

基于有限元和边界元的印刷机声振特性研究

孙兆永^a, 陈羽泉^b, 刘一宁^b, 杜艳平^b, 白慧娟^b, 窦水海^{b*}

(北京印刷学院 a.基础教育学院 b.机电工程学院, 北京 102600)

摘要: **目的** 研究印刷机在高速运转过程中的振动和噪声特性, 为印刷机振动噪声抑制提供参考依据。**方法** 通过实地测试法和基于有限元和边界元的仿真方法对印刷机的声振特性展开研究, 首先对不同工况下的印刷机组外壳进行振动噪声实地测试, 然后利用仿真软件对印刷机建立有限元-边界元模型, 最后通过仿真计算, 分析印刷机的声辐射特性。**结果** 印刷机的振动和噪声主要集中在中低频段, 印刷机的声辐射主要由机组外壳提供, 在噪声实地测试中麦克风位置的仿真噪声频谱曲线存在多处共振峰。**结论** 噪声实地测试结果与仿真计算结果基本一致, 验证了仿真计算模型的可靠性, 可为印刷机振动噪声抑制提供参考依据。

关键词: 印刷机; 噪声; 振动; 有限元法; 边界元法

中图分类号: TB532; O329

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)21-0208-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.028

Noise and Vibration Characteristics of Printing Press Based on Finite Element and Boundary Element Method

SUN Zhaoyong^a, CHEN Yuquan^b, LIU Yining^b, DU Yanping^b, BAI Huijuan^b, DOU Shuihai^{b*}

(a. School of Basic Education, b. School of Mechanical and Electrical Engineering,
Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to study the vibration and noise characteristics of the printing press during high-speed operation, so as to provide reference basis for noise suppression. The field test method and the finite element and boundary element method were used to investigate the noise and vibration characteristics of the printing press. Firstly, the field test of vibration and noise were carried out on the shell of the printing press unit under different working conditions. Then, the simulation software was used to establish the finite element-boundary element model. Finally, through simulation calculation, the sound radiation characteristics of the printing press were analyzed. The vibration and noise of the printing press were mainly concentrated in the low and medium frequency bands, and the sound radiation of the printing press was mainly generated from the unit shell, and there were multiple resonance peaks in the simulated noise spectrum curves at the microphone position in the noise field test. The field test results of the noise were basically consistent with the trend of the simulation calculation results, which verifies the reliability of the simulation calculation model and provides a reference basis for the vibration and noise suppression of the printing press.

KEY WORDS: printing press; noise; vibration; finite element method; boundary element method

收稿日期: 2024-06-25

基金项目: 北京印刷学院校级项目 (Ea202306); 北京市教育委员会-市自然科学基金联合资助项目 (KZ202210015019); 北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目 (BPHR20220107)

*通信作者

随着印刷机制造水平的提升, 印刷机的印刷速度逐渐由中低速印刷向高速印刷发展。印刷机高速运转带来了严重的机械振动和噪声污染^[1], 由机械振动引起的印刷机设备故障^[2]和噪声污染造成的恶劣工作环境^[3], 是印刷机向绿色化、数字化、智能化和融合化转型过程中必须解决的问题^[4]。印刷机的结构较复杂、部件众多, 主要由输纸系统、传纸系统、印刷装置、油墨系统、收纸系统和机组外壳组成^[5]。印刷机内部的原动机、滚筒和风机产生的振动经过各个部件传递至机组外壳, 内部结构振动产生的噪声最终通过机组外壳辐射至工作环境。由此, 选取印刷机组外壳为研究对象, 分析机组外壳的振动和噪声特性, 对解决印刷机振动噪声问题具有重要的研究价值。

目前, 国内关于印刷机声振特性和声振耦合机理的研究仍处于起步阶段^[6], 大部分研究集中于单一零部件的振动特性分析, 如滚筒^[7-9]、轴承^[10-11]、飞达^[12]和链条^[13]等, 且模型较简单, 不能很好地应用于印刷机整体的振动噪声抑制。分析机械设备结构振动和噪声辐射特性的方法包括边界元法、有限元法、统计能量分析法和有限元-边界元法等^[6], 其中有限元-边界元法具有精确的边界处理和高效的计算能力, 适用于低频问题和复杂结构, 具有较强的耦合分析能力, 广泛应用于机械设备的声振特性研究。陈国杰等^[14]针对拖拉机驾驶室的振动噪声问题, 利用有限元-边界元法, 获得了驾驶室内部的振动噪声特性, 通过在声压最高处铺设吸声板, 实现了噪声的有效抑制。胡昊文等^[15]在有限元-边界元法的基础上, 结合细分曲面法和蒙特卡罗模拟, 提出了一种细分曲面-等几何边界元算法, 以水下壳体为研究对象, 实现了系统响应的准确预测。邓铁松等^[16]基于 2.5 维有限元-边界元法, 提出了一种将铝型材板等效为均质板的新方法, 对高速列车铝型材的声振特性进行了研究, 研究表明等效后的均质板与铝型材板能够在弯曲波频上实现较好的拟合。

综上所述, 针对印刷机高速作业过程中产生的振动噪声问题, 本研究首先对印刷机外壳的振动和噪声进行了实地测试, 并对采集到的振动和噪声数据进行了分析, 然后以测得的振动响应作为声源激励, 利用压力声学边界元方法, 对印刷机建立边界元模型, 最后研究指定声学边界条件下印刷机外壳的声辐射特性, 以上研究旨在为印刷机的减振降噪提供科学依据。

1 印刷机声振特性测试与分析

在使用有限元-边界元法进行振动噪声分析时, 一般需要先对印刷机进行振动噪声测试, 以获取实际的振动噪声数据, 这些数据可以用来校准和验证有限元模型的准确性, 从而确保分析结果的可靠性。这

