

滚筒洗衣机泄露气密检测方法研究

李鹏¹, 陆永华^{1*}, 陆元华², 卢善周³, 马坤³

(1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏南京 210016; 2. 中国石化销售股份有限公司江苏石油分公司, 江苏南京 210009;
3. 无锡小天鹅电器有限公司, 江苏无锡 214028)

摘要:为解决现行注水检测洗衣机泄漏存在的弊端,提高洗衣机整机密闭性检测的效率,提出了一种基于直压检测技术的气动无水检测方案,创新性地设计了检测盒工装,并根据洗涤剂盒内部尺寸设计密封件。基于STM32F1主控芯片进行气压模拟信号的采集及预处理,并实现系统气密性检测流程控制。在预处理阶段提出基于滑动平均和小波分析的去噪方法,运用快速傅里叶变换提取所需频段特征。并进行多孔径模拟泄漏试验,结果表明,在保证不泄漏时,0.120~0.963 Hz频段内的频率幅值都维持在最低水平。此外,针对信号低频特性制定泄漏判定标准,对某工厂多台待检测洗衣机进行泄漏检测试验,验证了所提方法和判定标准的可靠性。

关键词: 泄漏检测; 结构设计; 嵌入式系统; 小波去噪; 傅里叶变换

中图分类号: TH128

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025065

引用格式: 李鹏, 陆永华, 陆元华, 等. 滚筒洗衣机泄露气密检测方法研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 467-474.

LI Peng, LU Yonghua, LU Yuanhua, et al. Research on pneumatic detection method of drum washing machine leakage[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 467-474.

Research on Pneumatic Detection Method of Drum Washing Machine Leakage

LI Peng¹, LU Yonghua^{1*}, LU Yuanhua², LU Shanzhou³, MA Kun³

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Jiangsu Petroleum Branch, Sinopec Sales Co., Ltd., Nanjing 210009, China;
3. Wuxi Little SWAN Electric Appliance Co., Ltd., Wuxi 214028, China)

Abstract: To overcome the limitations of current water injection methods for detecting washing machine leaks and enhance the measurement efficiency of whole-machine sealing, a novel air-driven leak detection scheme based on direct pressure testing technology was proposed. A test chamber fixture and seals tailored to the internal dimensions of the detergent box are innovatively designed. Based on the STM32F1 microcontroller, the collection and preprocessing of air pressure analog signals were carried out for controlling the airtightness testing process. A denoising method based on moving average and wavelet analysis was introduced during the preprocessing stage, and the required frequency band characteristics were extracted using Fast Fourier Transform. Multi-aperture simulated leak tests demonstrated that the frequency amplitudes remained at the lowest levels within the 0.120~0.963 Hz band when no leaks were present. A leak determination criterion was established based on the low-frequency characteristics of the signal, and the reliability of the proposed method and criterion was verified through leak detection tests on multiple washing machines at a factory.

收稿日期: 2024-09-24

作者简介: 李鹏(1999-),男,硕士生,主要从事机器视觉及机器人控制研究。E-mail: lp2305160@nuaa.edu.cn。

*通信作者: 陆永华(1977-),男,教授,博士,主要从事智能检测与控制、机器人、传感器等研究。E-mail: nuaa_lyh@nuaa.edu.cn。

Key words: leakage detection; structural design; embedded systems; wavelet denoising; Fourier transform

0 引言

当前,滚筒洗衣机在生产过程中不可避免的误差和精度问题,使其在出厂使用中时常出现漏水现象,严重影响用户体验并增加了售后成本。针对该问题,业界普遍采用注水法检测泄漏。然而,该方法在检测完毕后还需进行抽水、吸干等操作,效率低下;同时,部分残留水渍可能导致产品的其他质量问题。研究人员针对该问题提出了多种气密性检测漏方法,刘军^[1]将差压检测法和氦质谱检测法应用到具体油箱的气密性检测中,提高了油箱气密检测的技术水平;李江波^[2]基于冒泡法检漏和差压法检漏实现了燃气调压器阀体气密性检测和调压器静压特性检测;林引^[3]基于 Simulink 仿真研究影响差压的主要因素,所设计的基于差压法的气密性测试系统可以定量判断泄露程度。气动检测方法相较于其他泄漏检测方法,其高精度、无污染、实时性高、空间占用小的特点适用于本测量环境。本文将基于气动直压检漏技术,设计检测工装并通过机器视觉技术和机械手控制实现快速高效检测。

