

射流式离心泵内场流体动力噪声特性分析

郭荣¹ 李仁年^{1,2} 张人会^{1,2} 宋启策¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 对 JET750G1 型射流式离心泵内场噪声进行数值计算及试验, 分析该泵过流部件诱发的流动噪声和流激噪声特性。采用大涡模拟法进行不同工况的非定常数值计算, 输出各过流部件表面的压力脉动作为偶极子声源。运用声学有限元方法预测流动噪声; 运用声学有限元耦合结构有限元方法预测流激噪声。搭建射流式离心泵内场噪声测试系统, 用水听器对泵出口的流体动力噪声进行测试, 获得噪声的时域和频域信息。分析结果表明: 噪声在轴频和叶频处计算和试验测试误差在 4% 以内; 叶轮和导叶的动静干涉以及流体和结构的共振均是诱发射流式离心泵内场噪声的重要因素, 过流部件自身的结构特性对内场噪声有一定影响; 流动噪声整体大于流激噪声, 表明内场噪声主要由流体的压力脉动特性决定; 叶轮旋转偶极子声源诱发的内场噪声在轴频 (47.5 Hz) 处达到 180 dB 左右, 在射流式离心泵的内场噪声中起主导作用。研究结果为射流式离心泵的低噪设计提供了参考。

关键词: 射流式离心泵; 流体动力噪声; 流动噪声; 流激噪声; 内场噪声

中图分类号: TH311; TH317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0156-09

Characteristic Analysis of Interior Hydrodynamic Noise in Jetting Centrifugal Pump

GUO Rong¹ LI Rennian^{1,2} ZHANG Renhui^{1,2} SONG Qice¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To analyze contribution and characteristics of interior hydrodynamic noise of the jetting centrifugal pump (JCP), the numerical calculation and experiment were carried out. Unsteady numerical calculation under different conditions were performed by using large eddy simulation (LES) method, and pressure fluctuation on the surfaces of flowing-passed components was exported as the dipole source. The flow-borne noise induced by different components of the pump was predicted by acoustic finite element method (FEM). Considering the coupling effect of sound and vibration, the weak coupling model of flow field, structure field and sound field was established to predict flow-induced structure noise generated from structural vibration. To obtain time and frequency domain information of the hydrodynamic noise in the pump outlet, a test-bed with hydrophone was built. The results showed that the maximum error between numerical calculation and experiment was 4% at major characteristic frequency. The rotor-stator interaction between impeller and vane as well as the resonance of fluid and structure was important factors of the interior noise of JCP, reflecting the structural characteristics of the flowing-passed components had some influence on the interior noise. Flow-borne noise of stators was generally greater than flow-induced structure noise, which proved interior noise was mainly determined by the pressure fluctuation characteristics of fluid. Numerical calculation and test results showed that the shaft frequency (47.5 Hz) noise caused by the impeller had about 180 dB and played a dominant role in the hydrodynamic noise of JCP, which provided reference and basis for hydraulic design of the low noise JCP.

Key words: jetting centrifugal pump; hydrodynamic noise; flow-borne noise; flow-induced structure noise; interior noise

收稿日期: 2017-08-31 修回日期: 2017-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579125)和国家重点研发计划项目(2016YFB0200901)

作者简介: 郭荣(1987—), 男, 博士生, 主要从事水力机械流体动力噪声及优化设计研究, E-mail: xizhilang88666@163.com

通信作者: 李仁年(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械多相流及流体动力噪声研究, E-mail: lirn@lut.cn

0 引言

射流式离心泵在叶轮进口前安装了特殊的射流器装置,从而借助其喷嘴的喷射效果在泵的进口处形成低压,实现自吸。这种泵具有结构轻便、操作简单、无需每次使用前灌水、可实现自吸等优点,但由于过流部件多、进口压力小,存在容易发生空化、效率低、噪声大等缺点。目前针对射流式离心泵的研究主要在流场分析^[1-2]和性能优化^[3]等方面,而对噪声源识别和噪声辐射特性的研究尚未涉及。

流体动力声产生于运动物体(流体)对流体(物体)的作用,或是流体自身的紊流作用^[4],流体与过流部件的耦合、汽蚀、水锤、湍流、流动分离等引起的噪声均属于流体动力声学范畴^[5]。近年来,随着计算流体动力学的发展及环境保护标准的提高,水泵流体动力噪声成为研究的热点问题,研究者在流体动力噪声的产生机理和数值预测方法^[6-7],过流部件几何参数对噪声辐射特性的影响^[8-10],流体动力噪声的控制和优化设计^[11-12]等方面取得大量有益的成果。

流体从射流式离心泵的导叶进入泵腔的过程中,流动的惯性作用会使泵腔内形成与叶轮旋转方向相同的速度环量,同时过流面积的急剧扩大引起严重的流动分离,二者的共同作用导致泵腔内部存在大量不同尺度的漩涡^[13]。大涡模拟方法采用瞬时 N-S 方程直接模拟湍流中的大尺度涡,利用亚格子模型模拟小尺度涡对大尺度涡运动的影响,相对于雷诺平均(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)计算方法,LES(大涡模拟)方法不仅有更高的计算效率和计算精度^[14],而且预测瞬态流场的能力也更强,特别是针对流动分离区域^[15-16]。作为目前应用最广泛的湍流数值模拟方法之一,近年来,文献[17-19]将大涡模拟运用于水泵噪声的研究,验证了基于 LES 方法进行水泵流体动力噪声研究的可行性。

