

印刷装备振动噪声特性研究综述

孙兆永^{1a}, 夏千里^{1b}, 张翱^{1a}, 孟涛^{1a}, 窦水海^{1b,1c}, 刘锋², 杜艳平^{1b,1c}

(1.北京印刷学院 a.基础教育学院应用物理与波动工程实验室 b.机电工程学院 c.新闻出版领域关键技术应用研究与服务综合实验室, 北京 102600; 2.东方振动和噪声技术研究所, 北京 100085)

摘要: **目的** 综述印刷装备振动噪声特性及其在故障诊断方面的研究进展。**方法** 通过文献调研, 了解当前学术界对印刷装备振动噪声特性的认知情况, 包括印刷企业噪声危害、印刷装备结构振动特性、印刷机噪声辐射, 以及基于结构振动及噪声辐射的印刷装备故障诊断等方面的研究现状, 并展望其发展前景。**结果** 目前对印刷装备的结构及声辐射特性的研究还处于初级阶段, 尚未系统地对印刷设备的声振特性进行分析, 针对印刷设备的降噪技术尚未起步。探讨印刷装备声振特性的研究进展将有助于研究者更好地了解及开展印刷装备降噪技术, 以及推进印刷装备故障诊断技术研究的发展。**结论** 针对印刷机结构声振机理的研究和分析具有较高的学术意义和应用价值, 该项研究会成为印刷装备降噪技术及故障诊断技术的基础。

关键词: 印刷机; 振动; 噪声; 故障诊断

中图分类号: TB535; O327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)09-0232-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.029

Research Progress on Vibration and Noise Characteristics of Printing Press

SUN Zhao-yong^{1a}, XIA Qian-li^{1b}, ZHANG Ao^{1a}, MENG Tao^{1a}, DOU Shui-hai^{1b,1c},
LIU Feng², DU Yan-ping^{1b,1c}

(1. a. Laboratory of Applied Physics and Wave Engineering, School of Basic Education b. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication c. Comprehensive Laboratory for Key Technology Application Research and Service in the Field of Press and Publication, Beijing 102600, China;
2. China Orient Institute of Noise & Vibration, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: The work aims to overview the research progress on vibration and noise characteristics of printing presses and their diagnosis. Literature research was conducted to understand the current academic cognition on vibration and noise characteristics of printing presses, including the noise hazard of printing enterprises, the structural vibration characteristics of printing presses, the noise radiation of printing presses, and the fault diagnosis of printing presses based on structural vibration and noise radiation. Its development prospect was also outlined. According to the review, it was found that current researches on structure and acoustic radiation of printing presses were still at a relatively preliminary stage. There was still a lack of systematic analysis on acoustic vibration characteristics of printing presses. Furthermore, re-

收稿日期: 2022-07-15

基金项目: 北京印刷学院校级项目 (Ed202206, 27170122003); 北京市教育委员会-北京市自然科学基金联合资助项目 (KZ202210015019)

作者简介: 孙兆永 (1987—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为声学超材料、振动与噪声控制。

通信作者: 刘锋 (1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为振动噪声主动控制; 杜艳平 (1971—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为印刷机动力学特性、智能制造。

search on noise reduction technology for printing presses has hardly started. Thus the review could help researchers better understand and carry out the research on noise reduction technology and noise based fault diagnosis technology of printing presses. The research and analysis on the mechanism of noise and vibration of printing machine structure has high academic significance and application value. It has the potentials to become the basis for noise reduction technology and fault diagnosis technology of printing presses.

KEY WORDS: printing press; vibration; noise; fault diagnosis

印刷产业是我国新闻出版业的重要组成部分, 同时具有文化业和制造业属性, 已经渗透在教育、传媒、包装、机械制造等多个影响国民经济发展的领域中, 是我国国民经济的重要产业支撑。我国印刷业“十四五”发展规划提出, 在“十四五”期间将继续推动我国印刷业“绿色化、数字化、智能化、融合化”的快速发展, 快速稳健地实现从印刷大国到印刷强国的重大突破。根据“十四五”发展规划, 在 2025 年底我国印刷业总产值将超过 1.4 万亿元, 同比增加 3.5%, 继续保持第二印刷大国的领先地位^[1-3]。印刷技术极大地丰富和方便了人们的生活, 同时也面临严峻的噪声问题, 印刷工人长期在高分贝噪声环境中工作, 可能会出现严重的健康问题, 如听力损失、睡眠障碍、疲劳、高血压、心血管疾病、认知障碍等^[4-6]。

印刷机是印刷业最重要的生产设备, 主要由传动、输纸、定位、传纸、印刷、输墨、润湿、收纸等部件和控制系统组成。印刷机的转动速度可达 20 000 r/h, 其在高速运转时会产生较强的振动和噪声辐射。此外, 由于长期高速运转造成的机械磨损会导致振动和噪声的进一步加强, 因此印刷机结构噪声辐射是印刷企业噪声水平过高的主要原因。印刷机振动和噪声除了对工作人员的身心健康产生影响之外, 还会对印刷机的构件寿命、印刷产品的质量等产生影响。此外, 印刷机结构复杂、部件繁多, 其中传动、输纸、印刷等部分均会产生严重的振动和噪声, 这增加了识别印刷机振动噪声的难度, 为控制振动与噪声带来一定的困难。另一方面, 印刷设备在正常工作时会产生结构振动和声辐射, 振动和声信号与设备的工作状况紧密相关。当设备出现故障(如轴承严重磨损、中心滚筒压力异常等)时, 往往会伴随着异常的振动及声学信号。通过对印刷单元的振动及声学信号进行研究分析, 总结和归纳不同故障对应的振动及声学信号特征, 能够较好地实现印刷设备的故障诊断。

文中立足于印刷设备的振动及声学特性, 对印刷企业噪声污染, 印刷装备振动及噪声特性, 以及印刷装备基于振动及声信号的故障诊断技术等方面进行调研, 并对当前的研究成果进行综述, 分析印刷设备的声振特性研究趋势及当前研究还存在的问题, 拟为后期的研究提供一定的参考。

1 印刷企业噪声污染现状

在印刷包装行业工作过程中面临着严峻的职业危害, 危害来源主要包括有毒物质、粉尘、车间噪声等, 可能会对工作人员的身心健康造成严重影响。根据国内外的研究报告, 多数印刷企业的噪声水平过高, 印刷工人长期在高分贝噪声环境中工作, 导致严重的听力损失^[7-13]。除此之外, 长期在高水平噪声环境中工作可能会出现严重的健康问题, 如睡眠障碍、疲劳、高血压及心血管疾病等。

张小会等^[14]对上海市的 5 家印刷企业进行了卫生学调查和监测, 结果表明, 印刷企业可能产生的主要职业病危害因素包括有毒物和噪声。尽管被调研企业在噪声控制方面一直做得较好, 但车间噪声仍高达 94 dB 的水平。张丽丽^[15]对胶印车间包括噪声在内的职业危害因素进行了检测和分析, 利用 TOPSIS 方法进行建模, 通过职业危害综合控制决策方法分析, 提出了优化方案。曾雪娇等^[16]对上海普陀区的 25 家印刷企业的职业卫生现状进行了分析, 指出噪声超标率为 39.58%, 其中大型印刷企业的噪声超标率高达 90%, 接触噪声的作业人员的职业健康检查率为 74.20%, 表明噪声为上海市普陀区印刷企业风险较高的职业病危害因素, 是职业卫生监督管理和职业病防治的重点方向。伍家琪等^[17]对北京某印刷企业的调研结果表明, 该企业车间内某些检测点的噪声严重超标, 主要集中在印刷机进纸、出纸等 2 个关键控制点岗位, 并提出可通过佩戴降噪耳机及对关键控制点进行物理降噪等方法来降低噪声污染带来的职业伤害。当印刷车间的多台印刷设备共同工作时, 印刷设备噪声辐射所产生的声场较复杂, 对于低频噪声可以把印刷设备看作点源。Lomen 等^[18]通过 Softnoise 软件计算了印刷设备位于不同位置时印刷车间噪声声场的分布情况, 结果表明, 可以通过控制印刷设备的位置来实现车间噪声的抑制。