1 系统设计

1.1 硬件系统设计

本文设计了一套气密性检测系统,主要由机械臂、相机、待检洗衣机、检测工装等构成,整体硬件布局如图 1 所示。

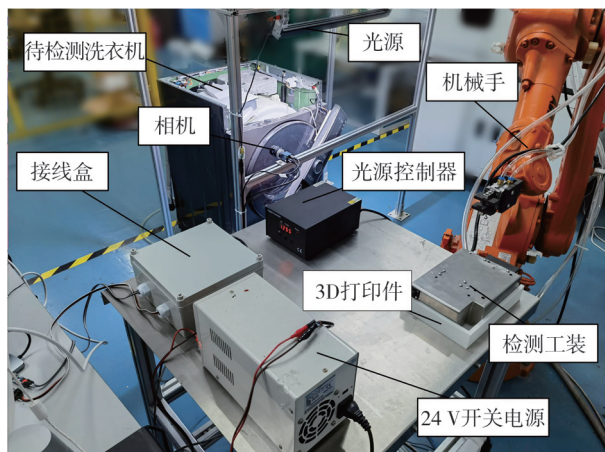
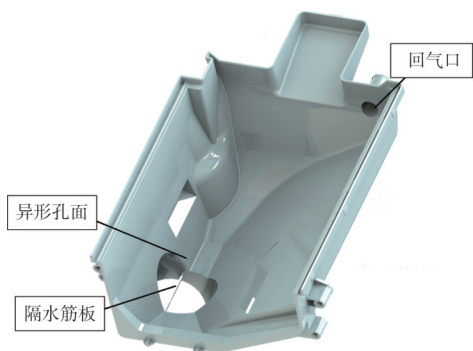


图 1 气密性检测系统硬件布局图

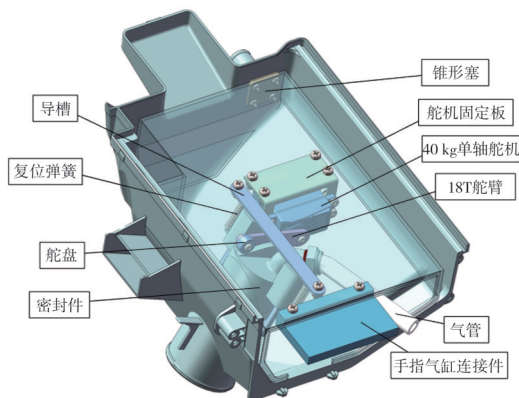
相机拍摄图像,将待检洗衣机的洗涤剂盒孔位发送至机械臂,末端执行器夹持检测工装盒,将其插入洗衣机洗涤剂盒处。气源开始向洗衣机内充气,

一定时间后停止加压并保压,使用 A/D 转换器采集压力数据并进行分析,从而判断待检洗衣机是否存在泄露情况。

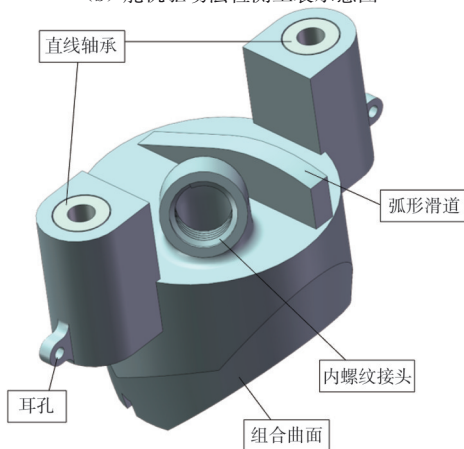
检测工装需插入洗涤剂盒内,其主要作用是密封洗涤剂盒底部的异形孔面和后端的回气口,该异形孔曲面较为复杂,如图 2(a) 所示。设计检测压紧装置需要避开异形孔壁上的防水筋板,气源通过该异形孔向滚筒洗衣机内部供气和保压。



(a) 洗涤剂盒内部结构示意图



(b) 舵机驱动法检测工装示意图



(c) 密封件设计图

图 2 硬件系统设计图

Fig. 2 Hardware system design diagram

如图 2(b) 所示, 检测工装系统主要由检测工装外壳、单轴舵机、舵机固定板、舵臂、舵盘、导槽、复位弹簧、密封件、锥形塞器、气管、手指气缸连接件等零件组成。其中, 工装外壳、导槽和舵机固定板零件采用铝合金制成, 用于提升系统刚度。手指气缸连接件为一块 7 mm 厚的薄板, 便于手指气缸夹持。

密封件是实现密封动作的核心元件, 结构设计如图 2(c) 所示。密封件两个长孔内固定了两个直线轴承, 两侧耳孔连接复位弹簧。其顶部设计有一段类似凸轮的弧形滑道, 便于舵盘与之接触完成预定的运动轨迹。顶部的内螺纹接头与 PC12-M12 气动快速接头进行配合, 二者间装有

一个氟胶 O 型密封圈, 确保端面密封效果良好。

1.2 软件控制系统设计

软件整体架构分为下位机和上位机, 如图 3 所示。其中, 下位机基于 STM32F1 单片机, 使用 μ COS-III 操作系统进行开发, 主要负责舵机、电磁阀等硬件设备的驱动和模拟信号的采集、预处理等, 通过串口通信传输滤波后的有效数据至上位机。上位机基于 Windows 操作系统开发, 主要实现与下位机互相传输数据与指令, 与相机和机械手等外围设备建立通信以实现检测工装的自动插入, 同时, 作为数据的最终处理者完成检测结果的合格性判定。

