为湍流噪声和空化噪声。郭荣等^[11]以一台比转速为66的单级单吸离心泵为研究对象, 证明了动静干涉是离心泵蜗壳流激噪声产生的主要原因。Jiang等^[12]采用流-声-固弱耦合的方法对一台5级离心泵流激振动噪声进行全尺寸模拟, 计算结果与试验基本一致, 表明采用流-声-固弱耦合仿真方法评估涡轮机械产生的流激噪声是可行的。Zhao等^[13]研究表明, 由于蜗壳具有三维非轴对称形状, 导致其与叶轮的相互作用增加了船用离心泵内部流场的复杂性和不稳定性, 是泵体振动和水力噪声产生的主要原因。另外, 相关研究表明, 离心泵内部的

压力波动峰值主要出现在旋转频率、叶片通过频率和二倍叶频处^[14-16]。王文博等^[17]通过数值计算方法对单级船用立式离心泵内部流动噪声的特性进行研究, 结果表明, 噪声频率特性的主要峰值集中在叶频和倍频处。离心泵外场噪声不仅与内部流场有关, 还与结构密切相关^[18-20]。Si等^[21]对高速离心泵进行仿真计算和试验研究, 发现噪声频谱表现出的宽带特性不仅与流体的压力脉动有关, 还与结构模态频率有关。

本文在以往研究的基础上, 以某立式两级船用离心泵为研究对象, 考虑了结构阻尼的影响, 应用数值计算方法对船用泵内外声场进行研究, 为船用泵低噪声设计优化提供参考。

1 研究对象

某立式两级船用离心泵的设计参数如下: 流量 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程 $H = 135 \text{ m}$ 、转速 $n = 2980 \text{ r/min}$ 、比转速 $n_s = 108.9$ 、叶片数 $Z = 6$ 、轴频 (axial passing frequency, APF) 为 49.67 Hz 、叶频 (blade passing frequency, BPF) 为 298 Hz 。离心泵主要由电机、支撑板、过渡流道、首级叶轮和次级叶轮等组成, 三维模型如图1所示。

2 数值计算方法

2.1 流场计算

本文首先采用三维建模软件来构建离心泵模型, 然后将其导入到网格划分软件中。由于离心泵结构复杂, 本文将离心泵流体区域划分为非结构网格, 并对叶片进出口位置和隔舌附近区域进行局部网格加密。最后, 为获得合理的网格尺寸和数量, 经网格独立性验证, 确定最终的网格总数为1 084万个。

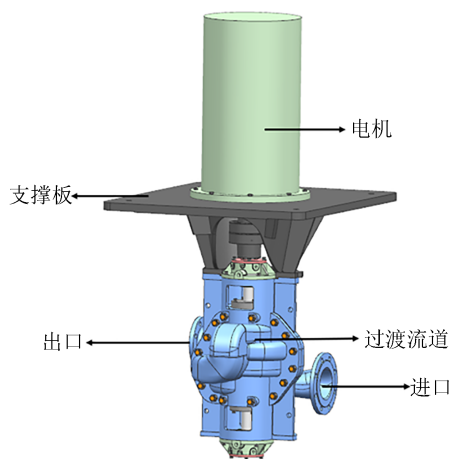


图 1 船用离心泵三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of marine centrifugal pump

离心泵中流体的控制方程包括连续性方程、动量方程和能量方程。本文采用流体计算软件对离心泵内部流场进行仿真，将泵进口边界条件设置为压力进口，出口设置为质量流量出口，叶轮区域设置其转速为 2 980 r/min，所有壁面均采用无滑移边界条件，叶轮和静止部件交界面为动-静交界面。为获取流场非定常压力信息并节省计算时间，采用定常计算结果初始化流场。定义叶轮旋转 3° 所用时长为一个时间步，即时间步长为 1.678×10^{-4} s。待流场周期稳定后，选取 6 个完整旋转周期的叶片和蜗壳壁面的压力信息作为声学计算的基础。

