

变工况条件下离心泵诱导流噪声试验研究

张桐^{1,2}, 詹阳磊³, 李天匀^{1,2,4*}, 朱翔^{1,2,4}

¹华中科技大学船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉

²船舶与海洋水动力湖北省重点实验室, 湖北 武汉

³中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉

⁴高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海

Email: *ltyz801@hust.edu.cn

收稿日期: 2021年2月14日; 录用日期: 2021年3月9日; 发布日期: 2021年3月16日

摘要

离心泵是管路系统中的重要动力元件,也是管路系统中主要噪声源之一。在离心泵运行过程中,泵内流动诱导噪声向管路上下游传播。为了更好地了解离心泵诱导流噪声的大小,通过试验测试的方法,基于四端网络测量法,分析在不同流量及不同转速条件下离心泵进出口流噪声的变化规律。研究结果可为工程中离心泵流噪声控制提供参考。

关键词

离心泵, 四端网络法, 流噪声

Experimental Research on Induced Flow Noise of Centrifugal Pump under Variable Working Conditions

Tong Zhang^{1,2}, Yanglei Zhan³, Tianyun Li^{1,2,4*}, Xiang Zhu^{1,2,4}

¹School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan Hubei

²Hubei Key Laboratory of Naval Architecture & Ocean Engineering Hydrodynamics, Wuhan Hubei

³China Ship Development and Design Center, Wuhan Hubei

⁴Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai

Email: *ltyz801@hust.edu.cn

Received: Feb. 14th, 2021; accepted: Mar. 9th, 2021; published: Mar. 16th, 2021

*通讯作者。

Abstract

The centrifugal pump is an important power element and one of the main noise sources in pipeline system. During the operation of the centrifugal pump, the flow in the pump induces noise to propagate up and down the pipeline. In order to better understand the magnitude of the induced flow noise of the centrifugal pump, through the test method, based on the four-terminal network measurement method, the change law of the inlet and outlet flow noise of the centrifugal pump is analyzed under different flow rate and different speed conditions. The research results can provide reference for the control of centrifugal pump flow noise in engineering.

Keywords

Centrifugal Pump, Four-Terminal Network Method, Flow Noise

Copyright © 2021 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

作为重要的流体运输装置及能量转换设备, 泵广泛运用于国民经济各部门以及舰船、潜艇、航空航天等领域, 其中 70% 为离心泵[1]。在离心泵运行过程中, 泵内诱导流噪声不仅恶化了泵的性能, 降低其使用寿命, 而且影响工作环境的舒适性及声学隐蔽性[2] [3]。因此, 需对离心泵在不同工况下诱导流噪声开展研究, 掌握离心泵噪声特性, 从而控制其影响。

国外 Simpsont [4]对两个单蜗壳导叶泵进行噪声试验测试, 得出泵噪声产生的主要原因是由于内部流体和结构间的相互作用, 并基于试验数据, 提出预估泵噪声的经验公式。Chu 和 Dong 等[5] [6]通过 PIV (粒子位移)测试技术先得到离心泵蜗壳内速度分布, 通过计算转换成压力场, 结果表明泵内压力脉动主要是由于泵叶片和蜗壳隔舌间的相互干涉作用。Rzentkowski 等[7]应用管道声学测量中的单端口和双端口模型, 分析某模型泵的流动噪声, 得到泵声源特性曲线。同时, 国内学者在离心泵诱导噪声的试验研究上也作了大量工作。袁建平[8]基于自主搭建 PIV 专用试验台架对不同设计方案的离心泵进行内部流动测试, 并采用数值仿真与其对比, 为之后离心泵诱导流噪声试验研究提供基础。冯涛等[9]开发出一套离心泵噪声测试系统, 基于四端网络法可测试出不同工况下离心泵的水下噪声、空气噪声等参数。熊海芳[10] [11]介绍了四端网络、双传声器传递函数两种离心泵诱导流噪声测试方法, 为之后离心泵内部诱导噪声测试提供了方向。司乔瑞[12]利用四端网络法开展离心泵内部流噪声特性研究, 并采用数值模拟方法计算离心泵诱导流噪声, 计算结果与试验值吻合较好。由此可见, 四端网络法在测量声学特性上已经成为一种可行的手段。