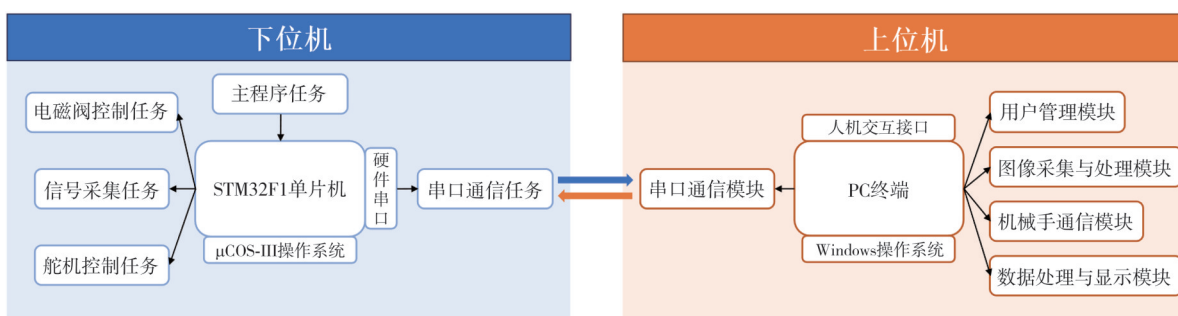


图 3 软件架构设计图

Fig. 3 Software architecture diagram

2 数据处理方法

在实际工业环境中, 传感器原始数据常存在噪声、缺失值、异常值等多种质量问题。因此, 在下位机数据采集的同时, 需即时进行数据清洗、异常值检测等预处理。在复杂环境中, 噪声信号通常呈现出高度复杂、随机性强和非平稳性的特征^[4-5]。对信号直接采用傅里叶变换得到频谱可能会导致显著的误差。

因此, 在傅里叶变换前, 选用合适的小波分析技术^[6]可以有效去除噪声并增强信号可读性。

同时, 基于傅里叶变换方法, 将时域信息转换为频域信息进行后续实验^[7], 制定合格性标准。整体流程如图 4 所示。

2.1 数据预处理

滑动平均法的主要思想是通过计算一个滑动窗口内的均值来减少噪声的影响, 窗口大小通常根据需求事先设定。计算公式为

$$p_i = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i-i} + x_{i+i}) + x_i}{2n + 1} \quad (1)$$

在实验室环境中, 确保不发生数据泄漏的情况下, 进行了滚筒洗衣机加压、保压检测的预处理试验, 分别使用窗口大小为 3 和 5 的滑动平均法进行对比, 结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 在没有泄漏和较低噪声的环境下, 采用窗口大小为 5 的滑动平均法对原始压力数据预处理已经能够较好地消除信号中的离群值, 从而为进一步的数据处理提供稳定的基础。

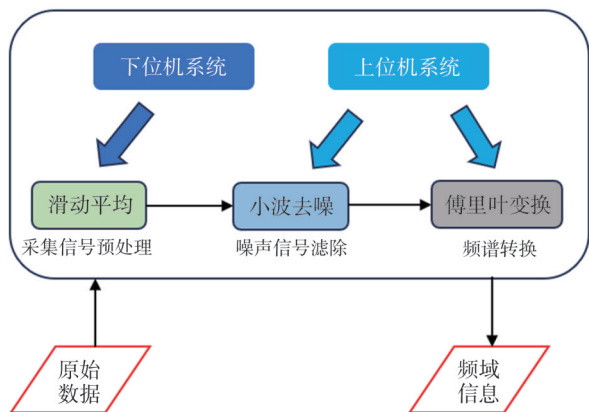


图 4 数据处理整体流程图

Fig. 4 Overall data processing flowchart

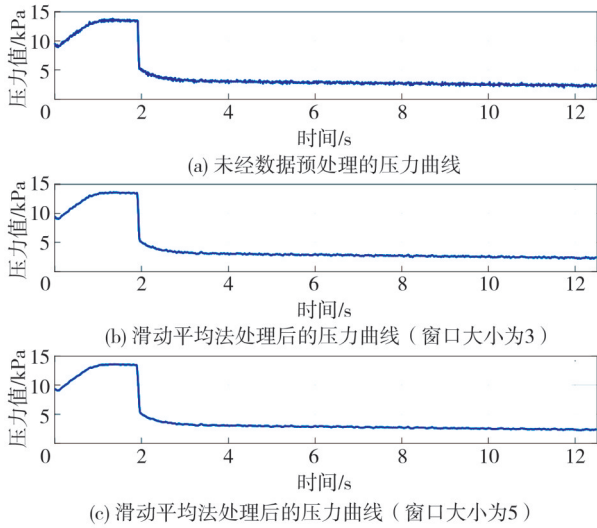


图5 滑动窗口预处理前后对比图

Fig. 5 Sliding window preprocessing before/after comparison

2.2 傅里叶变换

下位机预处理后的数据在保压过程中均呈现下降趋势。针对不同的泄漏情况,很难从时域角度分析并区分这些曲线的形状与类型。且这些信号通常会包含一些噪声信号,使得从时域角度来制定合格性判定标准变得困难。