2.2 声场计算

目前，对水动力噪声的研究所采用的理论和方法大多来自于气动声学。气动声学的研究起源于 Lighthill^[22]提出的声比拟法，Curle^[23]在 Lighthill 理论的基础上导出了著名的 Curle 方程，Williams 等^[24]引入广义函数将 Curle 方程进行了扩展，建立了广义的 Navier-Stokes 方程。本文选择更为简便的间接边界元法，其本质为 Lighthill 声类比法，即 FW-H 方程^[5]，数学表达式为

$$\frac{\partial^2 [H(f)\rho]}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 [\rho H(f)] = \frac{\partial^2 [T_{ij}H(f)]}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial [F_i \delta(f)]}{\partial x_i} + \frac{\partial [Q_i \delta(f)]}{\partial t} \quad (1)$$

$$F_i = -[\rho u_i(u_j - v_j) + pE_{ij} - \tau_{ij}] \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$Q_i = [\rho(u_j - v_j) + \rho_0 v_j] \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (3)$$

式中： ρ 为流体密度； ρ_0 为参考密度； c_0 为声音在

介质中的传播速度； p 为流场中的压力； T 为莱特希尔 (Lighthill) 应力张量； E 为单位张量； τ 为黏性切应力张量； u 为流体速度； v 为表面速度； x 为空间坐标；下标 i, j 为坐标轴方向分量，遵从张量中的求和约定； $H(\cdot)$ 为 Heaviside 阶跃函数； $\delta(\cdot)$ 为 Dirac delta 函数； f 为固体边界函数。

在 FW-H 方程中，等号右边第一项是 Lighthill 声源项，为四极子声源；第二项含有壁面脉动压力，为偶极子声源；第三项中包含有固体壁面的运动速度，代表单极子声源。

声学计算在进行网格划分时，需要确定声学最大网格尺寸，即

$$L \leq \frac{c_0}{6f_{\max}} \quad (4)$$

$$f_{\max} = \frac{1}{2t} \quad (5)$$

式中： L 为网格单元尺寸； $f_{\max}$ 为最大分析频率； t 为流场计算时间步长。由式 (5) 可得，时间步长为 1.678×10^{-4} s 对应的最大分析频率为 2 979.74 Hz，将其代入到式 (4)，最终声学最大网格尺寸取 15 mm。

2.3 结构模态计算

运动流体和结构间相互作用是产生噪声的主要原因，而模态计算结果主要为声振耦合做准备。本文在对壳体进行三维建模时，忽略螺栓和孔等非主要结构，只保留壳体、电机和支撑板等关键构件。计算获得前 8 阶模态的固有频率分别为 54.89 Hz、58.57 Hz、105.84 Hz、115.00 Hz、179.11 Hz、197.27 Hz、361.31 Hz、381.31 Hz。

2.4 计算条件设置

对船用离心泵进行声学计算时，首先需对其进行非定常流场计算，然后将得到的蜗壳、过渡流道和叶片压力脉动信息导入到声学计算软件中，通过傅里叶快速变换转化为声源信息，最后进行声振耦合计算。声学计算过程中，为消除管道对内部流动噪声的影响，将泵进出口设置为全吸声属性，泵体底部设置为对称平板来模拟船体平面的半自由空间声场，壳体包裹声学边界设置为 AML 属性。对蜗壳流道与壳体进行声振耦合，在壳体内部创建水流体属性，在外部创建空气流体属性。由于壳体表面振动会置换周围的介质，从结构的角度来看，这将导致能量的损失。根据董亮等^[18]对离心泵壳体模态试验结果，本文在声学计算时对模态结果添加 2% 的结构阻尼。

在外场噪声计算过程中, 为了便于后续分析, 围绕泵体设置 XY、XZ、YZ 监测面及噪声声压级监测点, 其位置如图 2 所示。

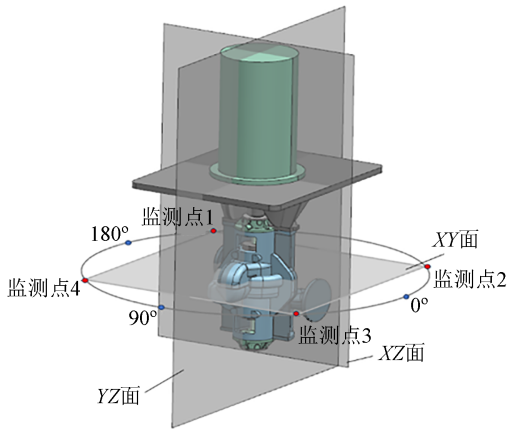


图2 监测面与监测点示意

Fig. 2 Layout of monitoring surfaces and points

3 结果分析

3.1 声场计算与分析

大多数声学测量设备都采用声压级来评价声源的强弱。国际上规定的电子计权网络包括 A、B、C、D 共计 4 种, 由于 A 计权网络几乎能体现人对噪声的主观响应, 根据 GB/T 29529—2013^[25], 本文所有的噪声计算值均采用 A 计权声压级。声压级定义为

