

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212147

改进中值递推算法在流阻仪测试信号滤波中的运用

付江华^{1,2} 谢林易¹ 苏锦涛³ 陈明⁴ 李劲松¹

(1.重庆理工大学车辆工程学院 重庆 400054; 2.重庆理工大学车辆 NVH 技术研究所 重庆 400054;
3.吉林大学博士后流动站 长春 130012; 4.重庆赛宝工业技术研究院有限公司 重庆 401332)

摘要: 流阻测试仪器体积从大改进成小后,紧密型的布置使得电子元件相互干扰和设备内部气流波动较大,造成测试系统稳定性变差。通过对干扰原因的诊断,运用简单的滤波方法使测试失真度较大。根据上述问题,运用中值算法限阈有效值原理消除脉冲信号,递推平均算法消除流阻仪进气的周期性变化和真空泵振动干扰,由平均绝对误差和均方误差定义算法最优值,降低数据输入低通滤波后的失真度。实验结果表明,运用改进中值递推算法的测试系统有更好的稳定性,但测试系统响应速度较慢。改进中值递推算法能有效消除周期性、脉冲和抖动干扰信号,适用于对测试稳定性与测试精度要求高但测试实时性要求较低的静态测试系统。

关键词: 流阻测试;改进中值递推算法;测试稳定性;静态测试

中图分类号: TN713+.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520

Application of improved median recursion method in filter of flow resistance meter test signal

Fu Jianghua^{1,2} Xie Linyi¹ Su Jintao³ Chen Ming⁴ Li Jinsong¹

(1. College of Vehicle Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. Vehicle NVH Technology Institute, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
3. Postdoctoral Research Station, Jilin University, Changchun 130012, China;
4. Chongqing Ceprei Industrial Technology Research Institute, Chongqing 401332, China)

Abstract: After the size of the instrument to test the flow resistance is reduced from large to small, its tight arrangement leads to the signal interference of the electronic components and the airflow fluctuation of the equipment is large in the equipment. This phenomenon causes the stability of the test system to deteriorate. Through the diagnosis of interference causes, the simple filtering method makes the test accuracy poor. Through the summary of various problems. Firstly, the median algorithm is used to eliminate the pulse signal. Then the recursive averaging algorithm is used to eliminate the periodic variation of the intake system and the vibration interference of the vacuum pump. Furthermore, the mean absolute error and mean square error are used to define the optimal value of the algorithm. Finally, the data distortion before low-pass filter processing will be reduced. The experimental results show that the test system using the improved median recursion method has better stability, but its response speed is slow. The improved median recursion method can effectively eliminate the interference signals of periodicity, pulse and dither. The static testing system that it applies to has high requirements for testing stability and testing progress, but low requirements for real-time testing.

Keywords: flow resistance test; improved median recursion method; test stability; static test

0 引言

多孔吸声材料可以对噪声进行吸收,其中流阻率是多孔吸声材料重要特征参数之一^[1]。多孔吸声材料的流阻测试属于一种静态测试,测试系统的稳定性直接影响被测材

料的测试精度,测试的干扰直接影响学者对被测多孔材料吸声性能的研究与判断^[2-4]。

Delant 等^[5]总结出一套针对多孔纤维材料的系统经验模型,流阻率就是再这个经验模型中提出来的。Yang^[6]发明了一种模型可以直接计算得出流阻率,并做了相关实验

收稿日期:2022-11-21

验证模型算式的正确性。法国里昂中央理工大学流体力学和声学实验室团队^[7]开发了一种特制阻抗管设备,可主动控制改变其边界条件,其测试设备布局较复杂。山东理工大学的孙丰山^[8]利用交流测试法设计了一种测量装置,但测试设备体积较大。国内重庆大学的赵毅^[9]和吉林大学的王连会^[10]利用体积较大的空气压缩机作为产生稳定气流的装置分别制作了流阻测试装置。而国外体积较小的流阻测试设备,流阻测试与分析仪 SIGMA 和 AED 300-AcoustiFlow,设备购置成本较高,测试成本较高。