本文以工程中某离心泵为例, 利用自主搭建流噪声测试台架, 基于四端网络法测量离心泵在不同转速、不同流量下进出口诱导流噪声, 结合试验结果分析其噪声特性, 为后期噪声控制优化提供参考。

2. 试验测试方法

离心泵具有一个进口端与出口端, 进出口端流体区域间存在声场耦合。由于离心泵流动诱导噪声属于低频噪声, 其内流道尺寸远小于声波波长, 所以此时的泵声源可以看作作为一个点声源或面声源。

因此可采用四端网络模型,用进出口端的状态参数及其之间的线性关系来模拟泵声源[13]。四端网络模型如图1所示。



Figure 1. Schematic diagram of the four-terminal network method
图1. 四端网络法示意图

图1中,1、2、3、4为声压测点, P_i^+ 和 P_i^- 为进口管路中方向相反的两列行波, P_o^+ 和 P_o^- 为出口管路中方向相反的两列行波, P_s 为模型泵声源, S 为声源矩阵。关系如下所示:

$$\begin{cases} P_o^+ \\ P_o^- \end{cases} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{cases} P_i^+ \\ P_i^- \end{cases} + \begin{cases} P_s^+ \\ P_s^- \end{cases} \quad (1)$$

要想获得声源矩阵 S ,需在无源状态下进行测试,即略去声源 P^s 项得:

$$\begin{cases} P_o^+ \\ P_o^- \end{cases} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{cases} P_i^+ \\ P_i^- \end{cases} \quad (2)$$

即:

$$\frac{P_o^+}{P_i^+} = S_{11} + S_{12} \frac{P_i^-}{P_i^+} \quad (3)$$

$$\frac{P_o^-}{P_i^+} = S_{21} + S_{22} \frac{P_i^-}{P_i^+} \quad (4)$$

令 $U = \frac{P_o^+}{P_i^+}$, $V = \frac{P_o^-}{P_i^+}$, $R = \frac{P_i^-}{P_i^+}$ 代入得:

$$U = S_{11} + S_{12}R \quad (5)$$

$$V = S_{21} + S_{22}R \quad (6)$$

由于实验中只能测得4个水听器的声压值,即 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 ,而 P_i^+ 、 P_i^- 、 P_o^+ 、 P_o^- 可用以下关系式表示:

进口管路:

$$P_1 = P_i^+ + P_i^- \quad (7)$$

$$P_2 = P_i^+ e^{-jks} + P_i^- e^{jks} \quad (8)$$

$$P_i^+ = \frac{e^{jks} P_1 - P_2}{e^{jks} - e^{-jks}} \quad (9)$$

$$P_i^- = \frac{-e^{jks} P_1 + P_2}{e^{jks} - e^{-jks}} \quad (10)$$

其中 s 为水听器之间的距离, k 为波数。

同理,出口管路:

$$P_3 = P_o^+ + P_o^- \quad (11)$$

$$P_4 = P_o^+ e^{-jks} + P_o^- e^{jks} \quad (12)$$

$$P_o^+ = \frac{e^{jks} p_3 - p_4}{e^{jks} - e^{-jks}} \quad (13)$$

$$P_o^- = \frac{-e^{jks} p_3 + p_4}{e^{jks} - e^{-jks}} \quad (14)$$

经过无源测试得到声源矩阵 S 各个参数, 之后根据每组有源工况测点测得声压值代入式(1)即得离心泵向进出口端诱导流噪声。

3. 试验测试简介

3.1. 试验测试台架

本文试验测试台架如图 2 所示, 试验系统由离心泵、变频电机、测试直管段、挠性接管、两段 15 m 软管、流量计、流量调节阀、换热器、压力水罐等组成, 设备均布置在钢铸平台上, 泵组采用弹性安装; 通过变频启动器调节电机转速; 换热器主要用于系统流体温度的控制, 防止长时间运行管路水温度过高; 测点水听器采用齐平式安装, 这样既能准确地测出信号又能减少流体流动的影响[12]; 本试验中, 水听器信号由 B&K PULSE 3560C 采集和分析处理。图 3 为试验台架现场图。