$$L_{SPL} = 20 \lg \frac{p_e}{p_r} \quad (6)$$

式中: p_e 为有效声压; p_r 为基准声压 (在空气中取值为 2×10^{-5} Pa, 在水中取值为 1×10^{-6} Pa)。

总声压级为

$$L_{TSPL} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{L_{SPL,i}/10} \quad (7)$$

式中: $L_{SPL,i}$ 为各频率下的声压级。

图 3 为不同测点处噪声声压级频响曲线, 可以看出, 在 4 个不同测点位置处, 立式两级离心泵测点处的声压级都随着频率的增加而不断降低, 且不同测点处声压级变化趋势一致。在叶频和倍频处的声压级几乎相等, 表明以固定偶极子和旋转偶极子为声源的情况下, 声压级在空间分布上保持均匀。同时, 声压级在低频范围内较大, 呈现出离散的宽带频谱, 说明立式两级离心泵产生的噪声主要分布在低频段, 因此后续在噪声控制时主要关注低频噪声。

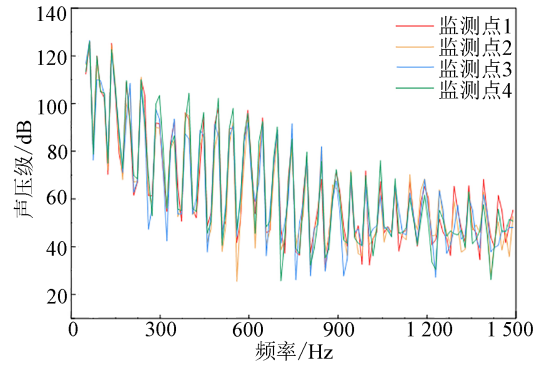


图3 不同测点位置的声压级频率响应曲线

Fig. 3 Sound pressure level frequency response curves at different monitoring points

为量化不同测点位置处具体的计权声压级, 根据公式 (5), 对图 3 中不同测点的原始声压级进行 A 计权处理, 计算得到在测点 1、2、3、4 处的总声压级分别为 109 dB (A)、109 dB (A)、107 dB (A)、109 dB (A)。

3.2 壳体对声场分布的影响

离心泵噪声的产生主要集中在轴频、叶频及其倍频处, 因此选取轴频、叶频、2 倍叶轮叶频、3 倍叶轮叶频、4 倍叶轮叶频以及 5 倍叶轮叶频时的壳体附近声压与振速云图进行分析。图 4 为 XY 平面内壳体附近声场声压级分布云图, 图 5 为 XY 平面内壳体附近声场振速云图。从图 4 中可以看出, 各频率下的声压分布有着明显的区别, 沿着径向方向, 随着距离的增加, 噪声在逐渐衰减。其中, 蜗壳隔舌位置区域的噪声最为强烈。同时, 内声场声压级远大于外声场, 并且内声场声压级的极大值几乎不随频率增加而变化, 但外声场声压级分布与频率相关, 频率不同则外声场声压级分布也各不相同。由图 5 可以看出, 外声场的隔舌附近内声压级明显高于其他区域, 并且该区域内壳体的振速远大于壳体其他地方。在轴频时, 隔舌附近的空气振速为 10.15 m/s, 随着频率的增加, 振速快速降低, 辐射声压也随之降低, 表明叶轮和隔舌因动静干涉而产生的压力脉动是引起离心泵流致噪声的主要原因。

为分析不同平面的声压分布特性差异, 以一倍轴频为例, 计算得到 3 个平面的声压级分布云图如图 6 所示。由于船用离心泵是对称结构的旋转机械, 在径向截面的场点网格上, 声压辐射呈现出明显的旋转偶极子特征, 且极大值沿径向分布, 如图 6 (a) 所示。出现这种分布的主要原因是流体与固体发生碰撞产生不稳定的反作用力。在轴