本文以 JET750G1 型射流式离心泵为对象,基于大涡模拟、有限元结构分析、有限元计算流体声学相关理论,借助 CFX 16.0、ANSYS Workbench、LMS Virtual Lab Acoustics 13.6 等商业软件,建立流场、结构场和声场的耦合模型,研究和分析 3 种工况下过流部件诱发的不同机理的流体动力噪声特性。搭建射流式离心泵内场噪声测试系统,用水听器测试泵在出口 3 倍管径处的流体动力噪声信息,以期射流式离心泵低噪声设计提供依据。

1 计算流体声学理论和方法

1.1 理论基础

针对流体动力声的研究一般认为起源于 Lighthill^[20-21] 研究喷气噪声开始,后经 Curle^[22]、Ffowcs-Williams 等^[23]的发展,目前已建立起系统的流体动力声学理论体系,这种采用与经典声学理论相似的方法求解流体动力声场的理论称为 Lighthill 声类比理论或 Lighthill 声相似理论^[4]。流体动力声学理论最初主要应用于气体声学的研究,目前已广泛应用在水和油等液体声学。

计算流体声学(Computational fluid acoustics, CFA)是声学 and 计算流体动力学(CFD)结合的一门交叉学科,自 20 世纪 80 年代中期开始逐步兴起,其基本思路是基于 N-S 方程或 Euler 方程求解获得声场^[24],Ffowcs-Williams 和 Hawkings^[23]在前人工作基础上推导出物体在流体中、流体在物体中或流体自身任意运动时形成的流体动力声计算方程,即 FW-H 方程

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (H(f) - \nabla^2 H(f)) P = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (T_{ij} H(f)) - \frac{\partial}{\partial x_i} (P_{ij} n_j | \nabla f | \delta(f)) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 V_n | \nabla f | \delta(f)) \quad (1)$$

式中 f ——运动物体边界的控制面函数,既是空间位置 x 的函数,也是时间 t 的函数

c_0 ——声音在流体中的传播速度

ρ_0 ——流体未受声波干扰时的密度

x_i, x_j ——空间点的坐标轴分量

P ——声压

$H(f)$ ——Ffowcs-Williams 和 Hawkings 引入的 Heaviside 广义函数,与时间 t 相关

$\delta(f)$ —— $H(f)$ 关于时间 t 的偏导数,称为 Dirac 函数,描述物体表面的即时位置

T_{ij} ——Lighthill 湍流应力张量,与雷诺应力相关

P_{ij} ——流体的应力张量

n_j ——物体表面的单位外法矢量在 x_j 轴方向上的投影

V_n ——物体运动速度在物体表面外法线方向的投影

上述 FW-H 方程右边第 1 项属于物体表面以外非线性流动引起的四极子声源项,由 Heaviside 函数 $H(f)$ 决定;第 2 项属于运动物体表面对当地流体

的起伏力引起的偶极子声源项,由 Dirac 函数 $\delta(f)$ 决定;第 3 项属于质量移动效应的单极子声源项,由 Dirac 函数 $\delta(f)$ 决定。1975 年, FARASSAT^[25] 最早求解了 FW-H 方程。

根据流体动力声学相关理论^[4],单极子辐射声功率与流体流速呈 4 次方关系,偶极子辐射声功率与流体流速呈 6 次方关系,四级子辐射声功率与流体流速呈 8 次方关系,因此当流体的马赫数较低时,四级子声源可忽略,而对于水泵而言,单极子噪声主要描述空化导致的辐射噪声,因此在不考虑气蚀的条件下,过流部件表面压力脉动诱发的偶极子声源是水泵流体动力噪声的主要声源,学者们^[8-12] 对各类水泵噪声的研究分析也证明了这一点。

流激噪声属于流场、结构场和声场相互耦合的声学问题,结构振动的力学方程和声学波动方程需在耦合系统中同时计算,对于类似的声振耦合问题,可用统一一矩阵形式的耦合方程来表达^[26-27],即

$$\left(\begin{bmatrix} K_s & K_c \\ O & K_a \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} C_s & O \\ O & C_a \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_s & O \\ \rho_0 K_c^T & M_a \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ p_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{st} \\ F_{at} \end{bmatrix} \quad (2)$$

- 式中 O ——零矩阵
- ω ——角频率
- K_s ——结构刚度
- M_s ——结构质量
- C_s ——结构阻尼
- K_a ——声学刚度
- M_a ——声学质量
- C_a ——声学阻尼
- K_c ——耦合刚度
- u_i ——单元节点位移
- p_i ——节点声压
- F_{st} ——结构激励载荷
- F_{at} ——流体和结构耦合后的激励载荷

该公式清晰表明结构振动会产生声波,而声波的辐射也会引起结构振动。

1.2 计算方法

流体动力噪声的声类比计算法属于间接方法,该方法将声源的产生和声场的传播分离,即使用 CFD 软件获取声源信息,使用结构分析软件得到结构模态,使用声学软件计算噪声的传播。本研究中射流式离心泵内场流体动力噪声包含的内场流动噪声和内场流激噪声,依据图 1 所示流程进行求解。