里主要介绍印刷机在不同工况下的振动和噪声测试情况, 旨在为后续印刷机声辐射仿真分析提供数据支持。

1.1 振动与噪声测试

研究振动测试的对象为樱井 OLIVER-466SD 平板印刷机, 俗称胶印机^[17], 如图 1 所示。测试所用的测量仪器均来自北京东方振动与噪声技术研究所, 包括 1 个麦克风传感器 (INV9206) 和 4 个加速度传感器 (INV9821)。根据印刷机实际的作业场景, 在距离实验机组 1.5 m 处架设固定麦克风的三脚架, 麦克风距离地面的高度为 1.4 m; 4 个加速度传感器测点由上到下等间距排列, 间隔距离为 37.5 cm, 目的是比较和分析不同位置下印刷机的振动特性。通过信号采集仪 (INV362) 对振动噪声信号进行采集, 采样频率为 40 kHz, 将采集的信号最终存储至计算机内, 现场测试如图 2 所示。



图 1 测试对象
Fig.1 Test object

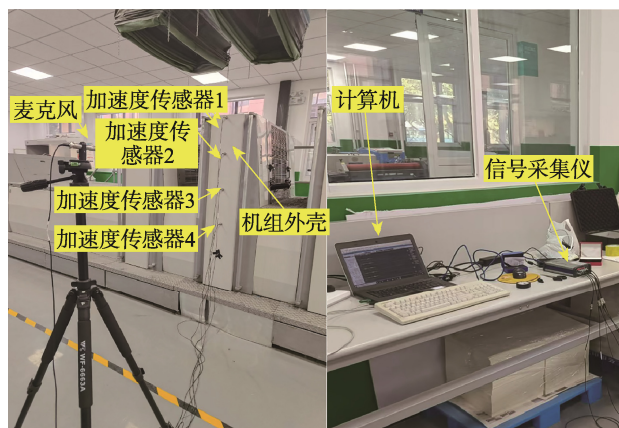


图 2 测试现场
Fig.2 Test site

该型号印刷机安全工作的转速区间为 8 000~11 000 r/min, 这里针对印刷机不同工况下振动噪声情况开展测试。在印刷机的安全作业区间内, 选取转速为 8 000、9 000、10 000、11 000 r/min 进行测试, 分别采集印刷机在空转及正常工作状态下的振动和噪声信号。印刷机测试工况见表 1。

表 1 印刷机测试工况
Tab.1 Printing press test conditions

工况类型	印刷机工作状态	转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	0	8 000
2	0	9 000
3	0	10 000
4	0	11 000
5	1	8 000
6	1	9 000
7	1	10 000
8	1	11 000

注: 工作状态 0 表示空转状态; 工作状态 1 表示正常作业状态。

1.2 振动测试数据分析

振动测试时使用了 4 个加速度传感器, 自上而下布置在印刷机组外壳上, 间隔距离为 37.5 cm, 用来获取机组外壳不同位置的振动信号, 为后续印刷机声

辐射特性分析提供较可靠的振动数据。由于该型号印刷机日常以 9 000 r/min 的转速运行, 故选取转速为 9 000 r/min 进行分析, 得到了 4 个加速度传感器的振动信号时域图, 如图 3 所示。印刷机在空转状态下的振动信号时域如图 3a~d 所示, 印刷机在正常工作状态下的振动信号时域如图 3e~h 所示, 从左到右依次为加速度传感器 1—4。由图 3 可知, 不同位置的加速度传感器的振动幅值存在差异, 加速度传感器 1、3、4 的振幅较小, 加速度传感器 2 的振幅较大。樱井 OLIVER-466SD 胶印机为单张纸平板胶印机, 该类印刷机的内部结构如图 4 所示。滚筒机组的高速转动是印刷机振动的主要来源^[9], 大倍径滚筒的质量较大, 具有较大的运动惯性, 会对振动幅值提供较大贡献。加速度传感器 2 位于大倍径滚筒附近, 加速度传感器 1、4 位于滚筒机组两侧, 加速度传感器 3 位于小倍径滚筒附近, 因此测得加速度传感器 2 的振动幅值略大于其他加速度传感器。此外, 区域结构共振也可能使加速度传感器 2 处的振动较大。

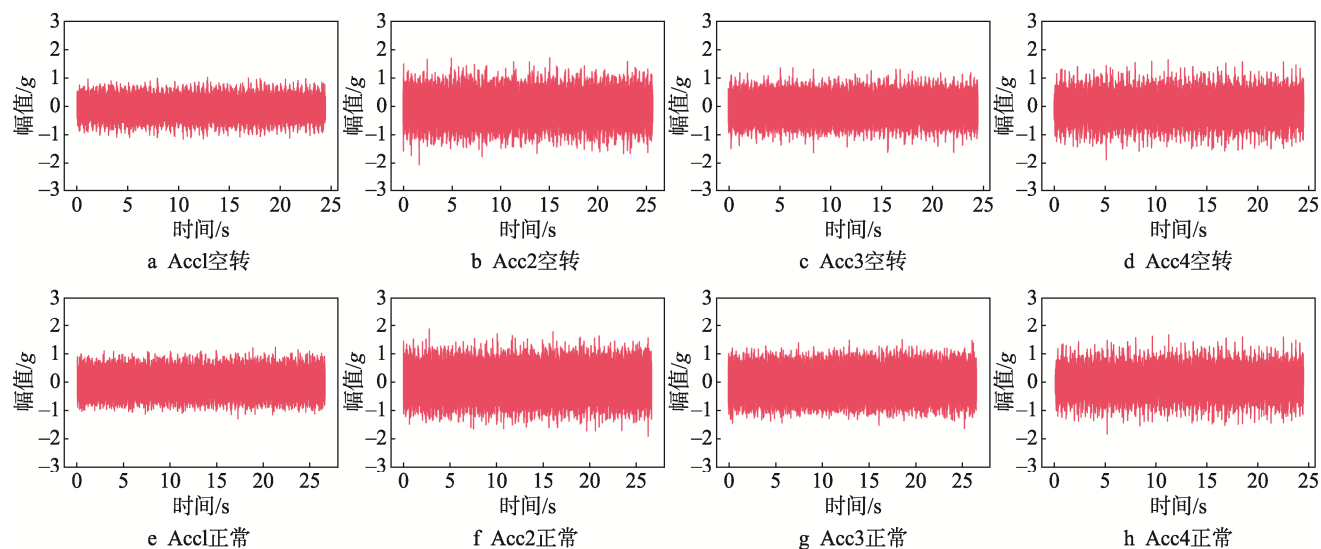


图 3 在 9 000 r/min 下印刷机振动信号时域

Fig.3 Time-domain graphs of vibration signal of the printing press at 9 000 r/min