向截面的场点网格上,如图 6(b)和图 6(c)所示,当声波从叶轮传播到船体底部平面时,由于壁面的反射作用,声波从反射平面向电机侧传播,因此电机附近的声压级明显小于泵体底部的声压级。底部低噪声区域为非驱动端轴承处,由于壳

体的屏障作用,该区域声压级远小于其他区域。

3.3 声场分布规律

由于声音的传播具有方向性,声压在不同方位上存在差异。为进一步获得不同方位上噪声的分布情况,在XY平面内,以次级叶轮的中心点为

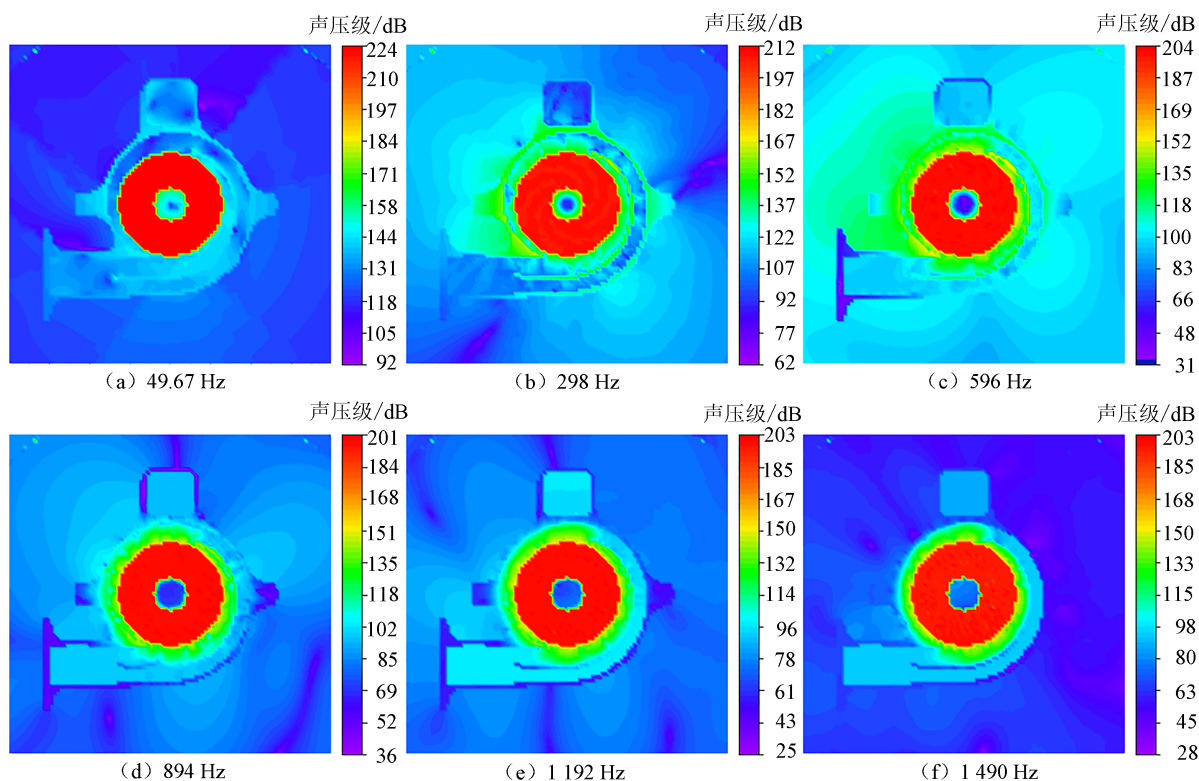


图 4 XY平面内壳体附近声场声压级分布云图

Fig. 4 Sound pressure level distribution cloud map of the sound field near the shell in the XY plane