本文基于傅里叶变换方法对信号片段进行全局分析,将周期性时域信号 $f(t)$ 投影为频域函数 $F(\omega)$,其变换 FT 和逆变换 FT^{-1} 为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t} f(t) dt, \quad (2)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (3)$$

采用离散傅里叶变换,以采样频率 f_s 对信号进行采样,其思想是将无限长的离散信号截断至 N 个采样点,并进行周期性延拓,其变换为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-2\pi i \frac{k}{N} n} \quad (k=0, 1, 2, 3, \dots, N-1), \quad (4)$$

式中: N 为采集总样本数; $X(k)$ 为频域中第 k 个复数分量; $x(n)$ 为时域中的第 n 个数据点。在采样率内使用不同频率的正余弦信号与原始信号相乘并叠加,可以将输入时间序列转换成具有不同离散频率成分的频谱表示。此时,不仅可以使使用相关频域滤波算法来消除无效噪声信号,还可以基于信号的频率特性来制定适当的合格性判定标准^[8]。

2.3 小波分析

传统傅里叶变换仅能获取整段时间序列的整体频率信息,无法捕捉在特定时间出现的频率变化。在实际工业环境中,突发噪声信号不可避

免,直接采用傅里叶变换得到的频谱可能会导致显著误差。因此,拟先采用小波分析获取信号频率随时间的变化关系,并在后续数据处理中排除非正常频率成分,以提高精度和准确性^[9]。

将含噪信号应用小波变换,在不同时间尺度上分析信号在时域和频域上的局部信息,最终将其分解成不同频率和尺度上的小波系数为

$$WT(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt, \quad (5)$$

式中: a 为尺度因子,用于控制小波函数的伸缩,与傅里叶变换的频率对应; τ 为平移量,控制小波函数的平移,对应于小波作用的时间,这两个变量共同定义了小波基函数的特性; ψ 为有限长会衰减的小波基函数。小波基函数筛选的实际频率与尺度因子 a 存在一一对应的关系,

$$F_s = F_c \cdot \frac{f_s}{a}, \quad (6)$$

式中: F_s 为筛选的实际频率; F_c 为母小波中心频率; f_s 为采样频率。小波去噪法的基本原理是利用小波变换来分析信号中的不同频率成分,并根据成分的重要性去除噪音。

在对信号进行小波去噪处理时,需确定适用的小波基和小波分解层数,以及合适的小波函数。鉴于本文所测信号有效信息呈现低频特性,且结构相对简单,选择 Haar 小波进行小波分解。如图 6 所示,当该分解层次为 3 级时,其低频系数 ca3 的变化趋势与理想保压曲线相似,可通过信号重构方法在滤波后还原其时域分辨率。

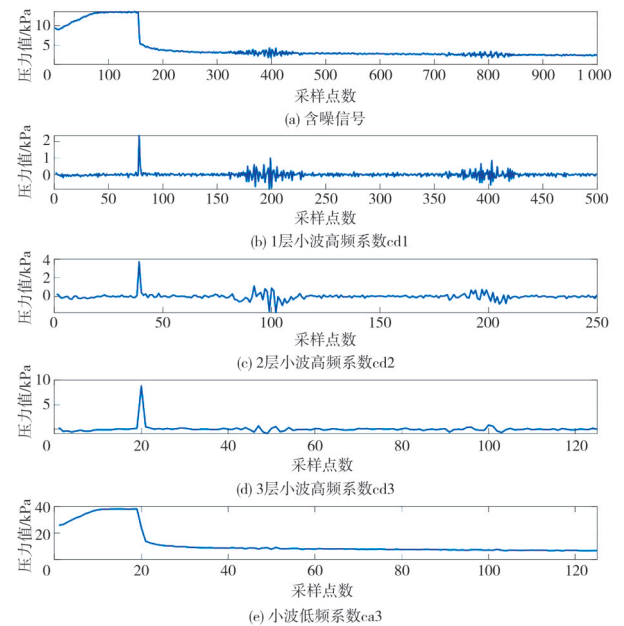


图6 三层小波分解结果

Fig. 6 Three-level wavelet decomposition

在实验室环境下,保持其他条件恒定,测得一份不受噪声干扰的基准信号作为不含噪信号来计算初始信号功率,并采用模板大值去噪、相关性去噪、硬阈值去噪、软阈值去噪 4 种方法对含噪信号进行处理,结果如图 7 所示。