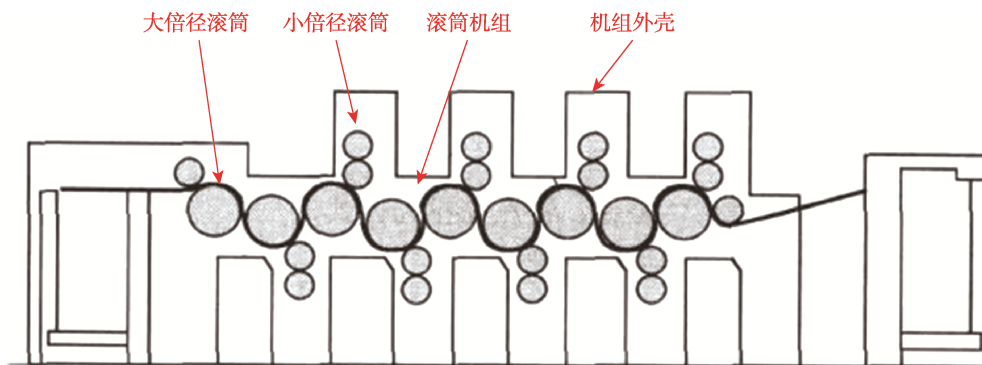


图 4 单张纸平板胶印机内部结构^[5]

Fig.4 Internal structure of a sheetfed flatbed offset press^[5]

对时域信号(图3)进行傅里叶变换,得到了印刷机的频域信号,如图5所示。加速度传感器1—4在不同工况下的振动频域信号如图5所示,红色为空转状态的频域信号,黄色为正常工作状态的频域信号。由图5可以看出,测得加速度传感器的高幅值振动信号主要在2 000 Hz以内。在频谱图中,虽然不同加速度传感器的测量位置不同,其振动峰值存在较小差异,但峰值对应的频率基本一致。

为了客观反映印刷机的振动情况,选取加速度传感器3来分析印刷机外壳在不同转速下的振动情况,测试结果如图6所示。空转状态如图6a~d所示,正常工作状态如图6e~h所示。由图6可知,随着转速的增加,印刷机的振幅逐渐增大,这是由原动电机、滚筒和风机的旋转运动加快所致。此外,正常工作状态的振幅大于空转状态,这是因为在纸张和油墨的作用下,印刷机部件间的摩擦和冲击更为严重,从而加剧了振动。

对时域信号(图6)进行了傅里叶变换,得到了不

同工况下的频域图(如图7所示),分别是转速8 000、9 000、10 000、11 000 r/min下的振动信号频域,红色为空转状态的频域信号,黄色为正常工作状态的频域信号。从图7可以看出,正常工作状态下的振动频域信号略高于空转状态下的频域信号,且测得加速度传感器的高幅值振动信号主要集中在2 000 Hz以下。

1.3 噪声测试数据分析

对麦克风采集到的噪声数据进行处理,得到8种不同工况下的噪声信号时域波形,如图8所示,从左往右,自上而下分别是工况1—8。从图8可以看出,在转速从8 000 r/min升至11 000 r/min的过程中,空转状态下印刷机的噪声幅值随着转速的提高逐渐增大;在正常工作状态下印刷机的噪声也呈上升趋势,但增幅小于空转状态下。由噪声和振动的变化趋势可知,随着印刷机转速的升高,原动电机、滚筒和风机的旋转运动愈加剧烈,由此产生的结构振动愈加严重,噪声源于振动,因此造成了更为严重的噪声。

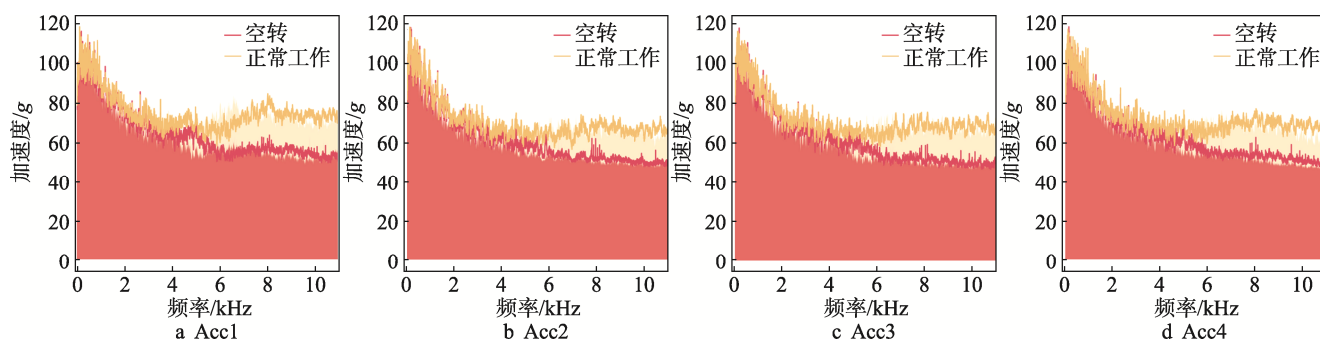


图5 在9 000 r/min下印刷机振动信号频域
Fig.5 Frequency domain graphs of vibration signal of printing press at 9 000 r/min