2 数值计算

2.1 几何模型

以一台射流式离心泵为研究对象,其主要参数

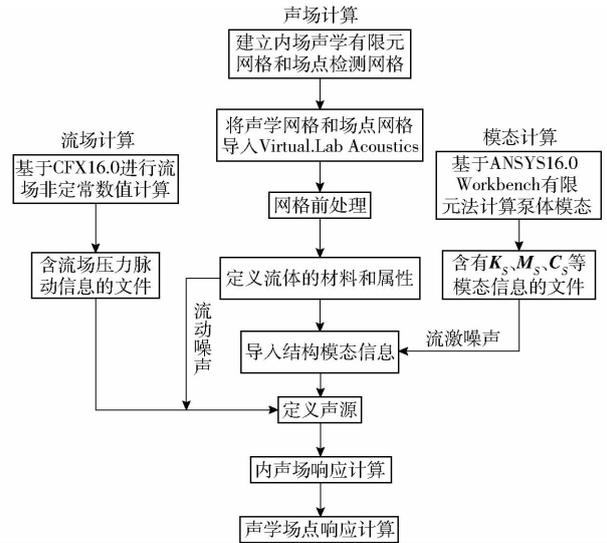


图 1 内场流体动力噪声计算流程图

Fig. 1 Calculation process of interior hydrodynamic noise

如下:设计流量 $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程 $H = 23 \text{ m}$,设计效率 $\eta = 20\%$,转速 $n = 2\ 850 \text{ r/min}$,轴频 47.5 Hz ,叶频为 285 Hz 。该泵结构图如图 2 所示,叶轮、导叶、喷射器的主要设计参数如表 1 所示。

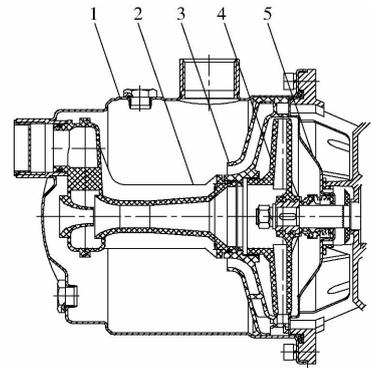


图 2 模型泵结构图

Fig. 2 Structural diagram of model pump
1. 泵体 2. 喷射器 3. 导叶 4. 叶轮 5. 泵盖

表 1 模型泵主要过流部件几何参数

Tab. 1 Geometrical parameters of main flowing-passed components of model pump

部件	参数	数值
叶轮	进口直径/mm	40
	出口直径/mm	120
	叶片数	6
	叶片包角/(°)	78
	出口宽度/mm	5.3
导叶	基圆直径/mm	125
	正导叶宽度/mm	7
	出口外径/mm	64
	叶片数	5
	反导叶宽度/mm	6
喷射器	进口直径/mm	22.5
	出口直径/mm	37.5
	喷嘴出口直径/mm	9

2.2 流场计算

全流场计算域包括叶轮、导叶、喷射器、前泵腔、后泵腔、进水管、出水管以及泵体,如图3所示。鉴于射流式离心泵结构的复杂性及非结构化网格强大的适应能力,将整个计算区域划分为非结构化网格。近壁采用标准壁面函数法进行处理,该方法要求 y^+ (离壁面最近的网格节点到壁面距离,为无量纲变量)通常应在15~300的范围内^[28-29],正式计算前多次预模拟确保叶轮的 y^+ 值控制在该区间。经过网格进行无关性检查,最终网格数确定为约320万进行后续研究。

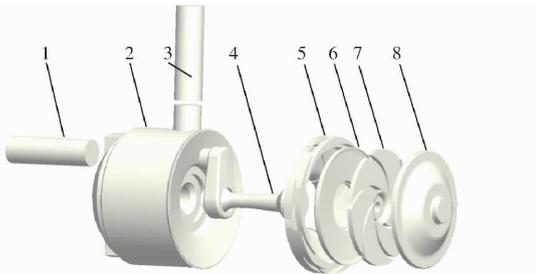


图3 模型泵计算域

Fig. 3 Computational domain of mode pump

1. 进水管 2. 泵体 3. 出水管 4. 喷射器 5. 导叶 6. 前泵腔
7. 叶轮 8. 后泵腔

基于CFX 16.0软件进行离心泵流场的定常和非定常计算。采用多重坐标系,叶轮流场在旋转坐标系中计算,其余过流部件流场在静止坐标系中。在动静部件间使用GGI(General grid interface)界面技术进行数据交换,整个计算模型在叶轮进口区域和出口区域有两组滑移界面,参考其他泵的处理方法^[30],第1组滑移界面为紧贴叶轮进口边的含轴孔圆面,第2组滑移界面为紧贴叶轮出口边的间断圆环面。对于稳态计算,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,使用冻结转子交界面;对瞬态计算,湍流模型采用LES Smagorinsky模型,采用瞬态动静交界面。

设置压力进口、速度出口边界条件,进口压力依据试验测试得到的进口压力给定;所有固壁表面均采用无滑移壁面条件,并按实际加工设置粗糙度为 $25\ \mu\text{m}$;湍流黏度项采用二阶迎风格式,时间项采用二阶全隐格式进行离散,计算精度为 10^{-4} 。时间步长设置为 $0.000\ 117\ \text{s}$,即每个时间步长内叶轮转过约 2° 。数值计算和试验对比结果表明,计算时忽略叶轮进口口环间隙不会影响计算结果的精度,本研究不考虑叶轮进口口环间隙。

首先进行定常计算,然后将定常计算的结果作为初始场进行非定常计算,当流场呈现出稳定的周期性变化后,开始分别输出泵体、喷射器、导叶、叶轮表面的压力脉动时域信息,保存8个周期的cgns格式