由于印刷企业的噪声污染往往伴随着有毒溶剂污染, 如甲苯、二甲苯等, 因此有毒溶剂和噪声污染共同对工作人员的影响是一个值得探究的课题。Mhamdi 等^[19]对软包装印刷机中溶剂和噪声的共同作用情况进行了人机工程学评估, 指出有机溶剂和噪声的共同作用造成了恐慌和焦虑气氛, 尤其对接

触有毒物质处理超过 20 年且接触高噪声水平的老年操作人员。Alabdulhadi 等^[20]对印刷企业中工人的个体噪声暴露水平进行了评估,在该研究中,通过让 104 个工人都佩戴噪声剂量计的方式,对每个人的噪声暴露情况做了评估。计算机制版机操作员的平均噪声暴露水平约为 75 dB(A),很少有超过 85 dB(A)的。胶版印刷机操作人员多处于高于 85 dB(A)的噪声环境中。操作卷筒纸胶印机的工作人员有一半以上的时间处于高于 85 dB(A)的噪声环境。这里的 A 指 A 计权噪声,噪声声压级测量有 Z、A、C 频率计权 3 种方法,其中 A 计权法最能反应人耳对噪声的主观感知。Gamze 等^[21]对数十家印刷企业的不同环境做了噪声水平测试,从每家公司中选出 1 名在其中一家公司工作至少 10 年且从未使用过个人防护设备的工人,并进行了听力测试,将测试结果与没有听力损失的工人的听力图进行对比发现,长期处于噪声环境的印刷工人存在严重的听力损失,见图 1a、b。Cabello-Lopez 等^[22]通过对墨西哥城一家印

刷厂的印刷工人进行听力测试,研究和分析了工人的听力状况与工龄之间的关系。在该项研究中,研究者设计了 2 组样本,分别为 176 名处于噪音和有机溶剂(包括二甲苯)中的男性印刷工人和 103 名未暴露噪声和有机溶剂的男性工人,用纯音测听法评估了 2 组样本的听阈。结果表明,2 组样本表现出明显的听力阈值差异,随着工龄的增加,听力阈值更差,见图 1c、d。

以上研究对印刷企业的噪声污染水平及对印刷工人的职业伤害进行了深入的评估和分析,为印刷工人职业保护提供了可靠的理论依据,同时也为印刷设备振动与噪声控制的必要性提供了科学依据。

2 印刷装备振动噪声特性研究现状

我国学者在 20 世纪 80—90 年代对印刷设备的振动及噪声做了一定研究,提出了相应的减振降噪方案^[23-26]。由于技术较简单、降噪设备较重,无法适用

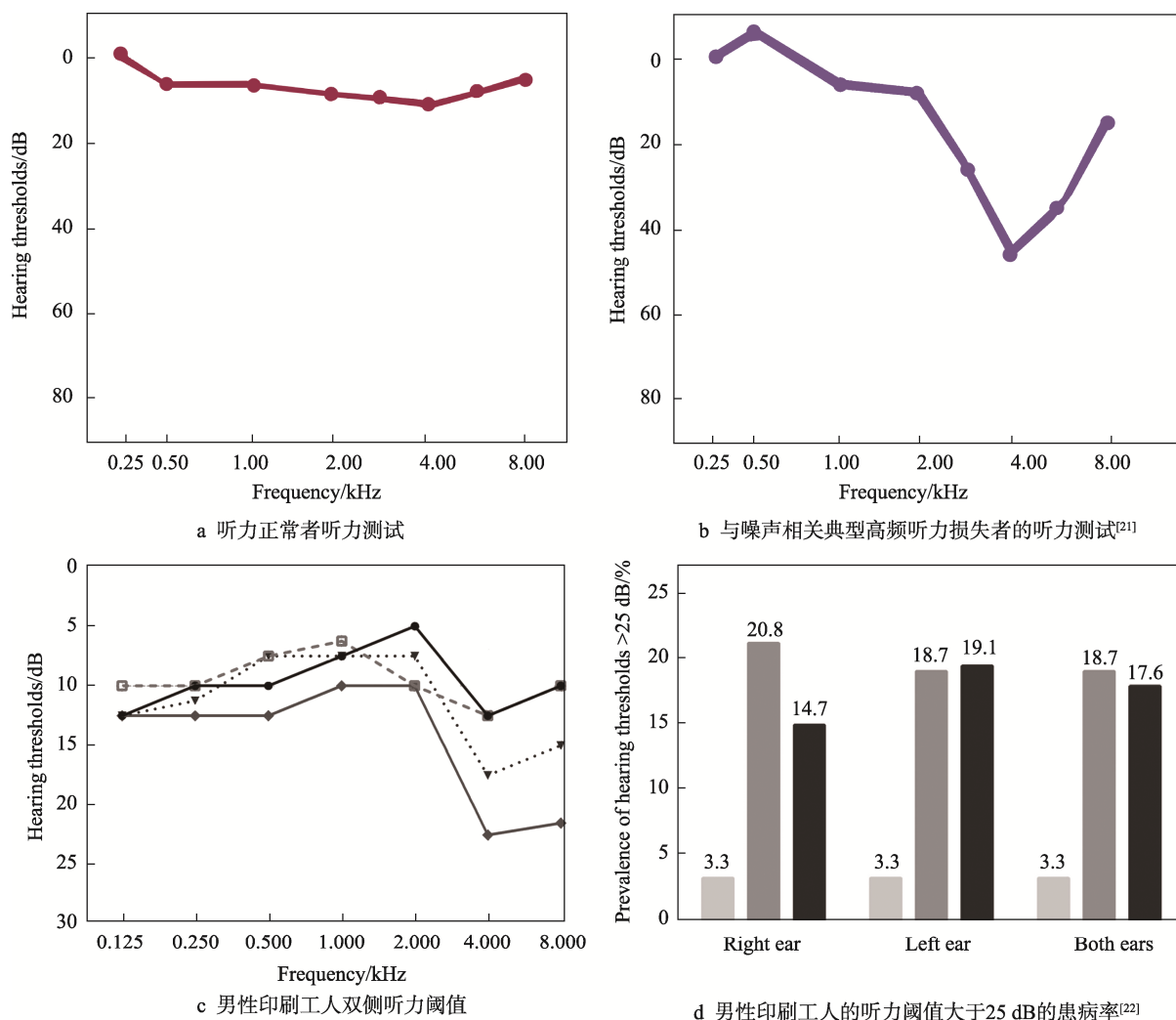


图 1 印刷设备噪声对印刷工人听力的影响

Fig.1 Impact of printing press noise on hearing of printing workers

于当前功能日益丰富、振动噪声机制更加复杂的印刷设备噪声控制, 因此需要进一步深入开展相关研究, 研究新的降噪技术方案。杨家华等^[27]对某国产印刷机和某国外名牌印刷机的印刷机体和印刷滚筒进行了振动测试与分析, 结果表明, 在印刷机高速工作时结构共振会激发较强的振动和噪声。随后采用有限元方法对印刷机的重要零件(印刷机机座和滚筒)进行了模态分析^[28], 为印刷设备的振动和噪声控制提供了理论基础。