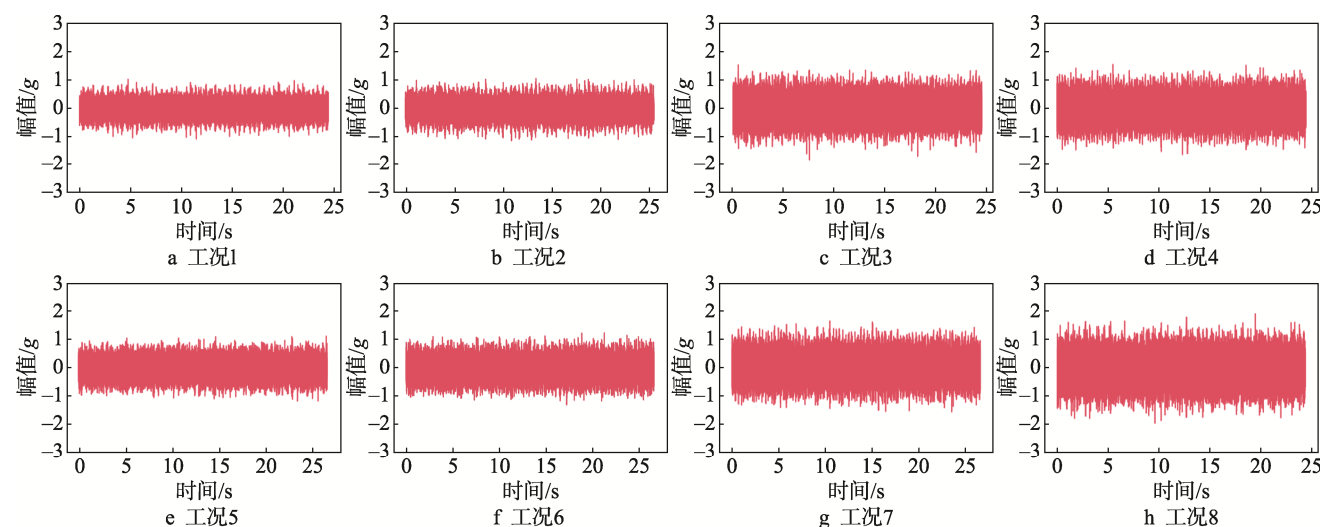


图6 不同工况下测得加速度传感器3的振动信号时域图
Fig.6 Time-domain graphs of vibration signals measured by accelerometer 3 under different working conditions

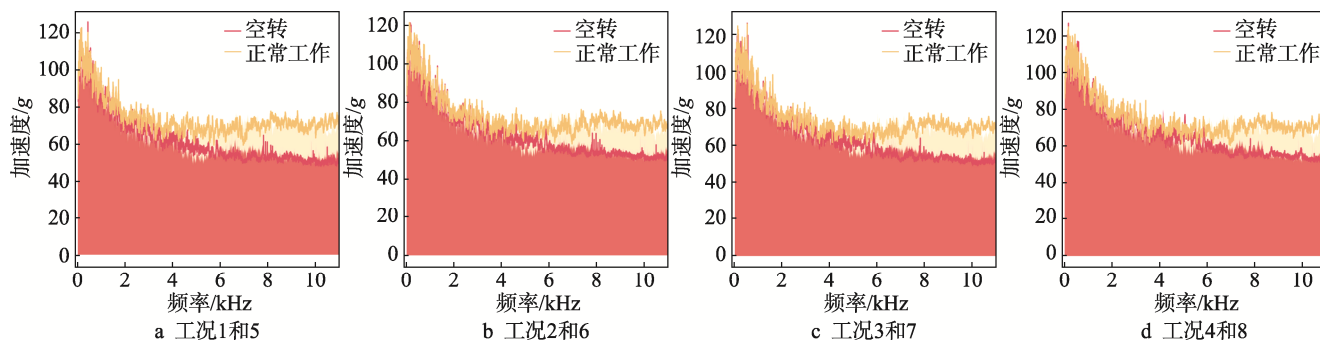


图 7 不同工况下测得加速度传感器 3 的振动信号频域图
Fig.7 Frequency domain graphs of vibration signals measured by accelerometer 3 under different working conditions

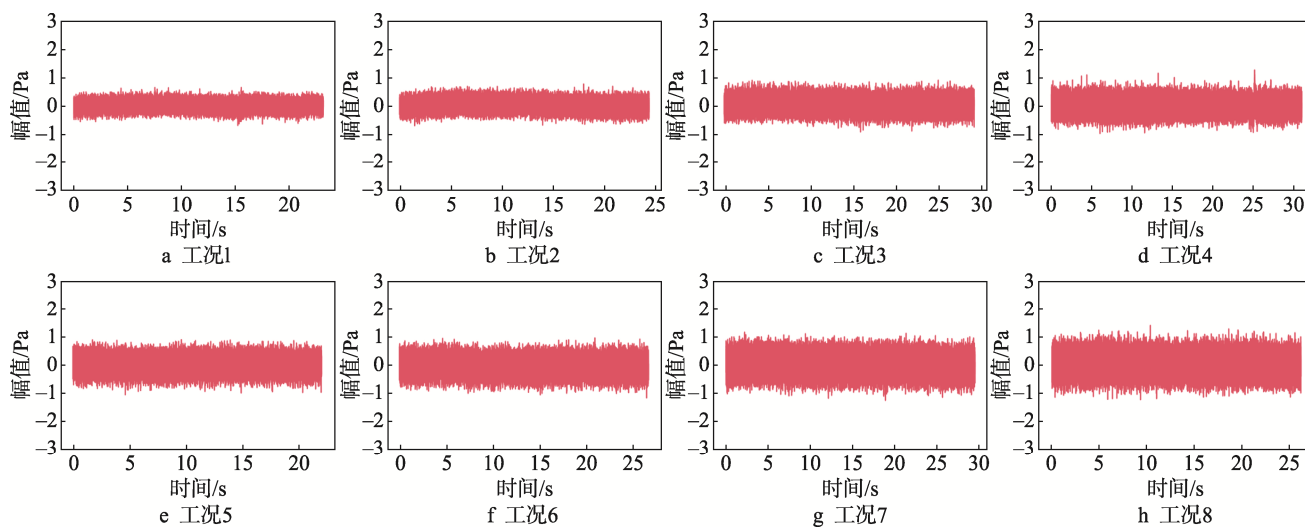


图 8 不同工况下印刷机噪声信号时域图
Fig.8 Time-domain graphs of noise signals of the printing press under different working conditions