数据文件作为后续声学计算的基础,即采样时间 $T=0.168\ 48\ \text{s}$ 。

2.3 模态计算

任何物体均有自己的固有频率和振型,它是系统承受动态载荷结构设计中的重要参数,也是动力分析等响应分析的基础和前提,模态分析就是用来确定结构振动特性的一种技术,用来分析系统的固有频率和振型^[31-32]。本研究中,模型泵的泵体、导叶、喷射器等部件材质各异,厚度不同,为求解各过流部件诱发的流动噪声和流激噪声,需要单独计算各部件的固有频率。该泵结构包括泵体、泵盖、导叶、喷射器、支架,如图4所示。在建模过程中,为降低问题的复杂性,忽略部分尺寸微小的结构特征,例如螺纹孔、凸台等。

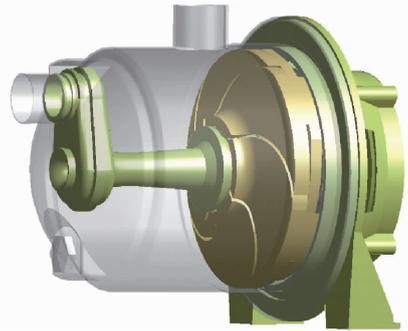


图4 模型泵三维装配体

Fig. 4 3-D assembly of mode pump

基于有限元结构分析相关理论,借助ANSYS Workbench 16.0,并根据实际情况,分别对泵体和支架、喷射器、导叶施加约束,然后进行网格划分及前5阶的模态响应计算。进行网格无关性检查,当网格密度小于 $8\ \text{mm}$ 以后,固有频率最大相对误差不超过2%,因此采用 $8\ \text{mm}$ 的网格步长计算。各部件的材质及材料特性如表2所示,计算结果如表3所示。

表2 模型泵主要部件材料特性

Tab. 2 Material characteristics of main components of mode pump

部件	材料	参数	数值
泵体	304 不锈钢	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 900
		弹性模量/GPa	195
		泊松比	0.3
导叶、喷射器	30% 玻璃纤维增强 聚苯醚	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 290
		弹性模量/GPa	8
		泊松比	0.4
支架	硬铝合金	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 700
		弹性模量/GPa	70
		泊松比	0.3

2.4 内声场计算

根据流体动力声学理论^[4]和相关学者的研究结果^[33],射流式离心泵内场噪声按照诱发机理的不

表3 模型泵主要部件固有频率计算结果

Tab.3 Calculation results of natural frequency of

部件	main components					Hz
	阶数					
	1	2	3	4	5	
泵体	1 035	1 300	1 955	1 960	2 107	
导叶	587	3 893	3 910	4 035	4 040	
喷射器	675	1 757	2 751	3 121	5 004	

同分为内场流动噪声和内场流激噪声,内场流动噪声是指偶极子声源直接向泵内辐射的噪声;内场流激噪声是指偶极子声源辐射到结构上,引起结构振动进而向内部流场空间辐射的噪声。

本研究采用声学有限元方法求解流动噪声,采用结构有限元耦合声学有限元方法求解流激噪声。借助 LMS Virtual. Lab 13.6 软件声学有限元模块 Acoustics Harmonic FEM 对模型泵内场两种噪声进行计算,计算按照图 1 所示流程进行。

声学有限元网格划分时网格单元长度应满足

$$L \leq \frac{c_0}{6f_{max}} \quad (3)$$

式中 f_{max} ——最高计算频率

本研究中 CFX 非定常计算的时间步长为 0.000 117 s,所对应的采样频率为 8 547 Hz,根据奈奎特采样定律,能够分析的最大频率为 4 273 Hz,同时考虑射流式离心泵输送介质为水,而声音在水

中的传播速度约为 1 500 m/s,因此当网格单元长度小于 58.5 mm 时即满足要求,考虑模型泵的实际结构特点,最终确定声学有限元网格划分为 8 mm。

计算中对某一个过流部件诱发的声场进行求解时,认为其他过流部件表面完全刚性,即认为其他表面为全反射壁面,没有声音的透射,声音只是沿着水传播至上下游;将泵的进、出口边界条件定义为全吸声属性。在泵的出口 3 倍管径处设置监测点。

3 计算结果及特性分析

3.1 定子部件噪声及其特性分析

射流式离心泵定子部件包括泵体、导叶、喷射器,分别对各部件诱发的流动噪声和流激噪声进行数值计算。图 5、6 分别给出了 3 种工况下各定子部件流动噪声和流激噪声在出口监测点的声压级频率响应曲线。可以发现,各部件两种噪声在叶频及其倍频处会出现峰值,但幅度较小,这与叶轮和导叶结构在圆周方向均匀布置有关,叶轮和导叶的相互作用在各个方向基本平衡,不会出现蜗壳式离心泵叶片和隔舌的强相互作用现象;各部件两种声源在 5 阶叶频(1 425 Hz)处出现较大峰值,是因为该频率为叶轮叶片(6 个)与导叶叶片(5 个)相互作用的动静干涉频率;泵体的噪声水平整体高于导叶和喷射器。