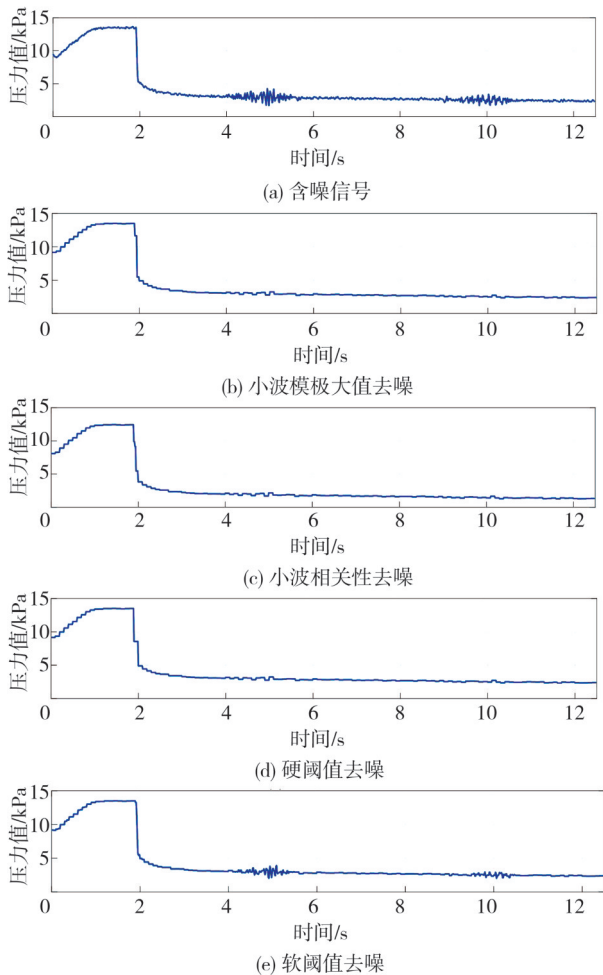


图 7 4种去噪方法结果对比

Fig. 7 Comparison of four denoising methods

各方法计算得到的信噪比数值如表 1 所示,其中,除软阈值去噪方法外,其余方法得到的信噪比表现相似,能够有效去除中高频噪声信号,但考虑到相关性去噪后可能会导致信号略微失真,而模板大值去噪计算复杂、耗时较长,因此,最终选择硬阈值去噪法作为上位机系统的数据降噪方法,确保在信号质量和计算效率之间达到平衡。

表 1 各小波去噪方法信噪比

Tab. 1 Wavelet denoising signal to noise ratio

小波去噪方法	信噪比/dB
硬阈值去噪	19.36
软阈值去噪	18.65
模板大值去噪	19.33
相关性去噪	19.38

3 实验分析

为得出该气密性检测系统判定滚筒洗衣机泄漏的合理判据及验证该系统的准确性与可靠性,本文进行了多次模拟泄漏实验。实验的数据采集流程为:机械手在相机对滚筒洗衣机的洗涤剂盒孔位图像采集处理后,将盒孔位的精确信息传递给机械臂,机械臂末端执行器夹持检测工装盒,将其精准插入洗衣机洗涤剂盒,气源开始向洗衣机内充气,一定时间后停止加压并保压,使用 A/D 转换器采集压力数据并进行分析,判断待检洗衣机是否存在泄露情况。分析流程首先由下位机对数据进行预处理,实现数据的平滑。上位机首先采用小波分析获取信号频率随时间变化关系,然后,滤除噪声等非正常频率成分,再通过傅里叶变换将时域信息转换为频域信息进行分析,判断滚筒洗衣机是否泄漏。

3.1 多孔径模拟泄露实验

为了模拟实际环境下滚筒洗衣机的漏水情况,采用不同孔径的小型钻头在洗衣机外桶表面制造了孔径为 0.8、1.0、1.2、1.4 和 2.0 mm 的小孔,如图 8 所示。同时,设置标准对照组以全面分析各孔径模拟泄漏对数据曲线的影响。

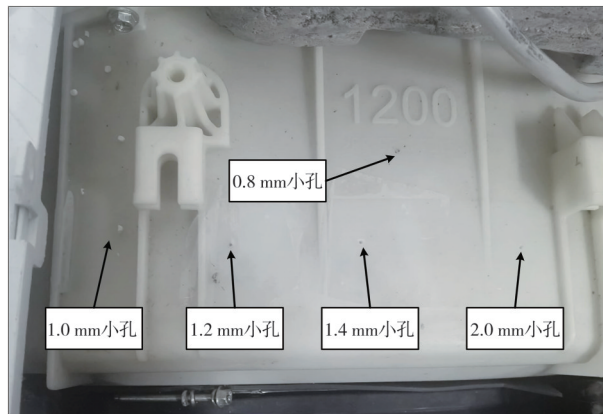


图 8 滚筒洗衣机外桶各孔径模拟泄露实物图

Fig. 8 Physical images of simulated leakage in holes of various sizes

对每种孔径进行 4 组模拟泄漏的直压法采样试验。此外,还包括一个无泄漏情况的标准试验组,共 24 组试验。时域上的气压曲线图如图 9 所示,使用相同颜色对每种孔径泄漏的曲线进行标注。