对噪声时域信号进行傅里叶变换,处理后得到印刷机的噪声频域信号如图 9 所示。转速为 8 000、9 000、10 000、11 000 r/min 下 2 种工况的频域信号对比依次如图 9a~d 所示,红色为空转状态的频域信号,黄色为正常工作状态的频域信号。由图 9 可以看出,正常工作状态下噪声的频域信号明显高于空转状态下的

频域信号,在全频段内均高出 10 dB 左右。这是因为在空转状态下无纸张和油墨的作用,印刷机部件间的摩擦和冲击大大减少,因此振动相应减小。值得注意的是,在 8 种不同工况下,40 dB 以上的噪声主要存在于中低频段,即 0~2 000 Hz 频率范围内,故将后续印刷机声辐射特性仿真分析的频率范围定为 0~2 000 Hz。

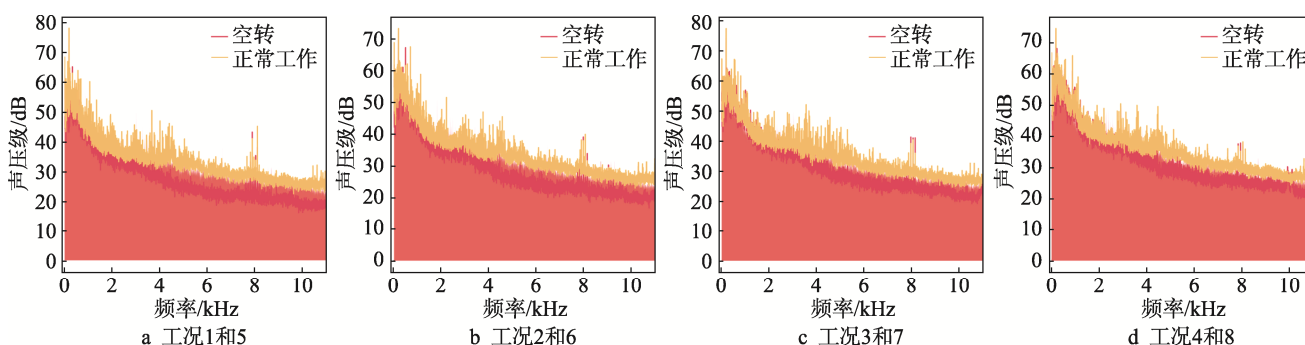


图 9 不同工况下印刷机噪声信号频域图
Fig.9 Frequency domain graphs of noise signals of the printing press under different working conditions

2 印刷机有限元-边界元模型建立

研究印刷机声振特性的前提是建立印刷机有限元-边界元模型, 在建模前先介绍印刷机声振耦合机理。设印刷机结构域为 α , 空气域为 β , s 为印刷机与空气域的接触面, 即声振耦合面。印刷机结构与声场的耦合主要受到结构振动方程和声波辐射方程的控制, 见式 (1) ~ (2)。

$$\nabla \cdot \sigma(x) + \omega^2 \rho_{\text{air}} u(x) = 0 \quad x \in \alpha \quad (1)$$

$$\nabla^2 p(x) + k^2 p(x) = 0 \quad (2)$$

式中: ∇ 为哈密顿算子; ω 为角频率; ρ_{air} 为空气的密度; $u(x)$ 、 $\sigma(x)$ 分别表示印刷机结构在点 x 处的位移和应力; $p(x)$ 为 x 点处的声压; k 为波数。

空气中的声辐射对结构的作用较小, 因此印刷机的声振耦合为弱耦合。此时, 耦合面上的边界条件见式 (3)。

$$v_0(x) + i\omega u(x) \cdot n_0(x) = 0 \quad x \in s \quad (3)$$

式中: v_0 为耦合界面处的质点振动速度; i 为虚数单位; ω 为角频率; n_0 为声场在耦合边界处的外法向矢量。

本研究仅考虑结构振动的声辐射, 属于外声场问题, 因此 n_0 的方向与结构耦合面处的外法向矢量方向相反。基于以上理论建立印刷机的有限元-边界元模型, 研究印刷机的声振耦合特性。

在印刷机实际工作中, 内部转子高速运转, 从而产生剧烈振动, 振动产生的噪声通过印刷机外壳向外辐射, 进而影响操作人员的作业环境。有限元-边界元法作为一种成熟的机械结构噪声分析方法, 广泛应用于振动噪声领域。这里通过建立印刷机有限元-边界元模型, 对印刷机指定表面施加法向加速度, 并对边界区域进行划分, 为下节研究印刷机声辐射特性提供模型支撑。以樱井 OLIVER-466SD 胶印机为建模对象, 首先利用 SolidWorks 三维建模软件构建被测印刷机的三维模型。由于印刷机具有整体结构较大、内部结构复杂等特点, 难以构建一个与实测印刷机内外结构一致的精细模型, 因此在构建模型的过程中,

将印刷机简化为仅包含整体结构外形的三维模型, 简化后的模型仅包含输纸系统、机组外壳、收纸系统等部分, 如图 10a 所示。然后将模型导入 COMSOL 仿真软件中, 在 COMSOL 中对印刷机的外部声场进行声学分析, 以前面所述 4 个加速度传感器测试得到的印刷机外壳振动信号为激励, 模拟印刷机外壳在正常工作状态 9 000 r/min 时的振动噪声情况, 并以此振动响应作为声源激励, 利用有限元-压力声学边界元方法, 建立印刷机有限元-边界元模型。

在有限元仿真计算中, 网格划分是模型计算的关键步骤, 它直接影响仿真计算结果的精度和计算效率。网格划分的粗细程度会对印刷机仿真模型的声辐射分析结果带来较大影响, 为了最小化网格划分对计算结果带来的计算误差, 有限元模型的网格划分需满足网格尺寸小于求解频率最小波长的 1/6, 见式 (4)。