在消除干扰信号滤波方面,传统的滤波法有最小二乘法、傅里叶变换及小波分析等滤波方法^[11-12],但以上方法适用于线性分析基础上的数据后处理,难以适用于干扰成分复杂的实际工程应用中。常用滤波器滤波方法有低通、高通、带通和带阻滤波,其中传统的 Butterworth 低通滤波器适用于静态测试系统中,但多种干扰信号下直接进行低通滤波导致数据失真度较大。数字滤波法包括中值滤波、限幅滤波、算数平均滤波及递推平均滤波等^[13]。通过几种滤波方式的应用与组合,能够显著提升多数的测试系统的滤波效果。但针对本文特定的流阻测试系统,仅依靠传统的滤波组合无法对数据进行有效的筛选,故需要对算法进行改进。

为控制设备体积、降低购置和测试成本,本文设计了一种采用更小的供气设备和更紧凑的管路布置的流阻测试仪。并且提出了一种改善测试系统稳定性的算法。通过对低通滤波前的数据进行预处理提高滤波效果,消除气体波动、供气设备振动和元件电子脉冲等对测量仪的影响。在结构设计和数据采集处理等方面对多孔吸声材料的流阻测试进行改进,具有较高的工程指导意义。

1 测试系统稳定性

1.1 测试系统结构

本系统主要由气源供给装置(隔膜式气泵、稳流器和可调微流稳流阀)、试件放置平台(定制圆筒和定制箱体)、传感器(流速传感器和压差传感器)和电子元件(数据采集卡、单片机 STM32、LCD 显示屏和 PC 电脑端)组成,系统工作原理如图 1 所示。

本文设计的流阻测试设备与同原理流阻测试设备相比,结构布局更加紧凑,设备携带更加便捷。仪器箱体设计长度 730 mm,宽 420 mm,高 240 mm,箱体重量约为 5 kg,较国内利用工期压缩机与较长试件测试腔体的测试结构,仪器的重量与体积更小。其测试设备外观如图 2 所示。

测试操作更简单,测试效率更高效,设计的测试软件需具备参数设置、数据采集、数据分析与计算和测试报告生成模块。测试人员仅仅通过输入测试人员姓名,样件厚度、样件直径和数据储存位置进行设置,将试件放入设备中即可操作软件进行测试,测试结果可通过一键生成测试报告功能和测试历史数据查询功能对测试结果进行查询分析。测

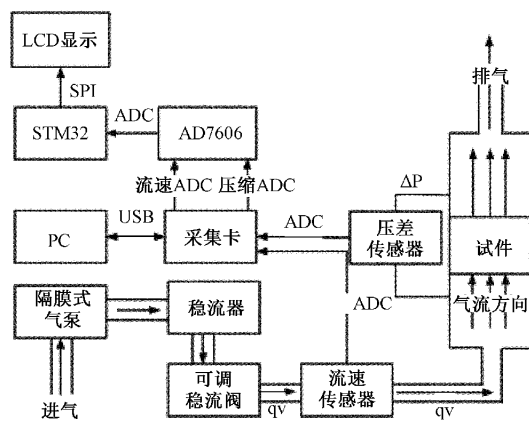


图 1 流阻仪测试系统原理



图 2 仪器外观

试程序设计原理如图 3 所示。

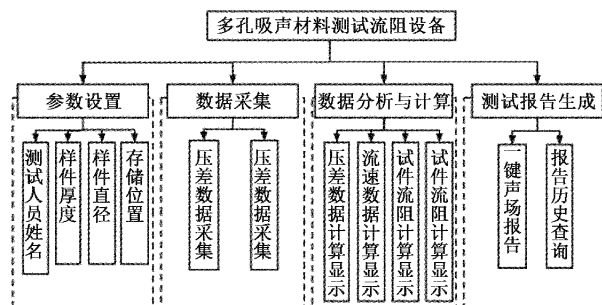


图 3 测试程序设计原理

1.2 干扰信号问题

本文流阻仪采用的供气设备为真空泵-Hilintec D35L 属于隔膜式气泵,通过隔膜往复运动改变泵腔容积来传送气体,更适用于便携式小型测试设备。但隔膜式气泵有振动较大、气流输出不稳定和气体波动较大的问题,易造成传感器采集信号周期性波动。

测试系统中传感器、单片机、采集卡和显示屏组成的测试电路,易受到电磁干扰、内部电流电压变化与测试环境影响,形成测试信号的脉冲干扰,该脉冲虽然不会对测试仪器与电路造成损坏,但对测试数据有较大影响。