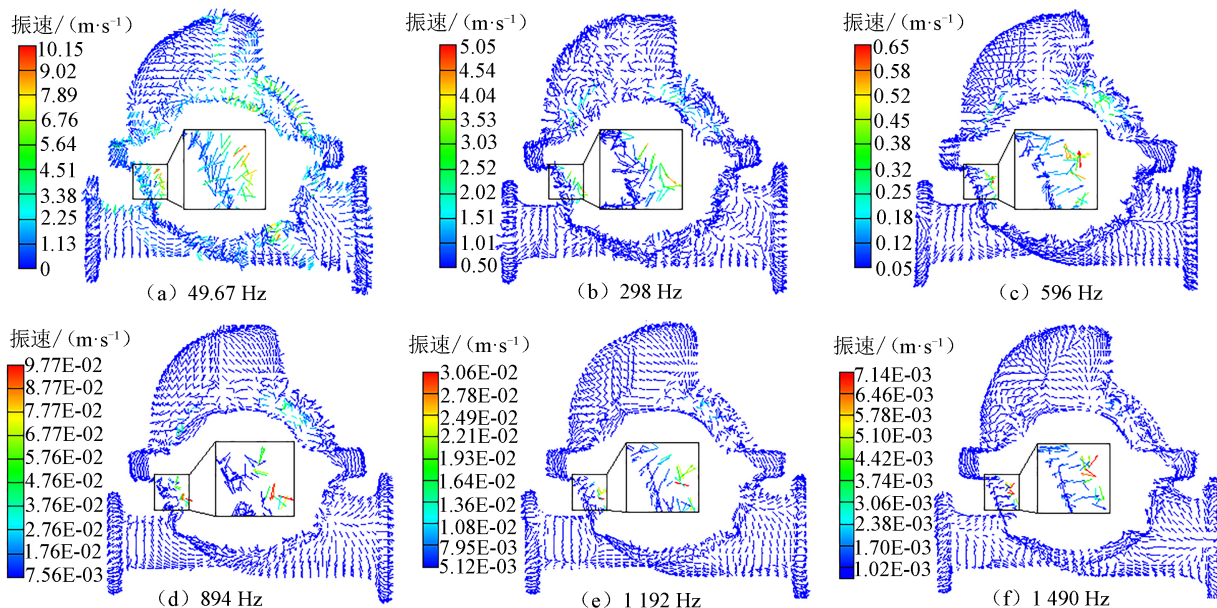


图 5 XY平面内壳体附近空气振速云图

Fig. 5 Vibration velocity cloud map of air near the shell in the XY plane

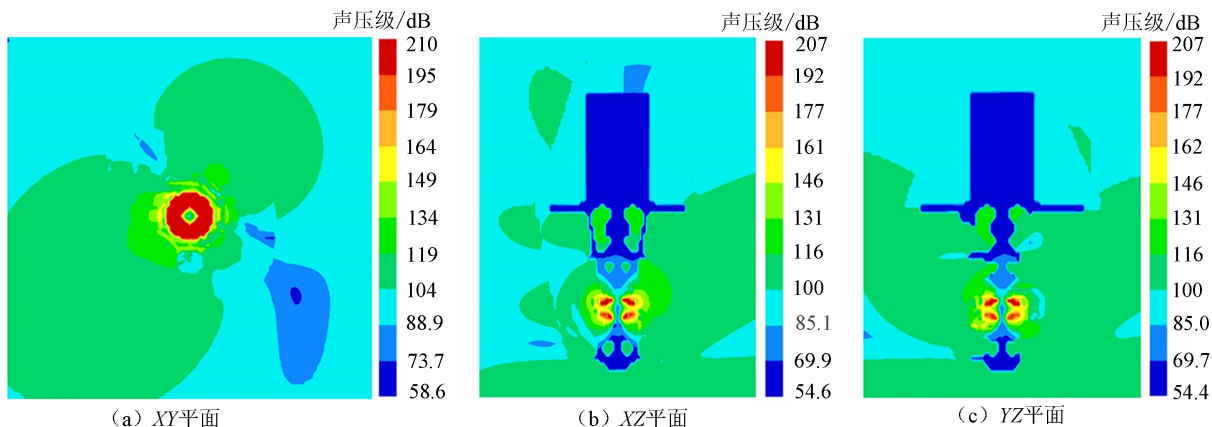


图6 面场点网格声压级分布云图

Fig. 6 Sound pressure level distribution cloud map in the grid of surface field points

圆心, 在距次级叶轮中心 1 m 的圆周上均匀设置 36 个测点。不同频率处的外场噪声指向性分布如图 7 所示。从整体上看, 随着频率增大, 各个方向的声压强度在逐渐降低, 在不同的频带范围内, 声压辐射具有不同的方向性, 且噪声的能量主要集中在低中频段。