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

式中: L 为印刷机模型网格单元尺寸; c 为弹性波在铝板中的波速; f_{max} 为最大求解频率, 这里取值为 2 000 Hz。

弹性波在铝板中的波速约为 2 900 m/s, 据此可计算出印刷机模型最大有限元网格尺寸为 0.241 m, 划分印刷机仿真模型的最大网格尺寸为 0.2 m, 满足网格尺寸小于求解频率最小波长的 1/6 的要求。最小网格为 0.1 m, 最大单元增长率为 1.5, 曲率因子为 0.6, 印刷机有限元网格划分如图 10b 所示。划分印刷机模型网格后, 将测得的印刷机组组外壳振动数据映射至印刷机表面, 建立印刷机有限元-边界元模型。如图 10a 所示, 将测得的加速度传感器 1、2、3、4 振动数据通过插值函数自上而下添加到法向加速度施加面上, 施加位置与实测的加速度传感器布置对应。

在边界元分析中, 需划定设计模型的分析边界区域。这里采用三维栅格对模型的边界区域进行划定, 如图 11a 所示, 后续的声辐射特性分析研究基于此边界展开。为了方便后续分析, 将 6 个边界面根据上下左右前后 6 个方向分别命名为 1、2、3、4、5、6 面, 如图 11b 所示。

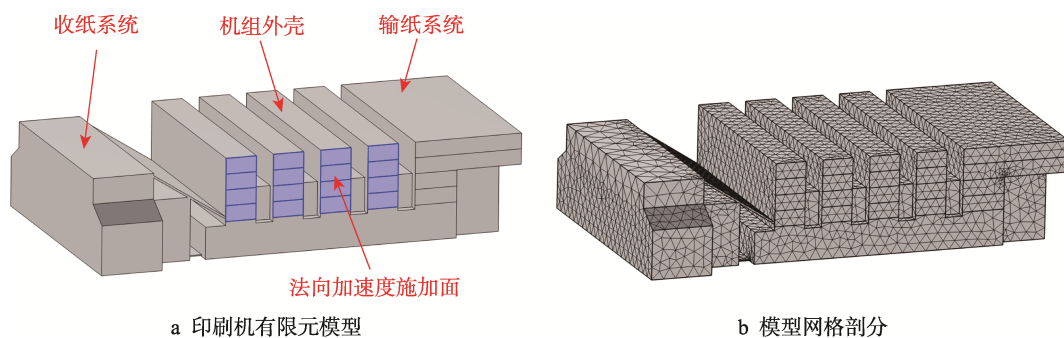


图 10 印刷机仿真模型和有限元网格划分

Fig.10 Simulation model of the printing press and finite element meshing

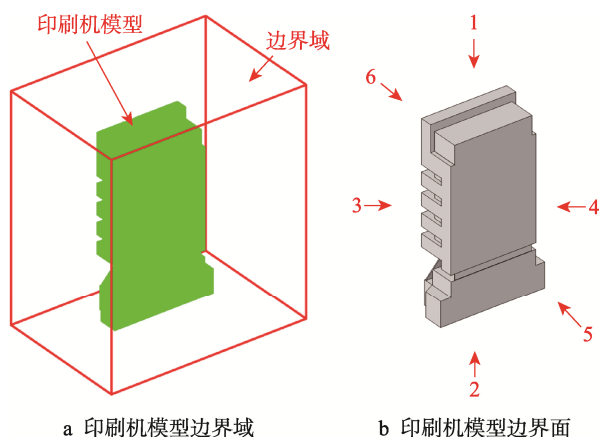


图 11 印刷机模型三维边界域
Fig.11 3D boundary domain of the printing press model

3 印刷机声辐射特性分析

根据实测的振动和噪声数据发现,较高的声压和振动幅值主要集中在中低频段,即 0~2 000 Hz 范围内,且中低频段的振动噪声抑制一直是振动噪声控制领域的一大难题,故本研究分析声辐射声压时选择的频率范围为 0~2 000 Hz。依据 COMSOL Multiphysics 软件中压力声学边界元模块的计算结果,对印刷机声辐射特性进行分析。印刷机分别在 50、100、150、200、250、300、350、400 Hz 下的边界域声辐射声压云图如图 12 所示,随着频率的增加,印刷机的声辐射噪声声压呈先增后减、再增再减的趋势,在 350 Hz 附近达到最大值,如图 12g 所示。通过比较 350 Hz 的声辐射声压云图中 6 个边界的声压分布情况,可知 6 面中心处的声压最高,即印刷机底部中心处,最大声压达到 1.75 Pa,如图 13a 所示。其次是 5 面靠

近输纸系统处,如图 13b 所示。

以噪声测试中麦克风的位置为仿真测试对象,研究该点的声压-频率关系,绘制印刷机噪声频谱曲线,如图 14 所示。由图 14 可知,模型仿真的总声压级先升后降,最大声压出现在 350 Hz 时的 89.85 dB 处,较高的声压级集中在低频段;印刷机机组外壳噪声频谱图中出现了多处共振峰,其频率分别为 125、225、350、425、575、625、850、925、1 225 Hz,通过对上述频率进行噪声抑制,如在印刷机收纸系统外表面铺设声学超材料吸声板,可有效降低印刷机噪声对环境的噪声污染。

印刷机声辐射特性仿真频谱分布趋势与噪声实测结果基本一致,但数值存在一定误差。这是由于本研究的实测振动信号是通过在一个机组外壳上设置 4 个加速度传感器测得,并以这一机组外壳上测得的振动信号作为仿真模型的振动激励。将法向加速度施加在 4 个机组外壳表面,以模拟印刷机实际工作时的振动情况。由于被测印刷机的实际振动情况较复杂,4 个印刷机组外壳的振动情况在实际中存在一定差异,导致仿真数据与实测数据之间存在误差。