由于印刷机滚筒振动不仅会产生噪声辐射, 也会影响印刷品的质量, 因此研究者陆续对印刷机滚筒做了更深入的振动分析与测试, 为优化和改进滚筒结构、抑制印刷机振动等提供了参考^[29-33]。印刷机滚筒在工作时会承受较大的载荷, 因此滚筒的力学属性发生了一些变化, 这会对滚筒振动的固有频率和振动模态产生一定的影响。Lei 等^[34]建立了柔版印刷机中心滚筒的三维结构模型, 通过有限元软件建立了滚筒的动力学模型, 分析了静压缸两端筒支系统的振动特性, 比较了中心压缸的各种模型形状, 并针对中心压印滚筒的旋转载荷, 分析了滚筒在动载荷作用下的固有频率和振型的演变规律, 如图 2 所示。

Hou 等^[35-36]考虑了柔板印刷机中心滚筒内部循

环冷却水对滚筒振动特性的影响, 构建了包含流体的滚筒有限元模型, 对其进行了模态分析, 并指出循环冷却水对中心压印缸的振动特性有着重要影响, 如图 3 所示。由于冷却水的存在, 滚筒的固有频率大大降低, 振动得到显著改善。实验验证了有限元法得到的模态参数, 误差小于 5%, 证明了中心滚筒有限元模型的正确性。该研究可作为柔性版印刷机中心滚筒设计和振动特性分析的一种经济可靠的方法。

Greco 等^[37]在印刷机中使用了内置的减振器, 能够快速降低滚筒冲击间隙后的瞬时振动峰值。Pyrvey 等^[38]对平版印刷机的印刷单元进行了数学建模, 研究了滚筒间隙冲击对印版和橡皮滚筒振动的影响, 以及滚筒轴承对印刷单元稳定性的影响。

为了研究胶印机中气动输送纸张的流致振动特性, Sidlof 等^[39]建立了柔性薄板与单侧轴向窄通道气流之间流固耦合的数学模型。该模型主要由离散质量链、扭转弹簧和阻尼器及无质量刚性杆等构成。通过研究该模型发现, 较厚的纸张(定量为 350 g/m^2) 不易受到流致振动的影响, 而中等面积密度的纸张(定量为 135 g/m^2) 理论上可以在 $16\sim 36 \text{ m/s}$ 的低流速下进入颤振失稳。在喷嘴出口流速为 $50\sim 100 \text{ m/s}$

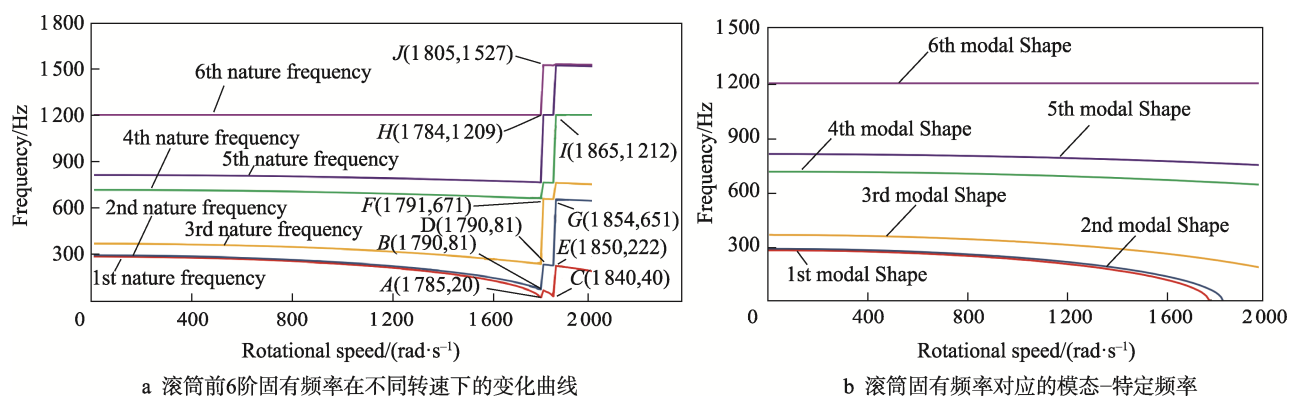


图 2 印刷机中央压印滚筒转动时的动态特征^[34]

Fig.2 Dynamic characteristics of printing press with rotating central impression cylinder^[34]

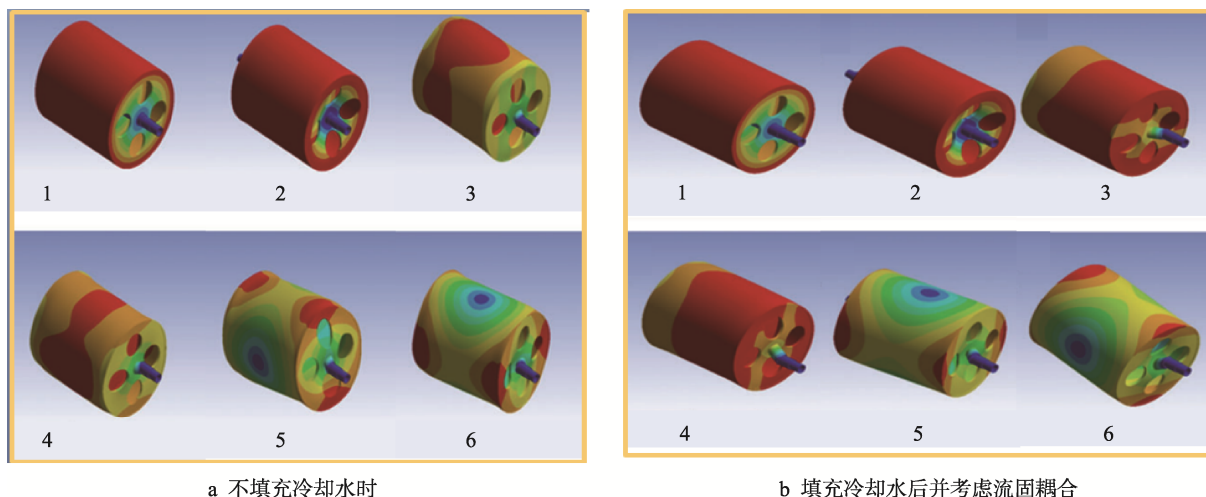


图 3 中心压印滚筒的前 6 阶振动模式^[35-36]

Fig.3 First six order vibration modes of central impression cylinder^[35-36]

的机器操作条件下,在频率范围为 340~1 000 Hz 的各种振动模式中,中等定量的纸张不稳定,并且可以检测到中等定量纸张在 400~2 000 Hz 频段的各种频率下的剧烈振动和噪声。通过稳定性分析发现,在印刷机的气动运输过程中,纸张的流致振动发生在高超临界流速下,超临界气流瞬间发展。该研究可用于评估承受轴向气流短脉冲的薄板对流致振动的敏感性。

齿轮-滚柱-轴承系统是印刷机最常见、最重要的动力系统(如图 4a—b 所示),它的动力学特性直接影响印品的印刷精度、印刷速度和印刷质量。同时,增加该系统的转动速度时,也会加剧设备的振动和噪声。利用有限元分析和实验测试手段可以有效地对齿轮-滚柱-轴承系统的动力学特性进行研究^[40],研究结果表明,设备的振动加速度随着 x 、 y 、 z 方向转速的增加而增加,齿轮传动系统产生的动态激励是高速条件下的主要振动源,尤其是前两阶谐波。