由图可知,在加压阶段,各组曲线在 2 s 内都迅速达到了峰值压力值。然而,由于其压力峰值不同,难以区分它们属于何种类型的泄漏。在 2 s 时停止加压并开始保压阶段,各组曲线均呈现断崖式下降。值得注意的是,不泄漏曲线的下降速

度相对平缓,在约12 s左右降至约2.5 kPa。相比之下,2.0 mm孔径泄漏的曲线下降速度最为陡峭,在约12 s左右降至约1 kPa。

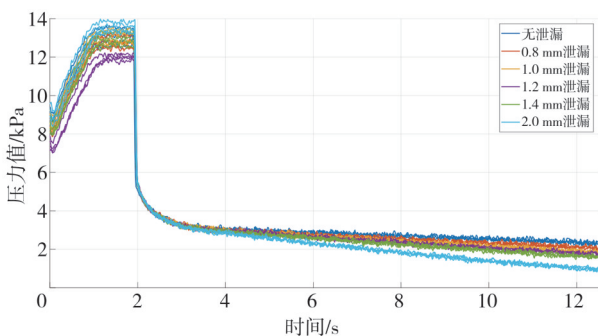


图9 24组模拟孔径泄露时域气压曲线图

Fig. 9 24-set simulated aperture leakage pressure curves

上述曲线是在实验室环境下检测所得,虽然可以从时域部分的最终压力下降值来区分是何种大小的泄漏,但在实际工业环境中,可能会引入各种类型的噪声。鉴于同种孔径曲线的下降趋势相近,将每组曲线按时间取平均值,获取6条反映不同泄漏情况的曲线。对其进行硬阈值小波去噪,并去除加

压阶段的前2 s数据,应用傅里叶变换,可以得到不同泄漏情况的频谱图,如图10所示。从图中可知,各孔径的频谱信息主要集中在1 Hz内的低频段,随频率增大呈下降趋势,因此,可以根据其低频区域的幅值来制定相应的合格性判定标准。

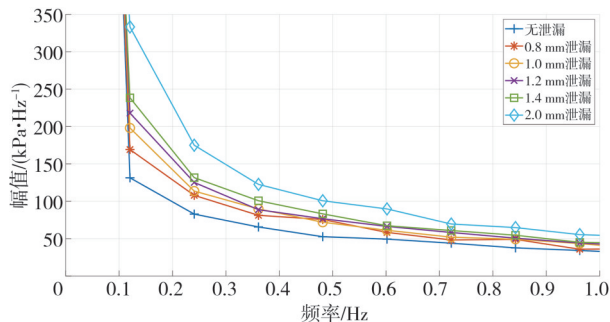


图10 24组模拟孔径泄露时域气压曲线图

Fig. 10 24-set simulated aperture leakage pressure curves

6种孔径1 Hz内的低频分量幅值如表2所示。在零频分量部分,不泄漏情况下的频率幅值达到最大值;而随着孔径的增大,其他泄漏孔径的频率幅值逐渐减小。

表2 各孔径1 Hz内的低频分量幅值表

Tab. 2 Amplitude of low-frequency components below 1 Hz by hole size

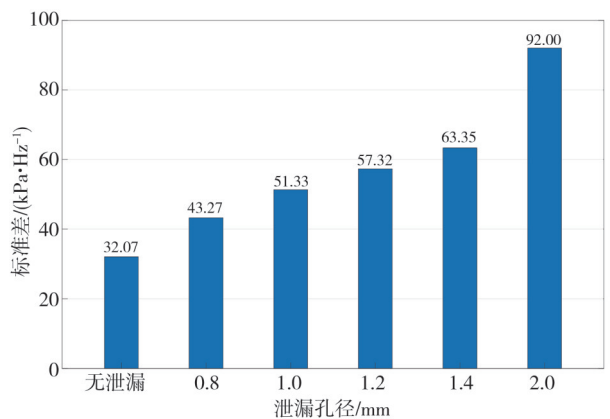
泄漏孔径/mm	分量幅值/(kPa·Hz ⁻¹)								
	0 Hz	0.120 Hz	0.241 Hz	0.361 Hz	0.481 Hz	0.602 Hz	0.722 Hz	0.842 Hz	0.963 Hz
无泄漏	2 340.1	131.4	82.9	65.6	52.6	49.4	44.0	37.7	34.2
0.8	2 221.1	169.2	107.9	81.2	75.7	58.4	48.2	49.1	35.9
1.0	2 150.0	198.0	113.7	89.7	72.0	61.2	52.0	49.3	43.4
1.2	2 094.9	218.0	125.2	88.7	76.7	66.4	58.3	50.7	44.2
1.4	2 026.7	238.5	131.6	100.8	83.2	67.3	60.9	54.6	45.1
2.0	1 730.3	333.3	175.0	122.6	100.7	89.8	69.6	64.8	55.4