通过实测和仿真的数据可知,印刷机的振动和噪声信号在频域中可分为低、中、高 3 个频段,印刷机的振幅和声压随着频率的增加而减小,高幅值的振幅和声压主要在中低频段。这一现象一方面表明印刷机自身配置的阻尼对高频振动具有良好的抑制效果,进而降低了高频的总声压级,另一方面也说明印刷机的中低频振动噪声抑制问题还需研究人员进一步探究。由于印刷机内部机械部件的共振频率大多位于中低频范围,当外部振动或噪声的频率接近这些部件的共振频率时,振动和噪声会被放大。此外,高频声波在传播过程中更易被吸收和散射,因此衰减更快,而中

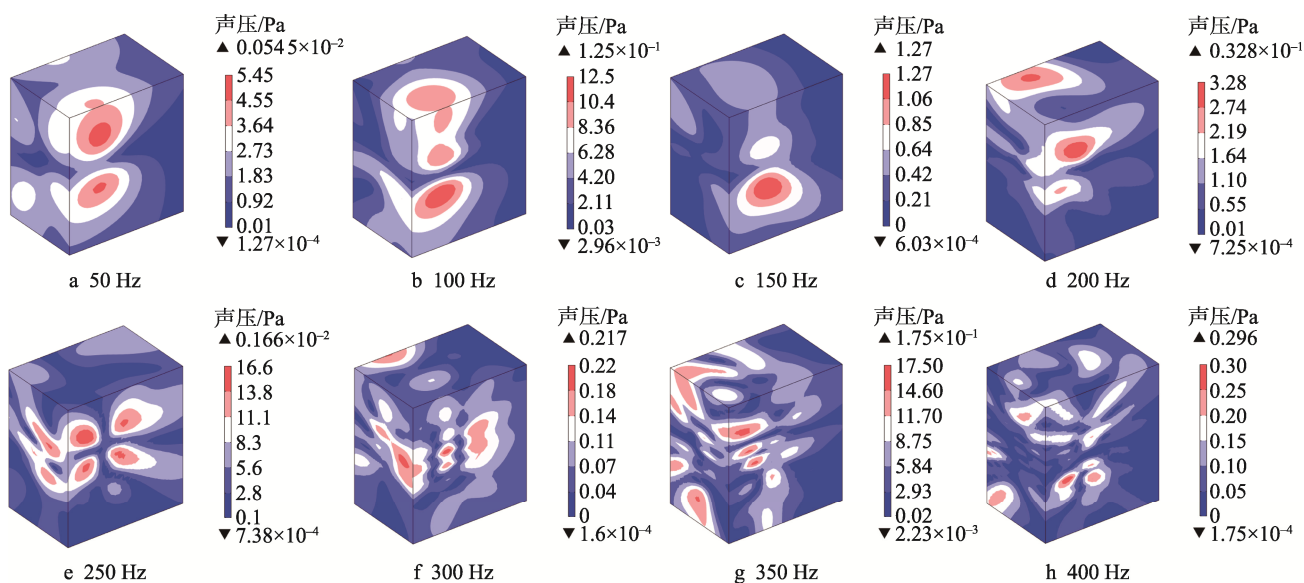


图 12 印刷机声辐射声压云图
Fig.12 Cloud map of the printing press radiation sound

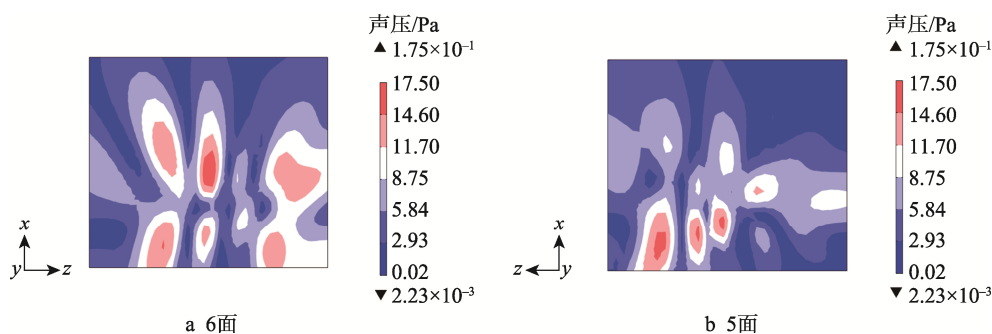


图 13 在 350 Hz 频率下 6 面和 5 面声压分布

Fig.13 Sound pressure distribution on 6 and 5 sides at 350 Hz frequency

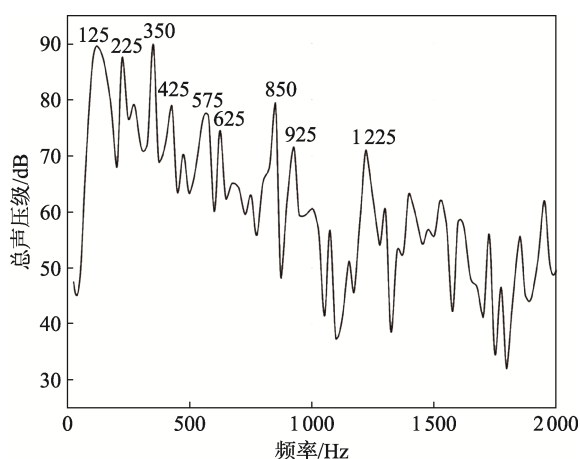


图 14 印刷机噪声频谱曲线

Fig.14 Noise spectrum curve of printing press

低频声波的波长更长、传播距离更远、穿透力更强,且不易衰减。在以上因素的共同作用下,难以处理印刷机中低频的振动噪声。由此,后续将针对印刷机中低频振动和噪声抑制方法展开研究,利用声学超材料和主动控制等新兴噪声抑制技术来实现印刷机全频段的振动和噪声的有效抑制。

4 结语

针对印刷机高速作业时的振动噪声问题,对印刷机的噪声和振动特性进行了研究。通过测试分析印刷机在不同工况下的噪声和振动特性,声压和振幅贡献较大的频段集中在 2 000 Hz 内。在测试的全频段内,正常工况的振幅和声压分别比空转工况的振幅和声压大 15g、10 dB 左右,噪声和振动随着印刷机转速的升高而增大。利用测得的振动信号数据,对印刷机进行有限元-边界元建模和仿真,声辐射贡献较大的区域集中在机组外壳的底部中心位置和顶部靠近输纸系统处。噪声测试位置的仿真噪声频谱曲线在 25~1 300 Hz 频段内存在多个共振峰,较高的声压级主要在低频段。印刷机声辐射特性仿真的噪声频谱分布趋势与噪声实测结果基本一致,验证了仿真计算模型的可靠性,有助于后续研究印刷机的振动和噪声抑制问