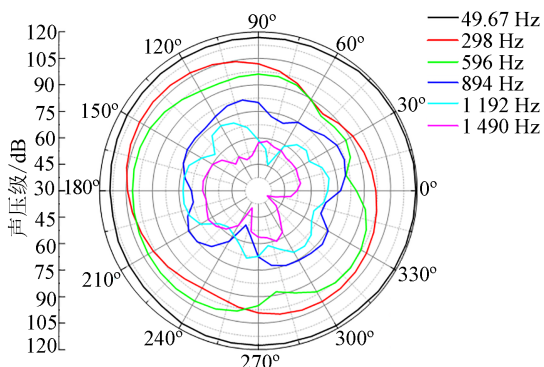


图7 不同频率下声压级指向分布

Fig. 7 Distribution of sound pressure level directivities at different frequencies

由图 7 可知, 在 49.67 Hz (APF) 时, 辐射噪声的指向性分布较为均匀, 辐射噪声曲线基本呈现圆形。在 298 Hz (BPF) 和 596 Hz (2BPF) 时, 在 0° 到 90° 区域 (入口至过渡流道) 内, 声压强度略小于其他区域, 这说明在低频段时, 辐射噪声声压强度相对较大, 无明显的指向性特征。

在 894 Hz (3BPF) 时, 辐射噪声的指向性分布初具偶极子特征, 在 250° 附近区域内声压级最小, 在 110° 附近区域内声压级最大, 此时辐射声压指向性分布向偶极子转变, 至 1192 Hz (4BPF) 时, 偶极子特征更为明显。在该频段内, 指向性分布主要受非定常流动所诱导的叶片表面、蜗壳和过渡流道激振所产生的偶极子影响, 导致船用

泵辐射噪声指向性分布呈现偶极子特征。

在 1490 Hz (5BPF) 时, 其指向性从偶极子向四极子转变, 初现四极子特征, 正对隔舌区域声压级明显大于其他区域。这说明在高频段, 离心泵辐射噪声的指向性分布主要受内部动量通量脉动的四极子声源影响。正对隔舌区域的噪声最为强烈, 这是由于湍流和蜗壳壁面之间干涉过程中四极子声源产生了散射, 通过壳体壁面传递到外声场。

4 结论

本文以某立式两级船用离心泵为研究对象, 采用 CFD 技术并结合声学有限元分析方法, 考虑结构阻尼的影响, 对船用泵的噪声特性进行研究, 主要得到以下结论。

1) 立式两级船用离心泵噪声频谱具有宽带谱特性, 噪声主要集中在低频段。

2) 在低频段, 辐射噪声指向性趋近于圆; 在 3BPF 时, 初现偶极子特征。通过径向网格场点可知, 船用离心泵外声场声压在径向方向上呈现出明显的偶极子特征, 而在轴向平面内不具有偶极子特征。

3) 隔舌附近空气振速较高是辐射噪声产生的主要来源, 在低频段时尤为明显, 轴频处隔舌附近空气振速高达 10.15 m/s, 主要是因为叶轮和蜗壳之间的动静干涉作用较强。

本文得到的结论可以为船用离心泵减噪设计提供参考。然而, 研究仍存在一些不足, 如未充分考虑非线性噪声源和湍流效应。在后续的研究中, 将重点优化电机和泵的耦合模型, 进一步考