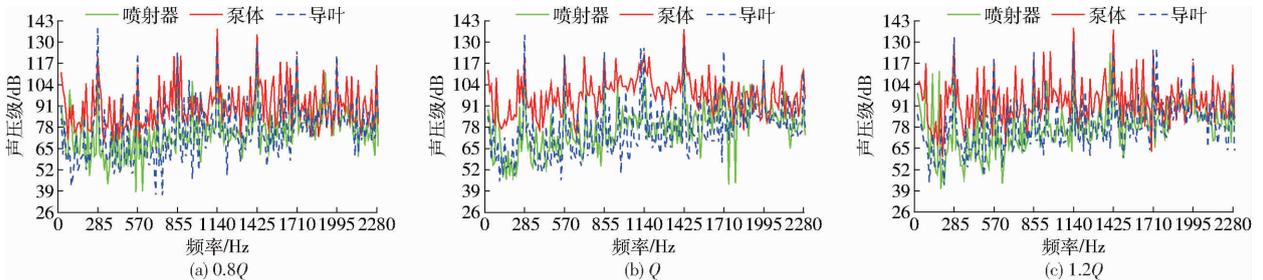


图5 定子部件出口监测点流动噪声

Fig.5 Flow-borne noise of stators at exit monitoring point

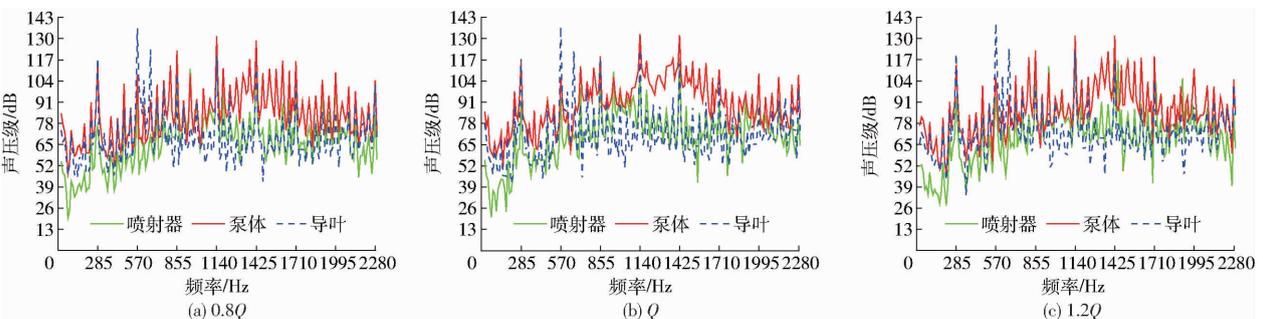


图6 定子部件出口监测点流激噪声

Fig.6 Flow-induced structure noise of stators at exit monitoring point

图 7 为 3 种工况下出口监测点位置定子部件两种声源在特征频率(轴频、叶频、叶频的倍频)处的

对比,可以看出,流动噪声和流激噪声随频率变化的趋势大体一致,流量对噪声水平的影响较小,且轴频

处两种声源的噪声水平普遍较低,不起主要作用;流体激励结构产生的流激噪声低于流体自身偶极子源产生的流动噪声,表明内场噪声主要由流体的压力脉动特性决定;导叶在 2 阶叶频(570 Hz)处出现流

激噪声明显大于流动噪声的现象,这是因为该频率与导叶的 1 阶固有频率(587 Hz)接近而导致流体和结构发生小幅共振,该现象表明定子部件的结构特性对内场噪声有一定影响。

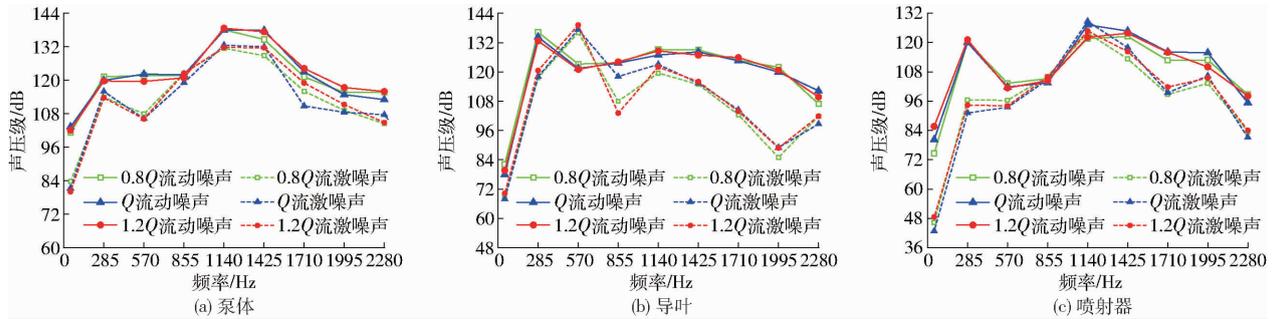


图 7 定子部件出口监测点两种声源对比

Fig. 7 Comparison of two kinds of sound source of stators at exit monitoring point

3.2 转子部件噪声及其特性分析

射流式离心泵转子部件只有叶轮一种,叶轮旋转偶极子声源包括前、后盖板及 6 个叶片表面的压力脉动数据,可采用求出叶轮轴频噪声的扇声源宽频算法进行求解,不同于叶频及其谐波算法,该方法在导入叶轮表面的压力脉动数据时无需进行傅里叶变换;将叶轮分为 10 部分,满足声源尺度相对声波波长紧致的需要,提高计算的准确性。图 8 给出了 3 种工况下叶轮宽频噪声在出口监测点位置的频响曲线。可以看出射流式离心泵叶轮旋转偶极子噪声以轴频(47.5 Hz)为周期呈现明显的脉动现象;不同于定子部件,叶轮的轴频噪声在流体动力噪声中起主导作用,达到 180 dB 左右;不同流量的声压级频率响应曲线变化规律一致,但小流量工况脉动幅度更大,这与小流量时叶轮内流动不稳定,容易发生流动分离、二次流等现象有关。