FS 系列稳流器与 WYF-1 稳流阀的使用,可以在一定程度上稳定隔膜式气泵产生的气体波动,但隔膜式气泵的振动对测试结果周期性波动的影响仍然无法完全消除。故

必须在采集的传感器数据中利用算法对采集信号进行处理,进一步消除周期性波动与测试信号脉冲对试件流阻与流阻率的测试稳定性的影响。

使用 Butterworth 低通滤波器可以较为有效的消除真空泵周期性的气流变化带来的测试影响^[14],但是直接使用 Butterworth 滤波器对程序数据进行滤波,受到干扰信号影响较大,造成滤波后数据与测试数据偏差较大。将滤波后的数据与原始数据最小二乘法拟合线对比,其直接滤波后,0.688 s 第一次到达最小二乘法拟合线基准值。从 0.688 s 后开始计算,最大值在 2.173 s,与最小二乘法差值绝对值为 $137\ 936\ \text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 。第二次峰值在 1.437 s 处,与最小二乘法的差值绝对值为 $93\ 438\ \text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 。其波动大于 $\pm 5\%$ 。最小二乘法拟合线与低通滤波后对比数据如图 4 所示。结果表明,仅通过 Butterworth 低通滤波器对测试系统进行滤波,信号的失真度较大,使得测试结果精度较低。

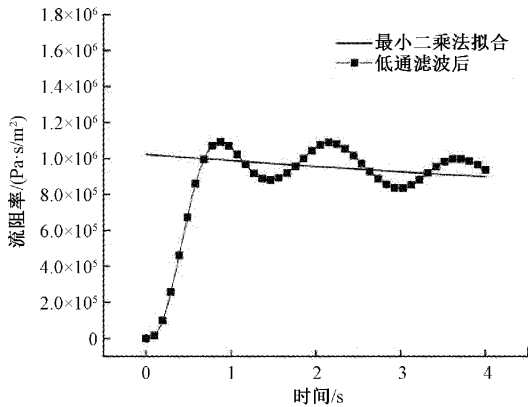


图 4 A 试件低通滤波后与最小二乘法拟合数据对比

基于上述问题,需要在 Butterworth 低通滤波器前,利用算法对采样数据先行处理,降低 Butterworth 低通滤波器造成的测试数据偏差较大的问题。

2 测试稳定性研究

2.1 干扰信号因素分析

对试件 A 进行测试,以频率为 1 024 Hz 的采样频率对压差传感器与流速传感器信号进行采样,连续采样 4 s。采样得到 4 s 内压差传感器与流速传感器的输出值。测试结果显示压差传感器中拥有幅值较大周期性干扰、脉冲干扰和抖动干扰,其时域图如图 5、6 所示。

其中流速传感器与压差传感器的脉冲信号幅值较大,流速传感器振幅最高可达约 0.3 mm/s,压差传感器振幅最高可达约 4 Pa。压差传感器受隔膜式气泵进气周期性信号影响较大,且压差传感器与流速传感器都受到了测试系统抖动信号干扰,对测试试件流阻率的测试结果影响较大。通过压差传感器信号与流速传感器信号拟合出的试件流阻率测试数据,得出试件流阻率的时域与频域特征值,其干扰信号分析如下:

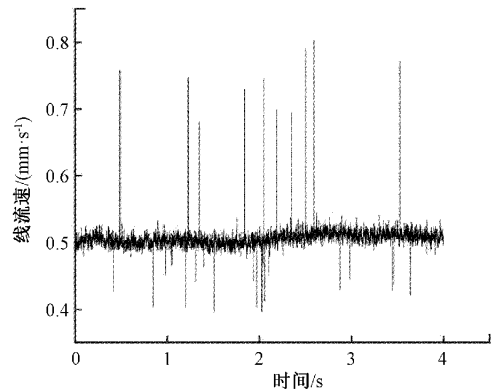


图 5 A 试件流速传感器测试数据

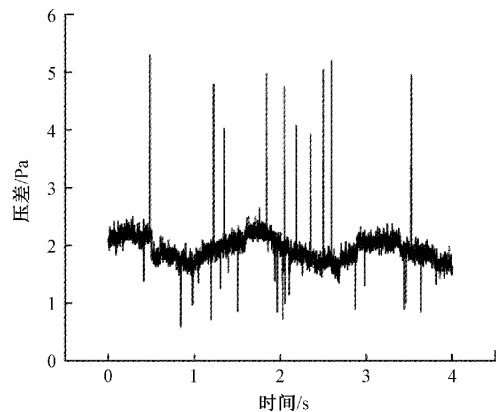


图 6 A 试件压差传感器测试数据

1) 有大量的脉冲信号干扰。

2) 幅值约为 $\pm 2 \times 10^5\ \text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 的 0.5 Hz 的周期性信号波动。