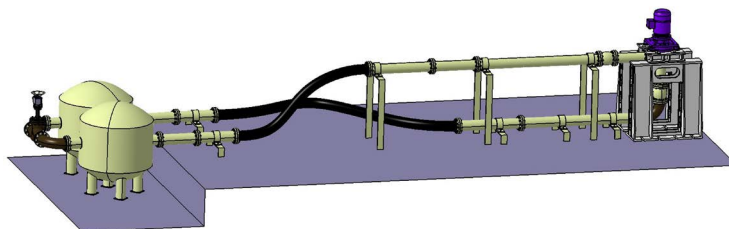


Figure 2. Schematic diagram of a centrifugal pump flow noise test bench
图 2. 离心泵流噪声测试台架示意图



Figure 3. Field diagram of the test bench
图 3. 试验台架现场图

离心泵性能参数如表 1 所示, 其轴频 $f_1 = n/60 \approx 49.2$ Hz, 叶频 $f_{BPF} = Zf_1 = 295$ Hz。

Table 1. Centrifugal pump performance parameters
表 1. 离心泵性能参数

| 性能 | 参数 |
|-------------------------|------|
| 额定流量(m ³ /h) | 80 |
| 设计扬程(m) | 20 |
| 额定转速 n(r/min) | 2950 |
| 叶片数 Z | 6 |

3.2. 试验测试步骤

- 1) 试验开始前, 首先检查循环水管路系统密封性以及各个设备、仪器是否正常;
- 2) 在泵不运转的条件下, 采用换能器作为外加声源, 获得两组线性无关的测试状态, 用来求解声源矩阵 S;
- 3) 启动变频电机, 待循环水管路系统运行稳定后根据不同工况要求改变电机转速(本文取 1200 r/min、1800 r/min、2400 r/min 及额定转速)以及通过流量调节阀改变流量(本文取 20 m³/h、40 m³/h、60 m³/h、80 m³/h、100 m³/h、120 m³/h);
- 4) 调整到指定工况, 在计算机上通过 B&KPLUSE 软件进行噪声测量及数据处理, 本文测试信号频率范围为 0~1000 Hz, 根据采样定理和工程要求, 采样频率为 2560 Hz, 记录保存数据;
- 5) 利用声源矩阵 S 和各工况下测点测得声压得到泵进出口诱导流噪声。

4. 结果分析

4.1. 额定转速、变流量

保持电机额定转速 2950 r/min 不变, 在不同流量下, 离心泵进出口流噪声如图 4~11 所示:

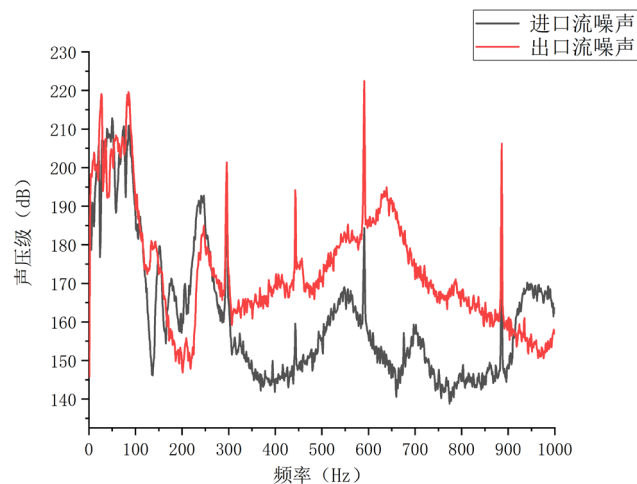


Figure 4. Flow noise at the inlet and outlet of 20 m³/h
图 4. 20 m³/h 进出口流噪声

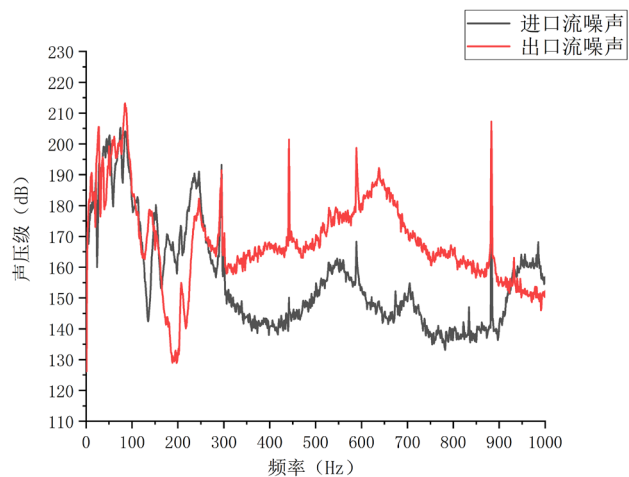


Figure 5. Flow noise at the inlet and outlet of 40 m³/h

图 5. 40 m³/h 进出口流噪声

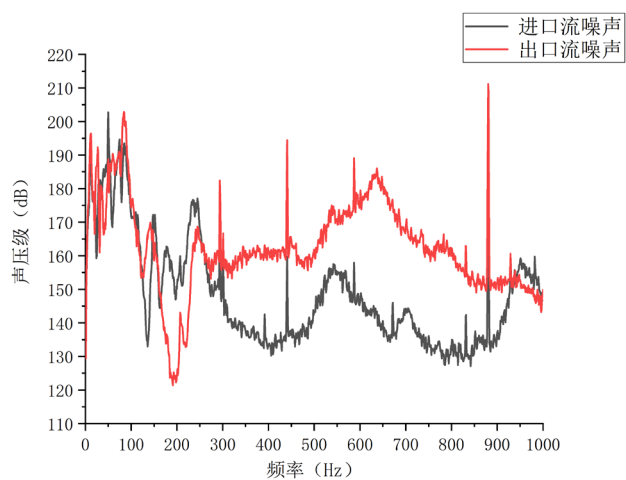


Figure 6. Flow noise at the inlet and outlet of 60 m³/h

图 6. 60 m³/h 进出口流噪声

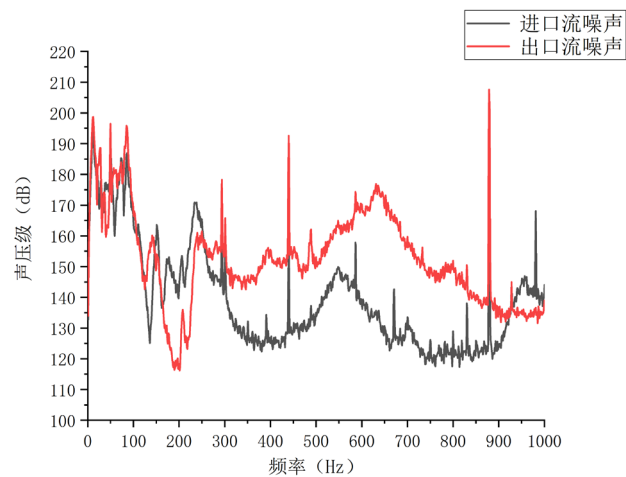


Figure 7. Flow noise at the inlet and outlet of 80 m³/h

图 7. 80 m³/h 进出口流噪声

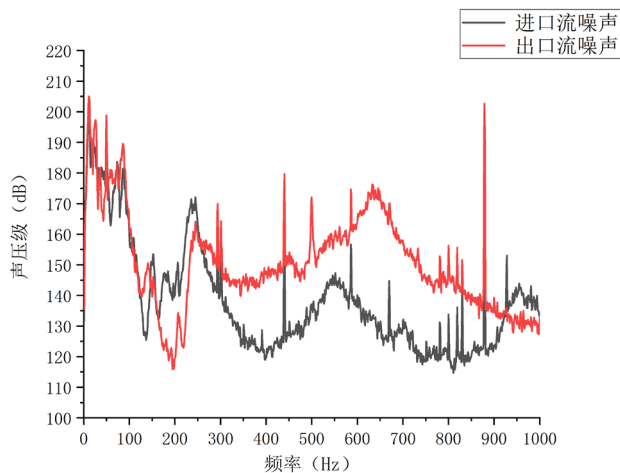


Figure 8. Flow noise at the inlet and outlet of 100 m³/h
图 8. 100 m³/h 进出口流噪声

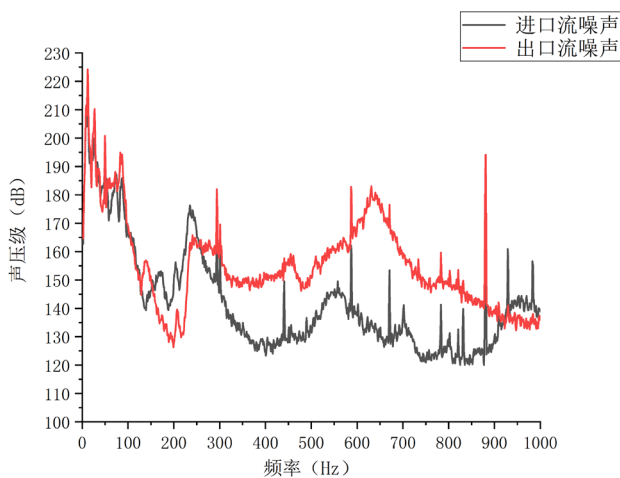


Figure 9. Flow noise at the inlet and outlet of 120 m³/h
图 9. 120 m³/h 进出口流噪声

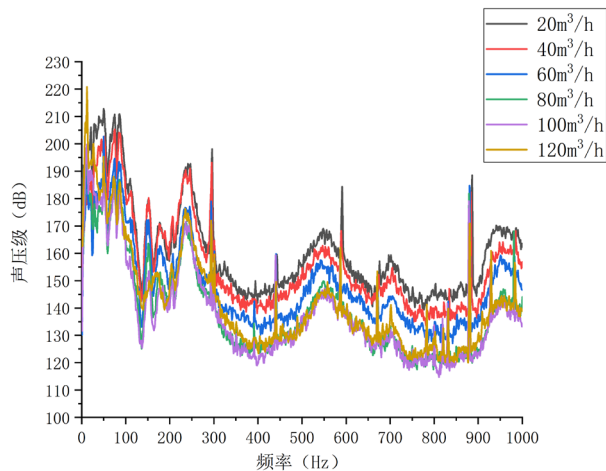