张磊等^[41]对印刷机的传动系统进行了测试和分析,得到了印刷机零部件故障因素对振动的影响。Buck 等^[42]介绍并讨论了单张胶印机中的非线性扭转

振动现象。Messer 等^[43]测试并分析了印刷机驱动带诱发的扭转振动,指出当驱动带转动频率与印刷机本征频率相同时会引发剧烈的振动,并利用主动控制方法成功地抑制了该类振动。Norrick 等^[44]和 Neeb 等^[45]基于力学模型对印刷机的扭转振动进行了精密计算,并基于此模型研究了扭转振动对印品质量的影响。

来自法赫德国王石油与矿业大学和麻省理工学院的科研团队对多跨距辊对辊微接触印刷系统中轴向运动腹板的振动特性进行了研究^[46],腹板的振动会影响印刷效果。为了在微米和亚微米尺度上实现连续微接触印刷的一致性,科研者提出了在印刷过程中控制腹板振动的方案,如图 5a 和 b 所示。研究发现,通过在印刷区的边界条件下适当调整腹板的斜率,同时在退卷和复卷辊上施加控制扭矩能够实现腹板末端振动能量的衰减,进而达到抑制腹板振动的效果。研究者利用哈密顿原理建立了该系统的非线性动力学模型,并通过数值仿真验证了方案的可行性。同时进行了实验测试,利用光纤微位移测量系统测试了有控制系统和无控制系统时腹板在不同位置的横向位移。实验中,腹板

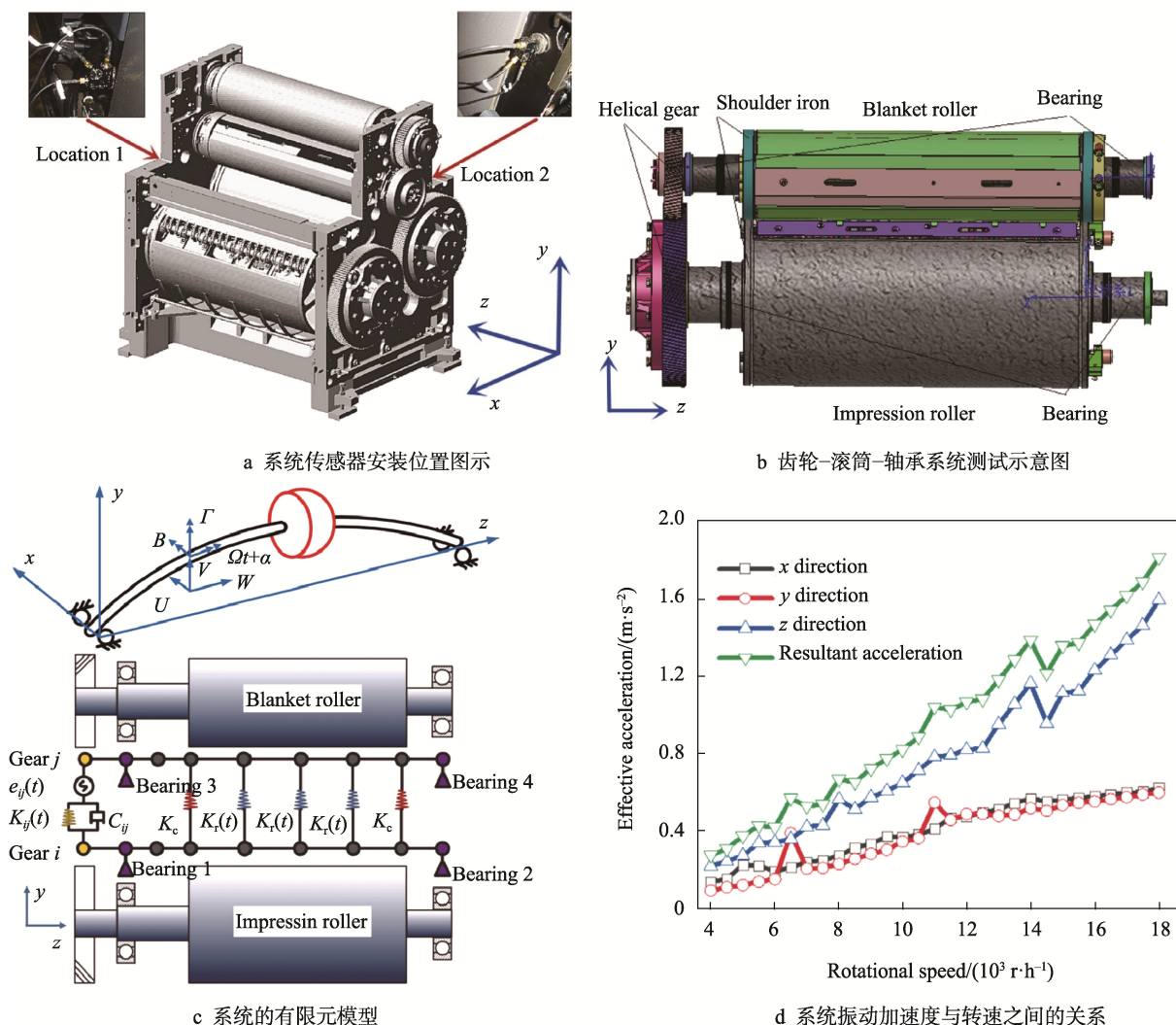


图 4 齿轮-滚柱-轴承系统^[40]
Fig.4 Gear-roller-bearing system^[40]

的轴向速度 $v=0.1016 \text{ m/s}$, 传递张力为 30 N , 腹板相对位置为 $x^*=0.25$ 和 $x^*=0.75$ 时的测试结果如图 5c、d 所示, 其中, W 为测试点的位移, L 为腹板长度, 深色实线是未添加边界控制的振动位移, 虚线表示添加边界控制后的振动位移。可以看到在施加边界控制后, 腹板横向位移出现明显的减弱现象, 证明控制系统能够较好地实现腹板横向振动的抑制。

Wang 等^[47]针对单张纸胶印机纸张传动系统振动强、噪声大等问题, 对纸张传动系统的振动和噪声进行了同步测量, 并指出纸张传动系统的噪声主要由叼纸牙和开合齿振动所致, 会影响印品的质量。印刷机的功能越来越丰富, 因此其工作功率也不断提升, 这可能会加重设备的噪声辐射。韩国学者 Gu 等^[48]评估了平版印刷机、丝网印刷机等印刷设备的输出功率对噪声辐射的影响, 并指出在印刷机工作功率由 36750 W 增至 7350 W 时, 噪声的声功率级会增加约 1.3 dB ; 印刷机的印刷速度每提高 1000 张/h , 印刷机的声功率级约增加 1.0 dB 。张杰^[49]对某印钞企业的凹印印刷设备噪声状况进行了分析, 研究发现, 通过定期对印刷设备进行周期性、规律性的维修保养, 对振动较剧烈的部位进行加固, 及时更换老化受损零部件等措施可以使振动问题得到减缓。此外, 在印刷车间的墙壁上布置多孔材料, 可以降低室内噪声水平, 该方法仅减弱了墙壁对噪声的反射, 未从结构噪声辐射源头进行降噪, 因此其降噪效果有限。