结合图表观察分析可得,在0.120~0.963 Hz频段内,不泄漏情况下的频率幅值都保持在最低水平,并且这些幅值会随着泄漏孔径的增大而增加。基于这些数据特征,采用标准差和二项指数拟合曲线积分两种指标,分别描述信号在非零频的低频区域离散程度以及频段内的总能量。通过综合考量和信号分析,以制定相应的合格性判定标准。各泄漏孔径在不同频段的标准差及拟合曲线如图11所示。

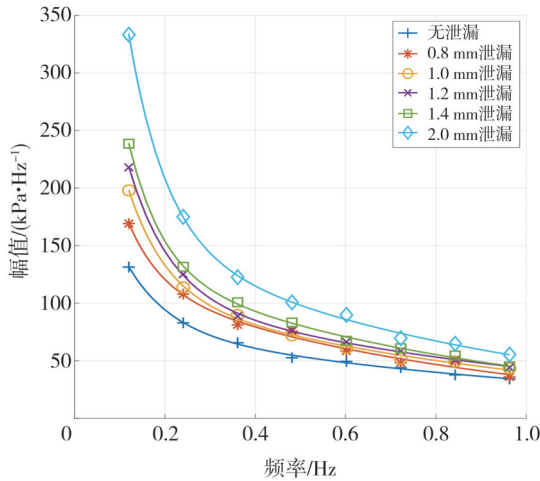
频谱图表示信号在不同频率上的能量分布,而在某段频域内的积分即该频段内的总能量。因此,对图11(b)所示的二项指数拟合曲线进行积分,可以得到信号在该频段内的能量^[10-11],如图12所示。

综上所述,需要全面考虑信号在低频区域离散程度及频段内总能量两个因素对结果的综合影响。针对实际生产线上待检测的滚筒洗衣机,本文分别对两参数与不泄漏对照组保留了10%的裕度,以弥补实际检测过程中的检测误差。具体而

言,对于待检测的洗衣机,其低频段标准差应控制在35.27 kPa/Hz以下,同时低频段拟合曲线的积分值应不超过49.28 kPa²·Hz。仅当上述条件同时满足时,我们才能判定检测结果合格;反之,则判定为不合格。



(a) 各泄漏孔径低频段标准差



(b) 各泄漏孔径低频段二项指数拟合曲线

图 11 不同泄漏孔径在各频段的标准差及拟合曲线图

Fig. 11 Standard deviation and fitting curves by Hole size and frequency band

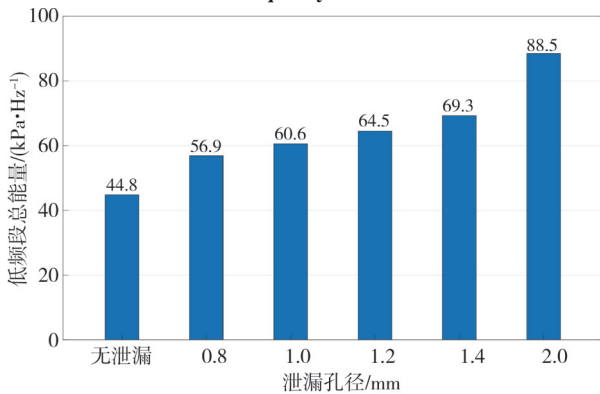


图 12 不同泄漏孔径各频段的总能量

Fig. 12 Total energy per frequency band by leak Hole size

3.2 实机检测验证实验

为验证上述数据处理等算法的可靠性,对实际待测滚筒洗衣机进行了多次实机检测实验,通过直压法测得的压力数据经过上述算法后,得到低频段标准差和低频段拟合曲线积分如图 13 所示。

由图可知,第 12 组和第 35 组的标准差和拟合

曲线积分数据超出合格性范围,判定为不合格,经过实际水检试验,发现这两组滚筒洗衣机确实存在明显的漏水问题;其余 48 组均落在合格范围内,判定为合格。同时,验证了上文中对低频段标准差和低频段拟合曲线积分值两个参数与不泄漏对照组保留 10% 裕度的可行性。

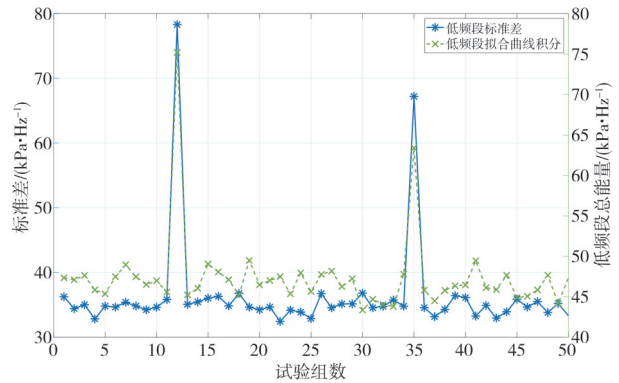


图 13 实际检测数据

Fig. 13 Actual detection data

3.3 检测系统的重复性实验

为验证检测系统的可重复性,对 10 个滚筒洗衣机分别进行 3 组实验,对比每个滚筒所对应的低频段标准差和低频段拟合曲线积分,以及检测结果是否相同。实验所采用的 10 个滚筒洗衣机中,有 8 个为不泄露组,2 个为泄漏组,均已通过实际水检实验验证。通过检测系统直压法测得的压力数据经算法处理后,得到的每个滚筒所对应的低频段标准差和低频段拟合曲线积分偏差如表 3 所示,其中前 8 组为不泄露组,经测量第 9、10 组泄漏孔径大小约为 1 mm。偏差百分比值为所测数值与图 11、图 12 中相应组的低频段标准差和低频段拟合曲线积分数值差值的百分比。结果表明二者数值均较为稳定,且检测系统对每个滚筒洗衣机 3 次检测的结果相同,证明了该检测系统的可重复性。