题。基于本文的测试和仿真结果,针对印刷机中低频宽带振动和噪声的抑制是下一步的主要研究方向。

参考文献:

- [1] 刘怡丰. 降低高速印刷机噪声的方法[J]. 印刷杂志, 2012(9): 41-42.
LIU Y F. Method of Reducing Noise in High-Speed Printing Machines[J]. Printing Field, 2012(9): 41-42.
- [2] 齐素平. 印刷机械故障监测及诊断技术研究[J]. 数字印刷, 2019(6): 11-15.
QI S P. Research on Printing Machine Fault Monitoring and Diagnostic Technology[J]. Digital Printing, 2019(6): 11-15.
- [3] 唐颖, 于曼, 陶晨悒, 等. 2 家印刷企业职业噪声暴露现状调查与评估[J]. 中国工业医学杂志, 2024, 37(2): 192-195.
TANG Y, YU M, TAO C Y, et al. Investigation and Evaluation on Present Situation of Occupational Noise Exposure in Two Printing Enterprises[J]. Chinese Journal of Industrial Medicine, 2024, 37(2): 192-195.
- [4] 佚名. 《印刷业“十四五”时期发展专项规划》发布[J]. 广东印刷, 2022(2): 11-16.
Anon. Special Programme for the Development of the Printing Industry in the 14th Five-Year Plan Period[J]. China Pulp & Paper Industry, 2022(2): 11-16.
- [5] 陈虹. 印刷设备概述[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017: 77-79.
CHEN H. Fundamentals of Printing Equipment[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2017: 77-79.
- [6] 孙兆永, 夏千里, 张翱, 等. 印刷装备振动噪声特性研究综述[J]. 包装工程, 2023, 44(9): 232-242.
SUN Z Y, XIA Q L, ZHANG A, et al. Research Progress on Vibration and Noise Characteristics of Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(9): 232-242.
- [7] 王仪明, 赵明明, 武淑琴, 等. 基于 AR 模型的印刷机滚筒扭矩及其振动试验研究[J]. 振动与冲击, 2016,

- 35(3): 226-230.
- WANG Y M, ZHAO M M, WU S Q, et al. Tests on the Torque Transfer and Torsional Vibration of Printing Machine's Cylinder with a Data Processing Method Combining AR Model and Wavelet Decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(3): 226-230.
- [8] 李建国, 王仪明, 张磊, 等. 基于 pulse 系统的印刷机压印滚筒振动特性研究[J]. 包装工程, 2012, 33(21): 86-90.
- LI J G, WANG Y M, ZHANG L, et al. Research of Impression Cylinder Vibration Characteristic Using Pulse System[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(21): 86-90.
- [9] 袁清珂, 杜亚男, 王同乐, 等. 印刷机滚筒的模态分析[J]. 包装工程, 2011, 32(15): 102-105.
- YUAN Q K, DU Y N, WANG T L, et al. Modal Analysis of Printing Cylinder[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(15): 102-105.
- [10] 章佳丽, 武吉梅, 高波, 等. 印刷机偏心滚子轴承接触应力与变形仿真分析[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 97-102.
- ZHANG J L, WU J M, GAO B, et al. Simulation Analysis of Contact Stress and Deformation for the Eccentric Roller Bearing in Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 97-102.
- [11] 马可, 田健楠. 印刷机用偏心轴承振动的测量[J]. 哈尔滨轴承, 2016, 37(1): 29-30.
- MA K, TIAN J N. Measurement of Vibration of Eccentric Bearing for Press[J]. Journal of Harbin Bearing, 2016, 37(1): 29-30.
- [12] 屠迪龙, 张媛, 朱磊, 等. 印刷机实时监测的振动能量收集器理论建模和实验验证[J]. 数字印刷, 2022(6): 92-101.
- TU D L, ZHANG Y, ZHU L, et al. Modeling and Implementation of Vibration Energy Collector for Real-Time Monitoring of Printing Press[J]. Digital Printing, 2022(6): 92-101.
- [13] 张海燕, 宋薇, 陈小军. 印刷机收纸链条横向振动的研究[J]. 包装工程, 2007, 28(6): 60-62.
- ZHANG H Y, SONG W, CHEN X J. Research on Transverse Vibration of Delivery Chain of Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(6): 60-62.
- [14] 陈国杰, 谢坤, 董万静. 基于有限元/边界元的拖拉机驾驶室振动噪声分析[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(6): 163-167.
- CHEN G J, XIE K, DONG W J. Vibration and Noise Analysis of Tractor Cab Based on FEM and BEM[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(6): 163-167.
- [15] 胡昊文, 王中王, 徐延明, 等. 结构声学耦合随机性分析的等几何有限元-边界元法研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(12): 159-167.
- HU H W, WANG Z W, XU Y M, et al. A Study on the Iso-geometric Finite Element-Boundary Element Method for the Stochastic Analysis of Structural Acoustic Coupling[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(12): 159-167.
- [16] 邓铁松, 肖新标, 圣小珍. 基于 2.5 维有限元-边界元的高速列车车体铝型材声振特性研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(1): 97-107.
- DENG T S, XIAO X B, SHENG X Z. Research on Vibro-Acoustics of Aluminium Extrusions from a High-Speed Train Body Based on Two-and-Half Dimensional Finite Element/Boundary Element Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(1): 97-107.
- [17] 乔俊伟, 杜龙飞. 胶印机输墨系统性能分析与结构优化[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2023(1): 80-86.
- QIAO J W, DU L F. Performance Analysis and Structure Optimization of Inking System of Off-Set Printing Machine[J]. Printing and Digital Media Technology Study, 2023(1): 80-86.