转系统和数据采集系统两部分。水泵运转系统满足该泵在各工况下正常运行的需要,包括泵、循环管路、电动机、阀门、电频柜、水箱等;数据采集系统则利用各类传感器对该泵运行时产生的相关瞬态和稳态物理量进行采集,然后转换为相应的电信号,并经过一系列处理转换成可供辨识的数据信号,包括:压力传感器、水听器、涡轮流量计、示波器、智能电参数测量仪、光电式转速仪等。水听器型号为 RHC - 10,使用频率范围为 0.02 ~ 20 kHz,接收声压灵敏度为 -206 dB,为保证与数值计算的监测点一致,2 个水听器分别安装在泵进、出口 3 倍管径处,使用型号为 UPO2104CS 的数字荧光示波器接收水听器输出的电压信号。试验测试系统如图 9 所示。

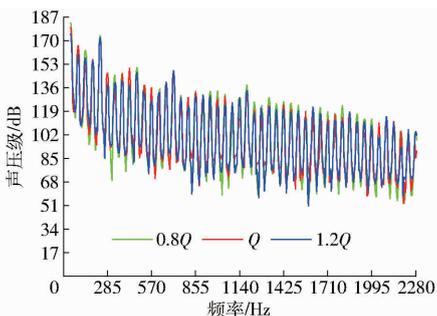


图 8 叶轮声压级频域响应曲线

Fig. 8 Frequency response curves of sound pressure level in impeller

4 试验验证

4.1 试验系统

为验证本研究中流场数值计算和声场数值计算的准确性,搭建了可进行射流式离心泵性能及内场流体动力噪声测试的试验台,该试验台包括水

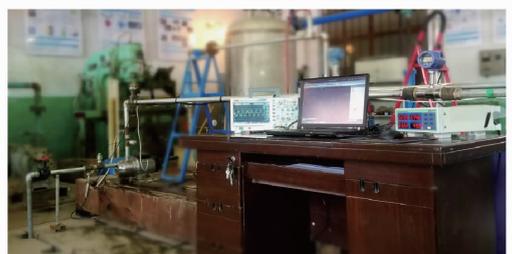
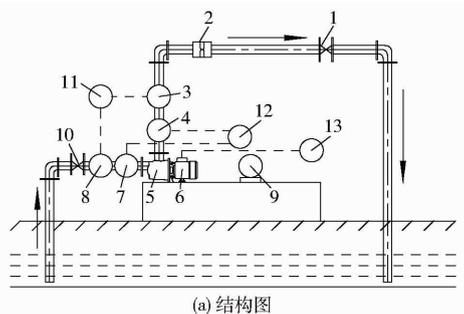


图 9 试验系统装置图

Fig. 9 Device photo of test system

- 1、10. 阀门 2. 流量计 3、8. 压力传感器 4、7. 水听器 5. 模型泵
- 6. 电动机 9. 转速仪 11. 计算机 12. 示波器 13. 电测仪

4.2 试验结果

进行射流式离心泵外特性和内场流体动力噪声测试试验。图 10 为该泵外特性曲线试验值与模拟值的对比;扬程与效率的最大误差均出现在流量为 3.5 m³/h 的工况下,其中扬程的误差为 4.6%,效率的误差为 4.1%,认为流场计算可为声场计算提供有效的声源信息。

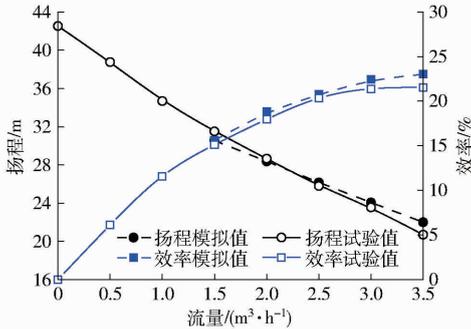


图 10 外特性试验与数值模拟对比

Fig. 10 Performance comparison of experiment and numerical simulation

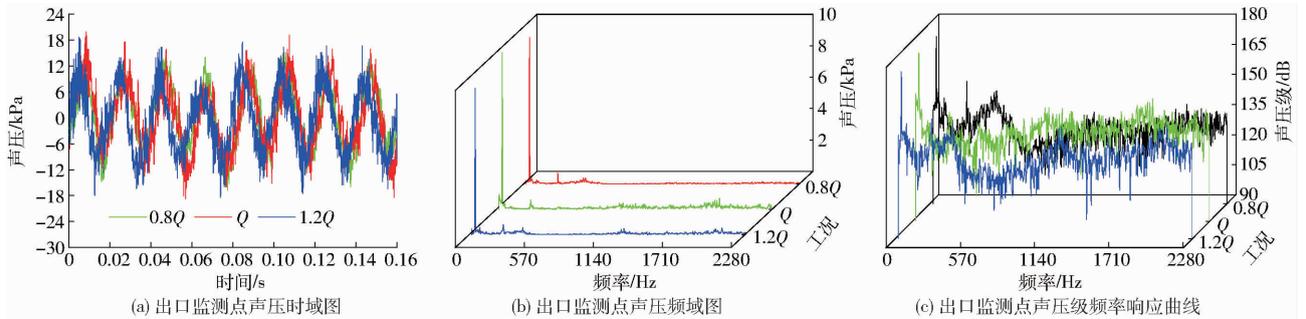


图 11 内场噪声测试结果

Fig. 11 Test results of interior noise

结果,需将各部件各种机理的模拟噪声结果在对应频率进行叠加。噪声叠加值计算公式为

$$L_p = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{pi}} \quad (4)$$

式中 L_{pi} ——各部件计算得到的各类噪声声压级
 数据处理结果如图 12 所示。由图 12 可知,各工况点模拟值与试验值在轴频和叶频处的结果基本

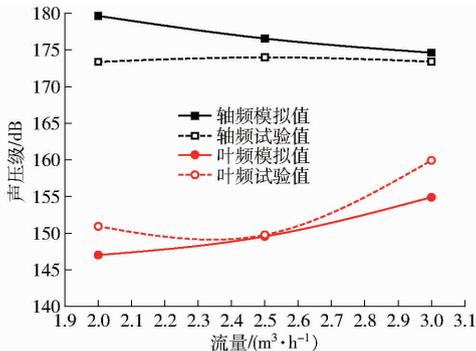


图 12 出口监测点轴频及叶频处声压级对比

Fig. 12 Comparison of sound pressure level of blade frequency and shaft frequency at exit monitoring point