Figure 10. Pump inlet flow noise at rated speed and different flow rates
图 10. 额定转速不同流量下泵进口流噪声

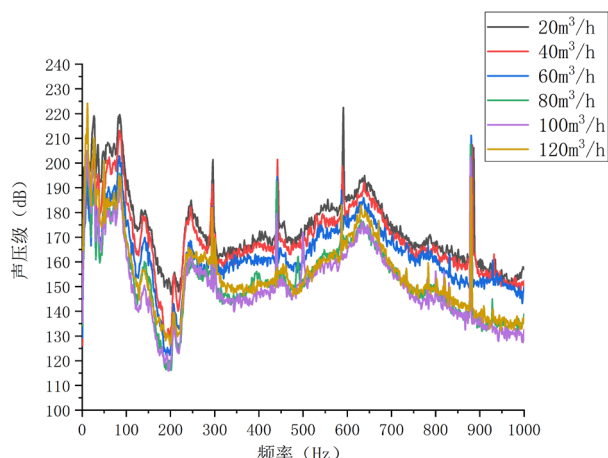


Figure 11. Pump outlet flow noise at rated speed and different flow rates
图 11. 额定转速不同流量下泵出口流噪声

由图 4~9 可得：在额定转速不同流量下，离心泵诱导流噪声出口处声压级大于进口处声压级，说明离心泵噪声源主要位于出口处；在不同流量工况下，泵进出口流噪声呈宽频特性，在离心泵轴频(49.2 Hz)、叶频(295 Hz)、二倍轴频(100 Hz)、二倍叶频(590 Hz)、三倍叶频(885 Hz)附近处均存在峰值，且峰值较高，结合文献[12]，说明叶片与内部流体的相互作用是离心泵诱导流噪声产生的主要原因。另外，在 443 Hz、671 Hz 下，离心泵流噪声也存在峰值，因为这些频率是管路系统的固有频率。综合图 10，图 11 可得：在 20 m³/h、40 m³/h、60 m³/h 小流量工况下，离心泵进出口诱导流噪声声压级较大，且随着流量的减小，流噪声增大，这是由于在小流量工况下运行时，离心泵内产生剧烈的不稳定现象，导致更大的压力脉动变化，进而诱导较大的流噪声；当在额定流量 80 m³/h、100 m³/h、120 m³/h 工况下，离心泵内进出口诱导流噪声较小，可知此时离心泵的效率较高，但在流量 100 m³/h、120 m³/h 工况下，流噪声频谱在高频处毛刺较多，泵内部诱导多余噪声。所以在实际工程应用中，应尽量调节离心泵至额定流量下工作，这时离心泵效率较高且噪声较低。