国内外学者对印刷机的振动及噪声特性进行了分析与研究, 对印刷机的振动与噪声控制具有一定的指导意义, 但研究的模型较简单, 且缺乏对印刷机的声传播特性、声振耦合机理及结构声辐射等问题的系统分析, 不能直接用于印刷设备的噪声控制。为了更好地实现印刷机降噪目标, 一方面需要在前人的基础上开展印刷机结构声振机理的研究和分析; 另一方面需研究适用于印刷设备的低频宽带降噪技术。

3 基于振动与噪声信号的印刷装备故障诊断研究现状

印刷机的振动及声学信号与印刷单元工作状况有着密切关系。当印刷机出现故障时, 其振动及声学信号往往会出现异常, 故障出现的位置及故障原因对信号特征都有着较大的影响, 因此可以通过提取和分析印刷机振动和声辐射信号来判断故障的特征和故障类型, 从而实现印刷设备的故障诊断^[50-53]。

徐倩倩^[51]研究了印刷装备滚动轴承的振动特性 (如图 6 所示), 测试了轴承不同故障的振动信号, 开展了基于滚动轴承振动特性的故障诊断研究, 提出了频谱细化表征、自适应特征流形学习、非高斯分数低阶特征提取新算法等, 通过实验验证了算法的有效性。