考虑非线性和湍流噪声的影响。

参考文献

- [1] 陈小剑. 舰船噪声控制技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013: 176-177.
- [2] 张楠, 王星, 谢华, 等. 流激噪声数值计算方法及声学积分面影响性研究[J]. 船舶力学, 2016, 20(7): 892-908.
ZHANG N, WANG X, XIE H, et al. Research on numerical simulation approach for flow induced noise and the influence of the acoustic integral surface[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(7): 892-908.
- [3] 钟思阳, 黄迅. 气动声学 and 流动噪声发展综述: 致初学者[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(3): 363-371.
ZHONG S Y, HUANG X. A review of aero-acoustics and flow-induced noise for beginners[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(3): 363-371.
- [4] YUAN Z Y, ZHANG Y X, ZHOU W B, et al. Investigation of flow-induced sound source generation in a centrifugal pump[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2752(1): 0122109.
- [5] 郎涛, 刘玉涛, 陈刻强, 等. 离心泵水动力噪声研究综述[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(1): 8-15, 22.
LANG T, LIU Y T, CHEN K Q, et al. Review of research on hydrodynamic noise of centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(1): 8-15, 22.
- [6] PARRONDO J, PÉREZ J, BARRIO R, et al. A simple acoustic model to characterize the internal low frequency sound field in centrifugal pumps[J]. Applied Acoustics, 2011, 72(1): 59-64.
- [7] ARGARIN J D, HAMBRIC S. Using fluid velocity in lieu of impeller speed for dimensional analysis and a method for estimating fluidborne noise due to flow turbulence within centrifugal pumps [C]//2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, USA: ASME, 2009: 1699-1710.
- [8] DONG R, CHU S, KATZ J. Effect of modification to tongue and impeller geometry on unsteady flow, pressure fluctuations, and noise in a centrifugal pump[J]. Journal of Turbomachinery, 1997, 119(3): 506-515.
- [9] GUO C, GAO M, HE S Y. A review of the flow-induced noise study for centrifugal pumps[J]. Applied Sciences, 2020, 10(3): 1022.
- [10] GANGIPAMULA R, RANJAN P, PATIL R S. Flow-induced noise sources and reduction methods in centrifugal pumps: a literature review[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(8): 081302.
- [11] 郭荣, 李小兵, 刘向, 等. 叶片出口梯形切割对离心泵蜗壳流激噪声影响的研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(13): 82-91.
GUO R, LI X B, LIU X, et al. Effects of trap-ezoidal cutting at blade outlet on flow-induced noise of centrifugal pump volute[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(13): 82-91.
- [12] JIANG Y Y, YOSHIMURA S, IMAI R, et al. Quantitative evaluation of flow-induced structural vibration and noise in turbomachinery by full-scale weakly coupled simulation[J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23(4): 531-544.
- [13] ZHAO C S, CHAI K. Simulation study on the flow-induced vibration and noise in marine centrifugal pumps[J]. Journal of Vibration and Control, 2024, 30(11-12): 2549-2567.
- [14] RUI X P, ZHAO Y. Numerical simulation and experimental research of flow-induced noise for centrifugal pumps[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18: 622-636.
- [15] 袁寿其, 薛菲, 袁建平, 等. 离心泵压力脉动对流动噪声影响的试验研究[J]. 排灌机械, 2009, 27(5): 287-290.
YUAN S Q, XUE F, YUAN J P, et al. Experimental study on impact of pressure fluctuation on flow noise in centrifugal pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(5): 287-290.
- [16] 刘厚林, 丁剑, 王勇, 等. 基于大涡模拟的离心泵水动力噪声数值模拟[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 177-183.
LIU H L, DING J, WANG Y, et al. Numerical simulation of hydrodynamic noise in centrifugal pump based on LES[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(18): 177-183.
- [17] 王文博, 向阳, 李著新. 船用立式离心泵流噪声特性分析[J]. 船舶工程, 2024, 46(3): 22-30.
WANG W B, XIANG Y, LI Z X. Analysis of flow noise characteristics of marine vertical centrifugal pump[J]. Ship Engineering, 2024, 46(3): 22-30.
- [18] 董亮, 代翠, 孔繁余, 等. 离心泵作透平流体诱发外场噪声特性及贡献分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(5): 168-174.
DONG L, DAI C, KONG F Y, et al. Flow-induced exterior noise characteristics of a centrifugal pump as a turbine and different noises' contribution

- analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(5): 168-174.
- [19] 王镇宇, 杨爱玲, 戴韧. 离心泵流动诱导噪声的数值预测[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(6): 162-167.
WANG Z Y, YANG A L, DAI R. Numerical prediction of the flow-induced noise of centrifugal pump[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(6): 162-167.
- [20] SI Q R, YUAN S Q, YUAN J P, et al. Study on the influence of volute to flow-induced noise in centrifugal pump[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 516-517: 1009-1017.
- [21] SI Q R, SHEN C H, HE X K, et al. Numerical and experimental study on the flow-induced noise characteristics of high-speed centrifugal pumps[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(9): 3105.
- [22] LIDTHILL M J. On sound generated aerodynamically I. general theory[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1952, 211(1107): 564-587.
- [23] CURLE N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1955, 231(1187): 505-514.
- [24] WILLIAMS J E F, HAWKINGS D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 1969, 264(1151): 321-342.
- [25] 中国国家标准化管理委员会. 泵的噪声测量与评价方法: GB/T 29529—2013[S]. 北京:中国标准出版社, 2014.
- (编辑: 刘建民)