4.2. 额定流量、变转速

调节流量阀开度，保持额定流量 80 m³/h 不变，在不同转速下，离心泵进出口流噪声及各主要谐频分量如图 12~15 所示：

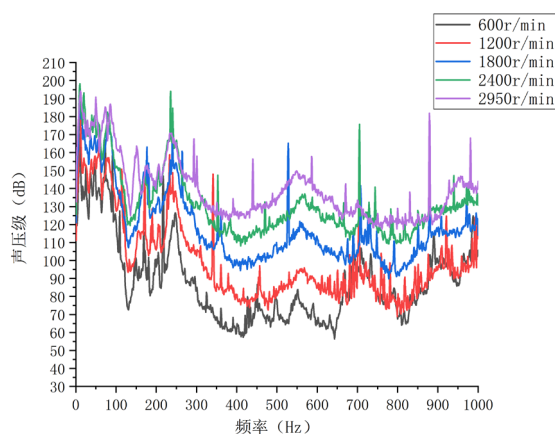


Figure 12. Pump inlet flow noise at rated flow and different speeds
图 12. 额定流量不同转速下泵进口流噪声

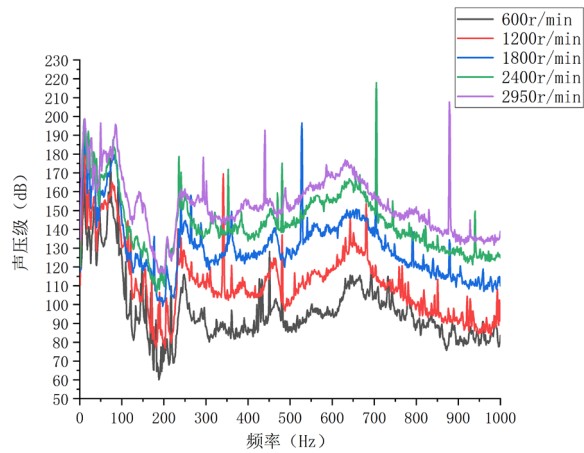


Figure 13. Pump outlet flow noise at rated flow and different speeds
图 13. 额定流量不同转速下泵出口流噪声

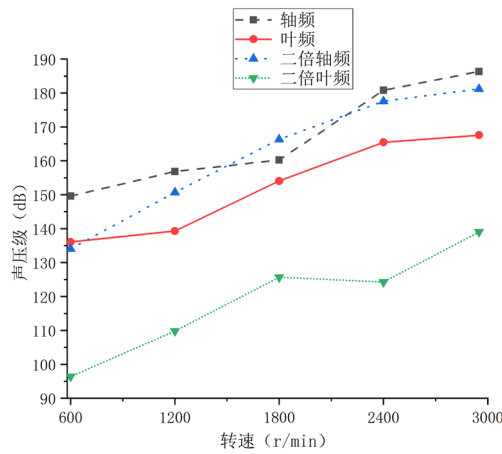


Figure 14. Flow noise of each harmonic component at the pump inlet
图 14. 泵进口各谐波分量流噪声

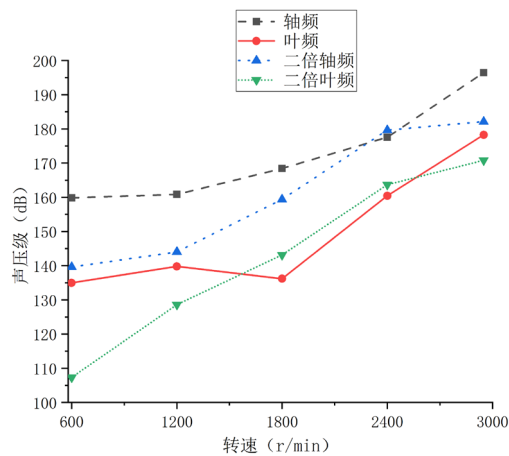


Figure 15. Flow noise of each harmonic component at the pump outlet
图 15. 泵出口各谐波分量流噪声