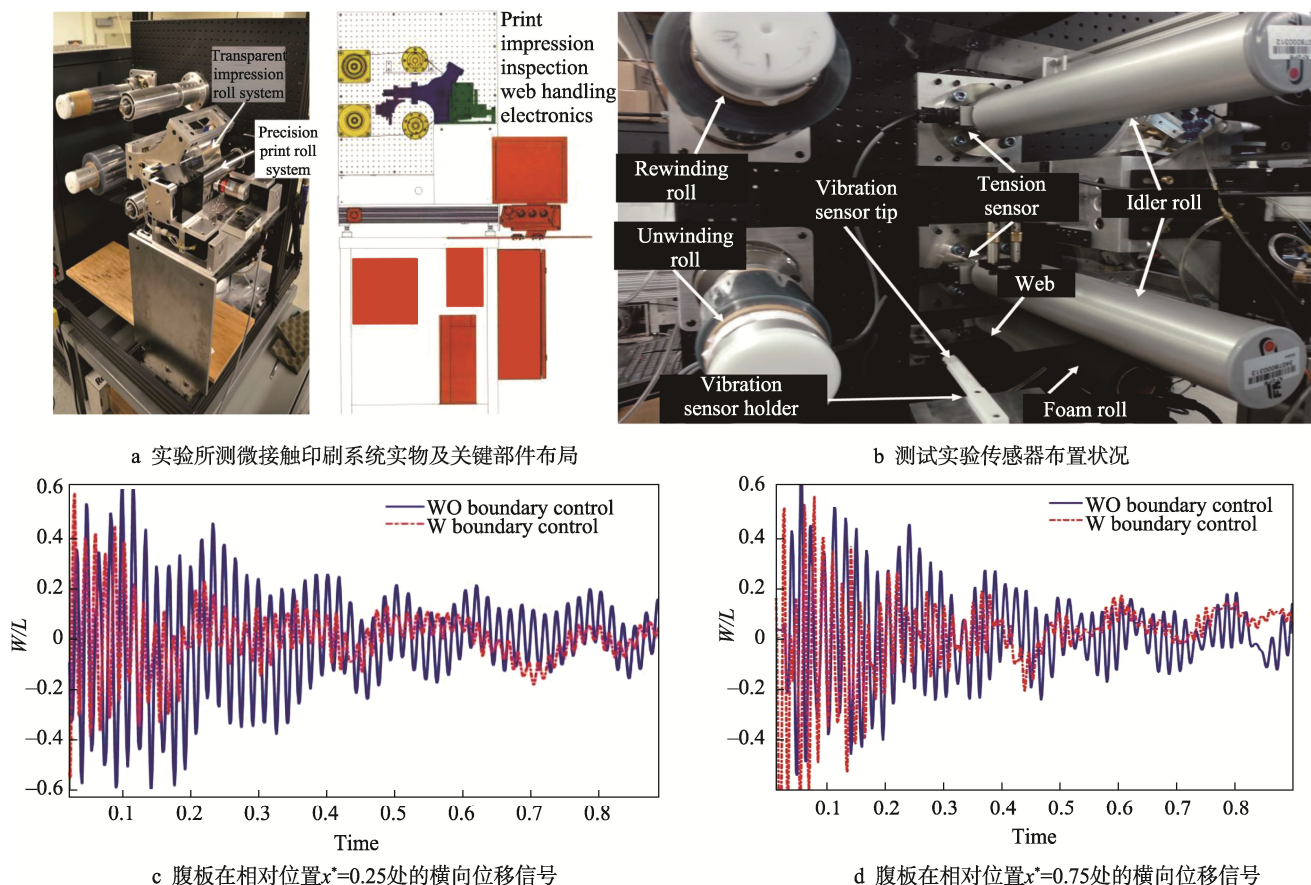


图5 微接触印刷系统腹板振动抑制实验

Fig.5 Web vibration suppression experiment of micro contact printing system

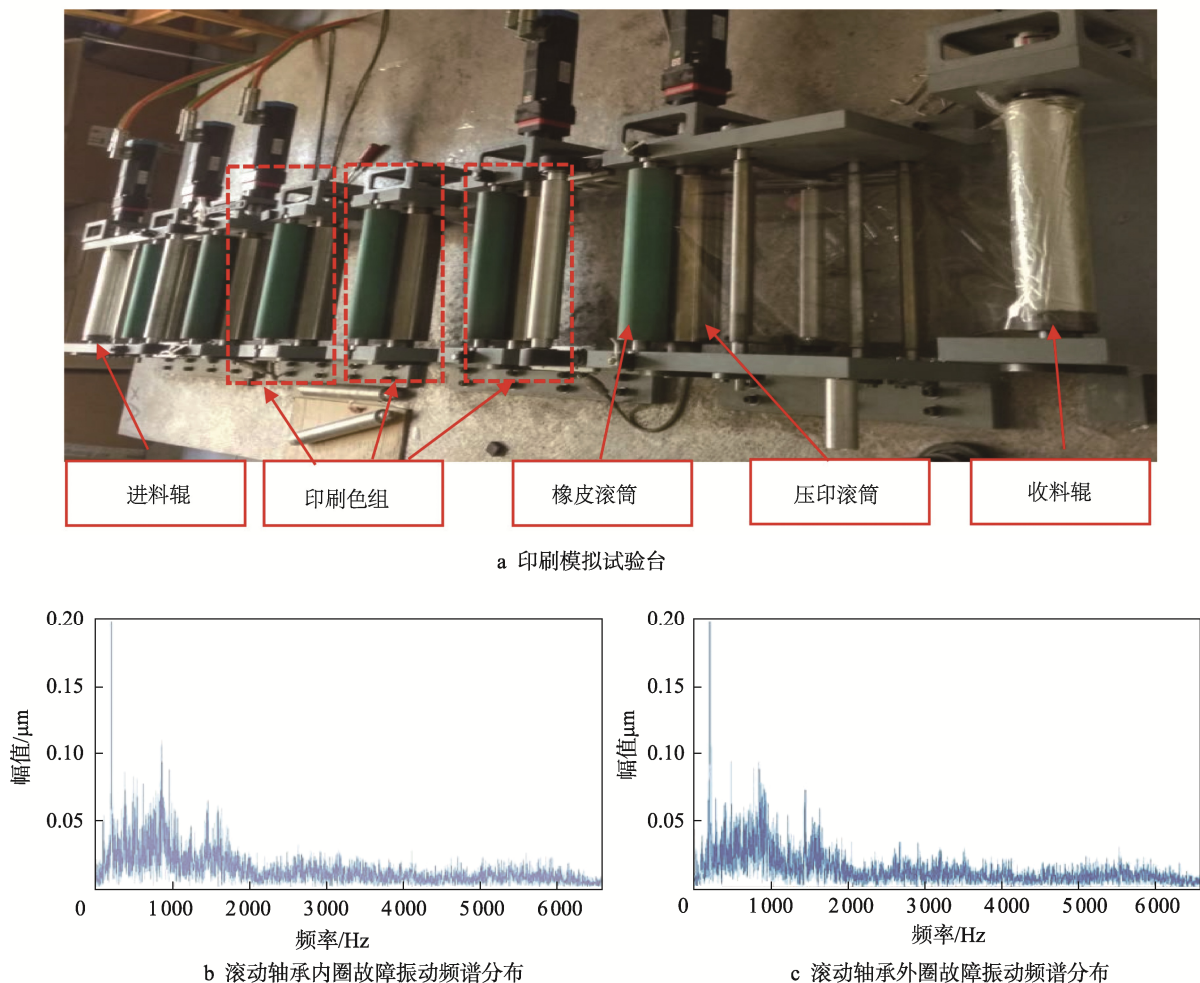


图 6 印刷装备滚动轴承的振动特性

Fig.6 Vibration characteristics of rolling bearings in printing press

Kulikov^[54]分析了印刷单元的振动特性,并通过分析振动信号获取了印刷单元振动特征与印刷图像的关系。Li 等^[55]根据胶印机墨辊轴承的声信号特征,建立了印刷机故障识别的听觉模型,实验验证了该方法用于印刷机墨辊轴承故障诊断的有效性。针对高速印刷机高背景噪声下滚动轴承信号较差的问题,Zhang 等^[56]提出了集成经验模式分解(EEMD)和频谱峰度(SK)相结合的故障诊断方法,利用 EEMD 将滚动轴承故障振动信号分解为不同特征尺度下的多个固有模式函数。通过降噪原则去除固有模式函数的虚假信号,构造新的故障信号。实验结果表明,改进的 EEMD 与 SK 相结合的方法比传统的 EEMD 和包络分析方法更有效,提高了印刷机轴承的故障识别率。Xu 等^[57]提出了一种基于时频图像和神经网络的印刷机滚动轴承故障诊断方法,该方法主要基于短时傅里叶变换、连续小波变换和小波分解,采用时频分析将一系列振动信号转换为时频图像。卷积神经网络可以自动提取图像特征,保证特征信息的完整性,通过时频分析和 CNN 建模,利用连续小波变换实现了印刷机滚动轴承故障的诊断,准确率高达 95%以上。

印刷机的辊子系统具有复杂的振动特性,Zhang 等^[58]为了解决印刷机滚动轴承的强非平稳性和复杂特性分析问题,提出了一种基于小波变换和符号化的故障诊断方法。该方法首先采用经验小波变换分析来自印刷机滚动轴承的振动信号,提取敏感分量并用于符号分析,采用符号方法分析和表达了各分量的极值规律,提出了基于极值的熵特征。通过对油墨辊中的滚动轴承进行实验发现,该方法成功地识别了印刷机轴承的不同故障。该研究也可应用于涂布机、壁纸机等具有相似滚筒系统结构的机械设备。

以上研究者根据印刷机工作时所产生的振动及声学信号特征,建立了基于印刷设备振动及声学特性的故障诊断策略,并取得了一定的成果,为印刷设备故障诊断技术的工业应用提供了理论及实验基础。同时应注意到,当前缺乏对印刷机的结构振动、声辐射、声振耦合等问题的系统研究,这对印刷设备的故障诊断技术发展造成了一定阻碍,因此针对印刷设备的振动和声学特性的深入研究具有较深的工业价值。同时,值得注意的是,近些年发展起来的声学超材料^[59-63]降噪技术具有亚波长尺度,相较于传统降噪技术,有望解

决低频噪声治理难的困境,或许在印刷设备振动噪声控制方面能够发挥较大价值。

4 结语

基于印刷设备振动噪声特性这一课题,对印刷企业噪声污染,印刷设备振动及噪声特性,基于印刷单元振动及声学信号的印刷设备故障诊断技术等方面进行了阐述。研究发现,目前在印刷设备的振动和声学特性方面还需进行更深入、更系统的研究,尤其是印刷设备的声振机理、噪声辐射特性等方面。对印刷设备声振特性的深入研究具有以下学术及工业价值。

1) 印刷设备的声振特性是印刷机降噪技术的基础。随着对印刷设备声振特性的深入研究,可以针对印刷设备的声振特性,采用近期较为热门的声学超材料降噪技术对印刷机进行噪声控制,从而解决印刷企业噪声污染较重的问题。

2) 印刷单元的振动特性为印刷设备零部件的设计提供了力学及振动方面的参考,可以有效避免在高速转动时出现的共振现象,从而优化印刷单元的力学性能。

3) 深入、扎实地研究振动及声学特性是印刷设备故障诊断技术的基础,根据印刷设备的振动和声辐射特征,可以利用传声器阵列对印刷机的异常信号进行定位、诊断,从而实现高效的印刷设备故障诊断。

目前,针对机械设备结构振动声辐射问题的常用手段包括有限元法、边界元法、统计能量分析法、有限元-统计能量分析法、边界元-统计能量分析法、有限元-边界元法等。在后期的研究工作中可以根据印刷装备不同频段对应的声振特性问题,采取合适的方法开展相关研究,建立印刷机结构振动声辐射模型,并结合实验提升模型的精确度,为印刷设备降噪技术及故障诊断技术提供理论和实验基础。

参考文献:

- [1] 《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.
"Special Plan for the Development of Printing Industry during the Tenth Five-Year Plan" was Released[J]. Guangdong Print, 2022(2): 11-16.
- [2] 国家新闻出版署. 《印刷业“十四五”时期发展专项规划》发布[J]. 中华纸业, 2022, 43(1): 5.
National Press and Publication Administration. "Special Plan for the Development of Printing Industry during the 14th Five Year Plan Period" was Released[J]. China Pulp & Paper Industry, 2022, 43(1): 5.
- [3] 谈“十四五”期间中国印刷业发展前景[J]. 中国包装, 2021, 41(11): 22.
On the Development Prospect of China Printing Industry during the Tenth Five-Year Plan Period[J]. China Packaging, 2021, 41(11): 22.
- [4] 毛晓彬, 周慧娟. 2018年某市噪声作业工人职业健康检查结果的分析和[J]. 中国医药指南, 2019, 17(18): 297-299.
MAO Xiao-bin, ZHOU Hui-juan. Analysis of Occupational Health Examination Results of Noise-Exposed Workers in a City in 2018[J]. Guide of China Medicine, 2019, 17(18): 297-299.
- [5] GILLES A, VAN HAL G, DE RIDDER D, et al. Epidemiology of Noise-Induced Tinnitus and the Attitudes and Beliefs towards Noise and Hearing Protection in Adolescents[J]. PLoS One, 2013, 8(7): e70297.
- [6] THOMPSON R, SMITH R B, BOU KARIM Y, et al. Noise Pollution and Human Cognition: An Updated Systematic Review and meta-Analysis of Recent Evidence[J]. Environment International, 2022, 158: 106905.
- [7] 谢子煌, 陈卫红. 印刷行业职业病危害因素及其健康影响[J]. 职业卫生与应急救援, 2017, 35(6): 530-532.
XIE Zi-huang, CHEN Wei-hong. Occupational Hazards and Potential Health Effects in Printing Industry[J]. Occupational Health and Emergency Rescue, 2017, 35(6): 530-532.
- [8] 金祖华, 绪红霞, 黄向荣, 等. 某包装有限公司职业病危害现状调查与分析[J]. 中国实用医药, 2012, 7(22): 269-270.
JIN Zu-hua, XU Hong-xia, HUANG Xiang-rong, et al. Investigation and Analysis of Occupational Hazards in a Packaging Company[J]. China Practical Medicine, 2012, 7(22): 269-270.
- [9] 郑晓钧, 杨梅, 刘移民. 印刷行业职业病危害及预防控制[J]. 职业与健康, 2011, 27(9): 1046-1049.
ZHENG Xiao-jun, YANG Mei, LIU Yi-min. Occupational Hazards in Printing Industry and Its Control[J]. Occupation and Health, 2011, 27(9): 1046-1049.
- [10] 孙东红. 印刷工艺的职业危害及其防护策略[J]. 职业卫生与应急救援, 2011, 29(1): 44-45.
SUN Dong-hong. Occupational Hazards of Printing Technology and Its Protective Strategies[J]. Occupational Health and Emergency Rescue, 2011, 29(1): 44-45.
- [11] 王希. 印刷行业职业危害分析与控制对策[J]. 中国科技信息, 2010(15): 184-185.
WANG Xi. Analysis and Control Countermeasures of Occupational Hazards in Printing Industry[J]. China Science and Technology Information, 2010(15): 184-185.
- [12] 曹雪玲, 张妮萍, 李婷婷. 某印刷企业职业病危害因

- 素调查及风险分析[J]. 环境与职业医学, 2015, 32(6): 579-583.
- CAO Xue-ling, ZHANG Ni-ping, LI Ting-ting. Risk Analysis on Occupational Hazard of a Printing Company[J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2015, 32(6): 579-583.
- [13] MIHAJLOVIC A, GRUJIC S D, KIURSKI J, et al. Occupational Noise in Printing Companies[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 181(1): 111-122.
- [14] 张小会, 酆胜, 储成运, 等. 上海 5 家印刷企业职业病危害因素检测结果[J]. 职业与健康, 2009, 25(22): 2374-2376.
- ZHANG Xiao-hui, LI Sheng, CHU Cheng-yun, et al. Test Results of Occupational Hazards in 5 Printing Enterprises of Shanghai City[J]. Occupation and Health, 2009, 25(22): 2374-2376.
- [15] 张丽丽. TOPSIS 法胶印车间职业危害控制措施决策方法研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2010: 26-35.
- ZHANG Li-li. Study on Decision-Making Method of Occupational Hazard Control Measures in Offset Printing Workshop with TOPSIS Method[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2010: 26-35.
- [16] 曾雪娇, 龚华, 黄威. 上海市普陀区 25 家印刷企业职业卫生现状分析[J]. 职业与健康, 2022, 38(9): 1166-1171.
- ZENG Xue-jiao, GONG Hua, HUANG Wei. Analysis on Occupational Health Status of 25 Printing Enterprises in Putuo District of Shanghai[J]. Occupation and Health, 2022, 38(9): 1166-1171.
- [17] 伍家琪, 王海椒, 贾晋阳. 北京市某印刷企业职业病危害现状调查[J]. 职业与健康, 2019, 35(10): 1297-1301.
- WU Jia-qi, WANG Hai-jiao, JIA Jin-yang. Investigation on Present Status of Occupational Hazards in a Printing Enterprise in Beijing[J]. Occupation and Health, 2019, 35(10): 1297-1301.
- [18] LOMEN I, MIHAJLOVIC A, CVETICANIN L. Sound Maps and Noise Calculation in work-Space with Specification to a Printing Office[J]. Fluctuation and Noise Letters, 2012, 11(4): 1250022.
- [19] MHAMDI A, BEN AMOR A, AMRI A, et al. Ergonomic Evaluation of a Situation of Coexposure to Solvents and Noise in a Printing of Flexible Packaging[J]. Work (Reading, Mass), 2012, 41(S1): 496-502.
- [20] ALABDULHADI A, DEVEY P, BOGGESS M, et al. Personal Noise Exposure Assessment of Kuwaiti Printing Industry Workers[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2021, 27(2): 578-588.
- [21] GAMZE S, MEHMET O, ARIF O. Analysis of Hearing Loss as an Occupational Illness in Printing Industry and its Effects on the Worker[C]// Conference: 8th International Symposium on Graphic Engineering and Design, Serbia, 2016: 481-487.
- [22] CABELLO-LÓPEZ A, CHÁVEZ-GÓMEZ N L, TORRES-VALENZUELA A, et al. Audiometric Findings of Printing Press Workers Exposed to Noise and Organic Solvents[J]. International Journal of Audiology, 2021, 60(1): 8-15.
- [23] 方丹群, 董金英. 印刷机噪声控制研究[J]. 噪声与振动控制, 1982, 2(6): 21-27.
- FANG Dan-qun, DONG Jin-ying. Research on Noise Control of Printing Machine[J]. Noise and Vibration Control, 1982, 2(6): 21-27.
- [24] 魏墨琼, 董金英. 凸版轮转印刷机噪声控制[J]. 噪声与振动控制, 1988, 8(3): 20-25.
- WEI Mo-qiong, DONG Jin-ying. Noise Control of Letterpress Rotary Printing Machine[J]. Noise and Vibration Control, 1988, 8(3): 20-25.
- [25] 庄表中, 蒋本威, 张竞, 等. YP1A3 型胶印机的减振降噪研究[J]. 噪声与振动控制, 1993, 13(4): 39-41.
- ZHUANG Biao-zhong, JIANG Ben-wei, ZHANG Jing, et al. Study on Vibration and Noise Reduction of YP1A3 Offset Press[J]. Noise and Vibration Control, 1993, 13(4): 39-41.
- [26] 刘天军. 单色平版胶印机噪声源诊断[J]. 常州工业技术学院学报, 1997, 10(2): 18-23.
- LIU Tian-jun. Noise Source Diagnosis of Monochrome Offset Press[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 1997, 10(2): 18-23.
- [27] 杨家华, 管华. 印刷机振动的测试与分析[J]. 北京工业大学学报, 2004, 30(1): 35-37.
- YANG Jia-hua, GUAN Hua. Test and Analysis of the Vibration of Printing Press[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2004, 30(1): 35-37.
- [28] 杨家华, 管华, 郭宁军. 印刷机结构振动的有限元分析[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(6): 489-492.
- YANG Jia-hua, GUAN Hua, GUO Ning-jun. The Finite Element Analysis about the Vibration of Printing Presses[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(6): 489-492.
- [29] 陈一军, 赵庆海, 孔祥杰. 压印滚筒振动测试分析研究[J]. 包装工程, 2008, 29(9): 90-92.
- CHEN Yi-jun, ZHAO Qing-hai, KONG Xiang-jie. Vibration Testing and Analysis of Impression Cylinder[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(9): 90-92.
- [30] 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 Qing-ke, DU Ya-nan, WANG Tong-le, et al. Modal Analysis of Printing Cylinder[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(15): 102-105.
- [31] 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 Jian-guo, WANG Yi-ming, ZHANG Lei, et al. Research of Impression Cylinder Vibration Characteristic Using Pulse System[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(21): 86-90.
- [32] 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 Yi-ming, ZHAO Ming-ming, WU Shu-qin, 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.
- [33] WANG Yi-ming, LIU Xin, WU Shu-qin, et al. Torsional Vibration Modeling and Simulation of Printing Cylinder in Printing Machine[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 392: 062028.
- [34] LEI Xiao-fei, HOU He-ping, ZHA Zhao-shuan, et al. Dynamic Characteristics of Printing Cylinder with Rotating Dynamic Load[J]. Mathematical Models in Engineering, 2020, 6(1): 50-56.
- [35] HOU He-ping, RUI Tong-tong, DENG Rui, et al. Modal Analysis of Central Impression Cylinder based on Fluid-Solid Coupling Method[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2021, 40(2): 772-783.
- [36] 邓瑞. 柔印机中心滚筒力学性能分析及结构优化研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 15-44.
- DENG Rui. Mechanical Performance Analysis and Structure Optimization of the Center Drum of Flexo Printing Machine[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019: 15-44.
- [37] GRECO D, BLANC P, AUBRY E, et al. Active Vibration Control of Flexible Materials Found within Printing Machines[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 300(3/4/5): 831-846.
- [38] PYRYEV Y, KRZYKOWSKI J. Parametric Vibrations in Offset Printing Units[J]. Theoretical & Applied Mechanics Letters, 2012, 2(4): 64-67.
- [39] ŠIDLOF P, KOLÁŘ J, PEUKERT P, et al. Aeroelastic Instability of Paper Sheet in an Offset Printing Press[J]. Archive of Applied Mechanics, 2022, 92(1): 121-136.
- [40] OUYANG Tian-cheng, SU Zi-xiang, LI Shuo-yu, et al. Experimental and Numerical Investigations on Dynamic Characteristics of Gear-Roller-Bearing System[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 140: 730-746.
- [41] 张磊, 王仪明, 武淑琴, 等. 基于实例推理的印刷机传动系统振动分析与研究[J]. 包装工程, 2012, 33(9): 85-89.
- ZHANG Lei, WANG Yi-ming, WU Shu-qin, et al. Vibration Analysis and Study of Transmission System of Printing Press Based on Case Reasoning[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 85-89.
- [42] BUCK B, KNOPF E, SCHREIBER S, et al. Nichtlineare Schwingungsphänomene in Bogen Offset Druck Maschinen[J]. VDI Berichte, 2005, 1887(1): 336-361.
- [43] MESSER M. Parametric Excitation of Vibrations in Printing Machines[J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 2017, 22(4): 448-455.
- [44] NORRICK N, NEEB S. Calculation of Torsional Vibrations and Prediction of Print Quality in Sheetfed Offset Printing Presses[J]. Technische Mechanik, 2017, 37(2): 171-180.
- [45] NEEB S, NORRICK N. Stability Analysis of Parameter-Excited Linear Vibration Systems with Time Delay, Using the Example of a Sheetfed Offset Printing[J]. Technische Mechanik, 2017, 37(2): 367-376.
- [46] ALI S, HAWWA M A, HARDT D E. Vibration Suppression of an Axially Moving Web in a Multi-Span Roll-to-Roll Microcontact Printing System[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2020, 8(1): 35-46.
- [47] WANG Yi-ming, WU Shu-qin, PENG Ming, et al. Vibration and Noise Measurement Synchronous and Analysis on Paper Transmitting System for Sheet-Fed Offset Press[C]// Technology & Innovation Conference, IET, 2009: 61.
- [48] GU J, KWON M, LEE W, et al. The Noise Influence Assessment According to the Change of the Offset Type Print Machine's Power[J]. Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 2014, 24(9): 682-686.
- [49] 张杰. 某印钞企业凹印印刷过程危险源辨识与控制对策研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2017: 16-39.
- ZHANG Jie. Study on Hazard Identification and Control Countermeasures in Gravure Printing Process of a Banknote Printing Enterprise[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2017: 16-39.
- [50] 邓瑞, 徐卓飞, 侯和平, 等. 印刷机故障诊断技术研究综述[J]. 制造业自动化, 2018, 40(5): 6-10.
- DENG Rui, XU Zhuo-fei, HOU He-ping, et al. Summary of Research on Printing Machine Fault Diagnosis