内场噪声测试采样频率为 10 kHz,采样时长为 6 s(约 300 个叶轮旋转周期),在此基础上通过示波器输出水听器所采集到的电压信号,然后通过水听器灵敏度将电压信号转换为声压信号。图 11a 给出了出口位置 8 个叶轮旋转周期的声压时域图,图 11b、11c 分别为经过傅里叶变换后的声压频域图和声压级频率响应曲线。从图 11a 可以看出,各工况下声压的脉动周期与叶轮旋转周期完全一致,约为 0.02 s。图 11b 表明各工况下声压峰值主要出现在轴频(47.5 Hz)及叶频(285 Hz)处,并且轴频处的噪声起绝对主导作用。图 11c 可以看出,当频率小于 400 Hz 时,不同流量的噪声水平相当,但当频率大于 400 Hz 时,则呈现 Q 工况的噪声水平大于 1.2 Q 工况,而 1.2 Q 工况噪声水平又大于 0.8 Q 工况的情况。

4.3 试验结果与模拟结果对比

试验测试的流体动力噪声为各部件各种机理的流体动力噪声综合值,为对比数值模拟和试验测试

一致,轴频处的噪声模拟值大于试验值,小流量工况的误差最大,为 3.6%;而叶频处各工况的试验值大于模拟值,大流量工况的误差最大,为 3.3%;造成偏差的原因可能是流场计算对流动分离、二次流、漩涡、局部轻微空化等情况捕捉不精确,且声场计算忽略了噪声的透射和散射作用。

5 结论

(1) 数值计算与试验测试对比结果表明,轴频和叶频处两者噪声误差在 4% 以内,本文所述噪声数值计算方法具有较好的精度,采用大涡模拟湍流模型进行射流式离心泵内场噪声研究具有可行性。

(2) 叶轮和导叶的动静干涉以及流体和结构的共振均是诱发射流式离心泵内场噪声的重要因素,过流部件自身的结构特性对内场噪声有一定影响。

(3) 定子部件偶极子源诱发的内场流动噪声整体大于内场流激噪声,但在一些可能出现流体和结

构共振的特征频率处,流激噪声大于流动噪声,表明内场噪声主要由流体的压力脉动特性决定,但结构影响也不可忽视。

偶极子声源诱发的内场噪声在轴频(47.5 Hz)处最高达到180 dB左右,在射流式离心泵的内场噪声中起主导作用。研究结果为射流式离心泵的低噪设计提供了参考。

(4) 数值计算及试验测试结果表明:叶轮旋转

参 考 文 献

- 1 王维军,王洋,李贵东,等. 射流自吸式离心泵三维湍流数值模拟与试验分析[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(3):54-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140310&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.010.
WANG Weijun, WANG Yang, LI Guidong, et al. Numerical simulation and testing analysis of three dimensional turbulence flow in flow-ejecting self-priming centrifugal pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(3):54-60. (in Chinese)
- 2 李贵东,王洋,曹璞钰,等. 射流式离心泵非设计工况下内部流动研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(8):48-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150808&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.008.
LI Guidong, WANG Yang, CAO Puyu, et al. Internal flow of flow-ejecting centrifugal pump under off-design conditions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(8):48-53. (in Chinese)
- 3 刘建瑞,文海罡,高振军,等. 射流喷嘴几何参数对喷灌泵自吸性能的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(24):47-54.
LIU Jianrui, WEN Haigang, GAO Zhenjun, et al. Effects of geometric parameters for jet nozzle on self-priming performance of spray pump[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(24):47-54. (in Chinese)
- 4 张强. 气动声学基础[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- 5 SCHMITZ S. Reducing pump noise in cooling tower applications[J]. World Pumps, 2004(9):24-29.
- 6 王春旭,吴崇建,陈乐佳,等. 流致噪声机理及预报方法研究综述[J]. 中国舰船研究,2016,11(1):57-71.
WANG Chunxu, WU Chongjian, CHEN Lejia, et al. A comprehensive review on the mechanism of flow-induced noise and related prediction methods[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016,11(1):57-71. (in Chinese)
- 7 何涛,钟荣,孙玉东. 离心泵水动力噪声计算方法研究[J]. 船舶力学,2012,16(4):449-455.
HE Tao, ZHONG Rong, SUN Yudong. Numerical method on hydrodynamic noise of centrifugal pump[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012,16(4):449-455. (in Chinese)
- 8 丁剑,刘厚林,王勇,等. 叶片出口角影响离心泵噪声辐射数值研究[J]. 振动与冲击,2014,33(2):122-127.
DING Jian, LIU Houlin, WANG Yong, et al. Numerical study on the effect of blade outlet angle on centrifugal pump noise[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(2):122-127. (in Chinese)
- 9 刘厚林,丁剑,谈明高,等. 叶轮出口宽度对离心泵噪声辐射影响的分析与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(16):66-73.
LIU Houlin, DING Jian, TAN Minggao, et al. Analysis and experiment of centrifugal pump noise based on outlet width of impeller[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(16):66-73. (in Chinese)
- 10 王勇,刘厚林,刘东喜,等. 叶片包角对离心泵流动诱导振动噪声的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(1):72-77.
WANG Yong, LIU Houlin, LIU Dongxi, et al. Effects of vane wrap angle on flow induced vibration and noise of centrifugal pumps[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(1):72-77. (in Chinese)
- 11 代翠,孔繁余,董亮,等. 基于响应面法的离心泵透平水力和声学性能优化[J]. 农业工程学报,2015,31(15):40-47.
DAI Cui, KONG Fanyu, DONG Liang, et al. Hydraulic and acoustic property optimization for centrifugal pump as turbine based on response surface method[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 40-47. (in Chinese)
- 12 司乔瑞,林刚,袁寿其,等. 高效低噪无过载离心泵多目标水力优化设计[J]. 农业工程学报,2016,32(4):69-77.
SI Qiaorui, LIN Gang, YUAN Shouqi, et al. Multi-objective optimization on hydraulic design of non-overload centrifugal pumps with high efficiency and low noise[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 69-77. (in Chinese)
- 13 王洋,李贵东,曹璞钰,等. 泵腔内部环流对射流式自吸泵自吸性能的影响[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(11):129-133,145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141120&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.020.
WANG Yang, LI Guidong, CAO Puyu, et al. Effects of internal circulation flow on self-priming performance of flow-ejecting self-priming pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 129-133, 145. (in Chinese)
- 14 POSA A, LIPPOLIS A, VERZICCO R, et al. Large-eddy simulations in mixed-flow pumps using an immersed-boundary method[J]. Computers & Fluids, 2011, 47(1):33-43.
- 15 YANG Y, KR S K. Comparison of Reynolds averaged Navier-Stokes based simulation and large-eddy simulation for one isothermal swirling flow[J]. Journal of Thermal Science, 2012, 21(2):154-161.
- 16 PIOMELLI U. Large-eddy simulation: achievements and challenges[J]. Progress in Aerospace Sciences, 1999, 35(4):335-362.