由图 12、图 13 可得: 在额定流量不同转速下, 泵进出口流噪声呈宽频特性, 在 1200 r/min、1800 r/min、

2400 r/min 及 2950 r/min (额定转速)工况下,其对应的轴频、叶频、倍叶频附近处流噪声均存在峰值高点,且出口处流噪声比入口处较大。通过图 14、图 15 可以看出,进出口各主要谐频分量随着转速增大,流噪声声压级幅值也增大,相邻工况间声压级幅值最大相差 20 分贝,说明叶轮转速对其流动噪声影响明显,叶片与流体间的相互作用是流噪声的主要来源。此结论与文献[14]一致,由此验证试验的准确性。所以,在不改变离心泵结构参数及满足离心泵基本功能的前提下,尽量降低离心泵泵轴转速对流噪声的控制效果明显。

5. 结论

本文通过离心泵流噪声测试台架,基于四端网络测试的方法,测量在不同流量与不同转速工况下离心泵进出口的流噪声。得出以下结论:

- 1) 离心泵诱导流噪声出口处声压级大于进口处声压级,在频域上呈宽频特性,且在轴频、叶频、倍叶频处峰值较高;
- 2) 在额定流量下,离心泵效率高且噪声低,偏离额定流量时,泵内出现不稳定现象,容易诱导噪声;
- 3) 离心泵轴转速对进出口流噪声影响显著,随着离心泵转速的增加,其进出口流噪声及主要谐频分量增加,说明叶片与流体间的相互作用是离心泵流噪声的主要来源。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51839005, 51879113); 中央高校基本科研业务费资助项目(2019kfyXMBZ048)。

参考文献

- [1] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [2] 俞孟萨, 吴有生, 庞业珍. 国外舰船水动力噪声研究进展概述[J]. 船舶力学, 2007(1): 152-158.
- [3] 柯兵, 谢志强. 管路系统声学设计技术的现状及发展趋势[J]. 中国舰船研究, 2008(2): 57-63.
- [4] Simpson, H.C., Clark, T.A. and Weir, G.A. (1967) A Theoretical Investigation of Hydraulic Noise in Pumps. *Journal of Sound and Vibration*, **5**, 456-488. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(67\)90192-7](https://doi.org/10.1016/0022-460X(67)90192-7)
- [5] Chu, S., Dong, R. and Katz, J. (1995) Relationship between Unsteady Flow, Pressure Fluctuations, and Noise in a Centrifugal Pump—Part A: Use of PDV Data to Compute the Pressure Field. *Journal of Fluids Engineering*, **117**, 24-29. <https://doi.org/10.1115/1.2816813>
- [6] Chu, S., Dong, R. and Katz, J. (1995) Relationship between Unsteady Flow, Pressure Fluctuations, and Noise in a Centrifugal Pump—Part B: Effects of Blade-Tongue Interactions. *Journal of Fluids Engineering*, **117**, 30-35. <https://doi.org/10.1115/1.2816814>
- [7] Rzentkowski, G. and Zbroja, S. (2000) Experimental Characterization of Centrifugal Pumps as an Acoustic Source at the Blade-Passing Frequency. *Journal of Fluids and Structures*, **14**, 529-558. <https://doi.org/10.1006/jfls.1999.0280>
- [8] 袁建平. 离心泵多设计方案下内流 PIV 测试及其非定常全流场数值模拟[D]: [博士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- [9] 冯涛, 刘克, 李晓宏, 佟小鹏. 离心泵水动力噪声测试系统的研制[J]. 流体机械, 2005(4): 27-30.
- [10] 熊海芳, 袁寿其, 袁建平, 刘阳, 杨勇, 张德胜. 离心泵内部流动诱导噪声的研究[J]. 水泵技术, 2007(3): 7-9+42.
- [11] 熊海芳, 袁寿其, 袁建平. 离心泵诱导噪声的研究现状与发展[C]//农业机械化与新农村建设——中国农业机械学会 2006 年学术年会论文集(上册). 镇江: 中国农业机械学会, 2006: 5.
- [12] 司乔瑞. 离心泵低噪声水力设计及动静干涉机理研究[D]: [博士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2014.
- [13] 路东岳. 离心泵流动噪声的变工况实验研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2017.
- [14] 王秋阳. 离心式海水泵流噪声仿真与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.