- Technology[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(5): 6-10.
- [51] 徐倩倩. 印刷机滚动轴承故障特征提取方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 11-25.
XU Qian-qian. Research on Fault Feature Extraction Method of Rolling Bearing of Printing Machine[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019: 11-25.
- [52] 张清峰. 基于自编码器的胶印机着墨辊滚动轴承故障分类方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020: 43-49.
ZHANG Qing-feng. Research on Fault Classification Method of Roller Bearing of Offset Press Based on Self-encoder[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020: 43-49.
- [53] 唐嘉辉. 基于辅助生成深度置信网络的印刷机轴承故障诊断研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020: 35-40.
TANG Jia-hui. Research on Fault Diagnosis of Printing Machine Bearing Based on Auxiliary Generation Depth Confidence Network[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020: 35-40.
- [54] KULIKOV G B. Diagnosing Causes of Increased Vibration of Printing Units of Tower Rotary Printing Presses[J]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2008, 37(4): 391-396.
- [55] LI Yan-yan, ZHANG Hai-yan, XU Qian-qian, et al. A Method of Diagnosis for Printing Press Ink Roller Bearing Based on Acoustic Signal and Spectrum Analysis[C]// China Academic Conference on Printing & Packaging and Media Technology, 2017: 845-853.
- [56] ZHANG Jia-ling, WU Ji-mei, WANG Yan, et al. Fault Diagnosis in Printing Press Roller Bearing Based on Spectrum Kurtosis and Improved EEMD[C]// Applied Sciences in Graphic Communication and Packaging, 2018: 545-552.
- [57] XU Zhuo-fei, YU Dan, HOU He-ping, et al. Research on Fault Diagnosis of Rolling Bearing in Printing Press Based on Convolutional Neural Network[C]// Advances in Graphic Communication, Printing and Packaging Technology and Materials, 2021: 487-494.
- [58] ZHANG Wu, ZHANG Ya-feng, XU Zhuo-fei, et al. A Research on Fault Diagnosis of Rolling Bearing in Printing Press Based on Empirical Wavelet Transform and Symbolization[C]// Advances in Graphic Communication, Printing and Packaging Technology and Materials, 2021: 495-503.
- [59] SHAO Chen, ZHU Yuan-zhou, LONG Hou-you, et al. Metasurface Absorber for Ultra-Broadband Sound via Over-Damped Modes Coupling[J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(8): 083504.
- [60] GAO Nan-sha, ZHANG Zhi-cheng, DENG Jie, et al. Acoustic Metamaterials for Noise Reduction: A Review[J]. Advanced Materials Technologies, 2022, 7(6): 2100698.
- [61] ZHU Yi-fan, MERKEL A, DONDA K, et al.. Nonlocal Acoustic Metasurface for Ultrabroadband Sound Absorption[J]. Physical Review, B, 2021, 103(6): 064102.
- [62] DONDA K, ZHU Yi-fan, FAN Shi-wang, et al. Extreme Low-Frequency Ultrathin Acoustic Absorbing Metasurface[J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(17): 173506.
- [63] XU Wen-qiang, LIU Jia-wei, YU Dian-long, et al. Coherent Coupling Based Meta-Structures for High Acoustic Absorption at 220-500 Hz Frequency[J]. Applied Acoustics, 2021, 182: 108181.

责任编辑: 彭颀