- 17 王宏光,徐小龙,杨爱玲,等. 轴流泵流动噪声数值模拟[J]. 灌机械工程学报,2011,29(3):199-203.
WANG Hongguang, XU Xiaolong, YANG Ailing, et al. Numerical simulation of flow noise in axial-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(3):199-203. (in Chinese)
- 18 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 Houlin, DING Jian, WANG Yong, et al. Numerical simulation of hydrodynamic noise in centrifugal pump based on LES[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(18):177-183. (in Chinese)
- 19 董沛鑫,高明,管洪军,等. 变转速工况下离心泵蜗壳辐射噪声变化规律的数值研究[J]. 振动与冲击,2017,36(13):128-133.
DONG Peixin, GAO Ming, GUAN Hongjun, et al. Numerical simulation for variation law of volute radiated noise in centrifugal pumps under variable rotating speed[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017,36(13):128-133. (in Chinese)
- 20 Lighthill M J. On sound generated aerodynamically. I. General theory[J]. Proceedings of the Royal Society of London:Series A,1952,211(1107):564-587.
- 21 Lighthill M J. On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound[J]. Proceedings of the Royal Society of London:Series A, 1954, 222(1148):1-32.
- 22 Curle N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound[J]. Proceedings of the Royal Society of London:Series A, 1955, 231(1187):505-514.
- 23 Ffowcs-Williams J E, Hawkings D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1969,264(1151):321-342.
- 24 Zhang N, Shen H, Yao H. Numerical simulation of cavity flow induced noise by LES and FW-H acoustic analogy[J]. Journal of Hydrodynamics, Series B, 2010,22(5):242-247.
- 25 Farassat F. Theory of noise generation from moving bodies with an application to helicopter rotors[J]. Langley: NASA Langley Technical Report Server, 1975.
- 26 商德江,何祚镛. 加肋双层圆柱壳振动声辐射数值计算分析[J]. 声学学报,2001,26(3):193-201.
SHANG Dejiang, HE Zuoyong. The numerical analysis of sound and vibration from a ring-stiffened cylindrical doubled-shell by FEM and BEM[J]. Acta Acustica, 2001,26(3):193-201. (in Chinese)
- 27 李增刚,詹福良. Virtual Lab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- 28 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(2):1-14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160201&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.001.
WANG Fujun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(2):1-14. (in Chinese)
- 29 Ansys Inc. Ansys fluent theory guide[M]. Canonsburg: Ansys Inc.,2015.
- 30 王超越,王福军. 离心泵瞬态模拟中滑移界面形状和位置研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):81-88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170111&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.011.
WANG Chaoyue, WANG Fujun. Shape and position of sliding interface for transient flow simulation of centrifugal pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(1):81-88. (in Chinese)
- 31 吕琳. ANSYS 有限元结构分析及实例解析[M]. 北京:化学工业出版社,2014.
- 32 王泽鹏,胡仁喜,康士延,等. ANSYS Workbench 14.5 有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- 33 董亮,代翠,孔繁余,等. 离心泵作透平流体诱发内场噪声特性及贡献分析[J]. 机械工程学报,2016,52(18):184-192.
DONG Liang, DAI Cui, KONG Fanyu, et al. Flow-induced noise characteristic and contribution to interior noise for centrifugal pump as turbine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016,52(18):184-192. (in Chinese)