表 3 重复性实验结果对比表

Tab. 3 Repeatability results comparison

实验项		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
拟合曲线积分偏差/%	第 1 组	1.52	1.03	1.23	0.93	0.75	1.56	1.05	1.55	1.50	1.20
	第 2 组	1.40	1.10	1.15	0.80	0.70	1.40	0.95	1.45	1.51	1.35
	第 3 组	1.65	1.15	1.32	0.85	0.90	1.45	1.15	1.50	1.55	1.25
标准差偏差/%	第 1 组	3.45	3.10	3.40	2.95	2.98	3.20	2.85	3.10	3.15	2.96
	第 2 组	3.35	3.15	3.48	2.77	2.90	3.13	3.00	3.05	3.10	3.10
	第 3 组	3.55	3.18	3.55	2.88	3.00	3.30	2.90	3.15	3.28	3.15

4 结论

基于直压检测方法提出一种针对滚筒洗衣机

的气密性检测方案。根据采样信号特性,运用小波分析理论和傅里叶变换,对经过预处理的含噪信号进行分析。对待检洗衣机进行多孔径模拟泄

漏试验,将各孔径泄漏情况的去噪信号进行快速傅里叶变换,提取其低频段特征,通过标准差和拟合曲线积分进行综合分析,制定了合格性判定标准。对于待检测洗衣机,其低频段标准差应在35.27 kPa/Hz以下,同时低频段拟合曲线积分值应不超过49.28 kPa²·Hz,仅当上述条件同时满足时,判定检测结果合格。通过对多台实际待检测洗衣机进行泄漏检测试验,验证了所采用数据处理方法和合格性判定标准的可行性。

参考文献:

- [1] 刘军. 产品气密性检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [2] 李江波. 基于ARM的燃气调压器检测系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [3] 林引. 密闭容器气密性检测方法的仿真研究及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [4] 王娜, 刘祎, 王晓旭, 等. 基于结构张量的四阶偏微分方程图像降噪模型[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 786-792.
WANG Na, LIU Yi, WANG Xiaoxu, et al. A denoising model based on the fourth-order partial differential equation image of structure tensor[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2018, 39(6): 786-792. (in Chinese)
- [5] 白兴宇, 苟宇涛, 姜煜, 等. 一种复杂噪声环境下的机电系统故障在线监测声学处理方法[J]. 电子科技, 2023, 36(3): 55-61.
BAI Xingyu, GOU Yutao, JIANG Yu, et al. An acoustic treatment method for on-line fault monitoring of electromechanical systems in complex noise environment[J]. Electronic Science and Technology, 2023, 36(3): 55-61. (in Chinese)
- [6] 逢增吉. 基于小波变换与傅里叶分析的谐波检测方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [7] 方薇, 张冬英, 费海强, 等. 基于容器容性阻尼特性的热红外微小泄漏气密性检测技术研究[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(6): 76-80.
FANG Wei, ZHANG Dongying, FEI Haiqiang, et al. Research on air tightness detection technology of tiny-leakage from infrared images based on vessel capacitive-resistance damping[J]. Automation & Instrumentation, 2023, 38(6): 76-80. (in Chinese)
- [8] 殷松峰, 王一程, 曹良才, 等. 基于快速傅里叶变换和积分图的快速相关匹配[J]. 光子学报, 2010, 39(12): 2246-2250.
YIN Songfeng, WANG Yicheng, CAO Liangcai, et al. Fast correlation matching based on fast Fourier transform and integral image [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(12): 2246-2250. (in Chinese)
- [9] 陶珂, 朱建军. 小波去噪质量评价方法的对比研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2): 128-133.
TAO Ke, ZHU Jianjun. A comparative study on validity assessment of wavelet denoising [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(2): 128-133. (in Chinese)
- [10] AL-TOFAN M, ELKHOLY M, KHILQA S, et al. Leak detection in liquid pipelines using lower harmonics of pressure oscillations[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2020, 11(4): 04020033.
- [11] 刘鹏程, 肖天元, 艾廷华, 等. 基于傅里叶能量度量的曲线多尺度表达[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(3): 587-594.
LIU Pengcheng, XIAO Tianyuan, AI Tinghua, et al. Multi-scale representation of curves based on Fourier energy metric[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(3): 587-594. (in Chinese)