3) 幅值约为 $\pm 5.8 \times 10^4\ \text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 的 0.84 Hz 的周期性的干扰。

4) 其他频率小范围抖动信号干扰。

其波动范围已大于测试系统稳定状态下与测试平均值 $\pm 5\%$ 的范围,不满足 (GB/T 25077-2010) 的国家标准,需要滤波算法对测试数据进测试行稳定性处理。其流阻率的时域与频域测试图如图 7、8 所示^[14]。

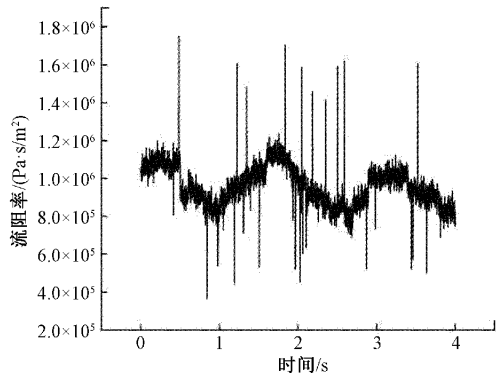


图 7 试件 A 流阻率时域图

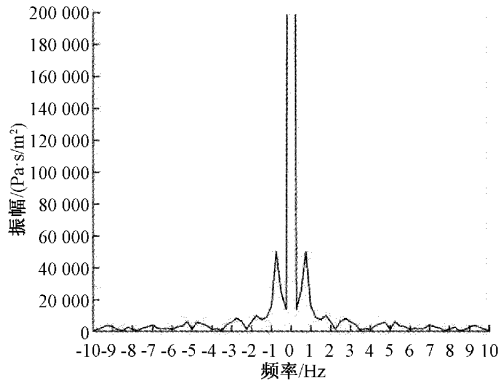


图 8 试件 A 流阻率频域图

2.2 测试算法

1) 滤波法的选择

由于测试结果受到随机脉冲信号与周期性干扰的影响,测试系统采用中值递推平均滤波法对测试数据进行处理,相当于“中位值滤波法”+“递推平均滤波法”。每次采样先进行中位值处理,再进行队列平均滤波处理。

为有效消除随机脉冲信号对测试系统稳定性的影响,采用中值滤波法对测试的消除随机干扰进行消除,连续采样次数为 M 次 (M 取奇数),把 M 次采样值按大小排列,取中间值为本次的有效值。

为有效的消除周期性干扰且让数据具有较高的周期性平滑度,对限幅滤波的数据进行递推平均滤波,递推平均滤波法实现的方法是通过所测量的参数进行 X 次采样,并将 X 次采样的数据看成一个队列,即队列的长度为 X ,每更新一次新的数据时,首先去掉队首的数据,然后数据队列前移一位,最后将更新的数据放在队尾。再将更新后得到的 X 个数据进行算术平均,从而得到有效的滤波数据。

中值递推平均滤波法,利用递推采样 M 个数据,去掉 N 个最大值和最小值 ($M > N$),然后在 $M - N$ 个数据中进行算术平均计算得到有效值。融合了 2 种滤波算法的优点,可消除由于脉冲干扰所引起的采样值偏差,也可有效消除周期性干扰信号对测试系统稳定性的影响。

2) 改进中值递推平均滤波法

根据多孔吸声材料流阻测试静态测试、高稳定性和高准确度的测试特点,提出了中值递推平均滤波法,该滤波法能有效克服偶然性脉冲信号干扰和周期性信号干扰。由于中值递推平均滤波法中的递推平均滤波的连续采样值 M ,在数据抖动测试较大的测试环境中,难以确定数据的连续采样最优数值。故提出一种对中值递推平均滤波法,在此系统中,寻优确定最佳采样值 M 的一种改进方法,以提高此算法在系统中的滤波精确度。

最后中值递推平均滤波后的数据导入 Butterworth 低通滤波器进行滤波处理。测试稳定性优化流程如图 9 所示^[15]。

为了确定最佳连续采样值 M ,首先读取采集后的流阻

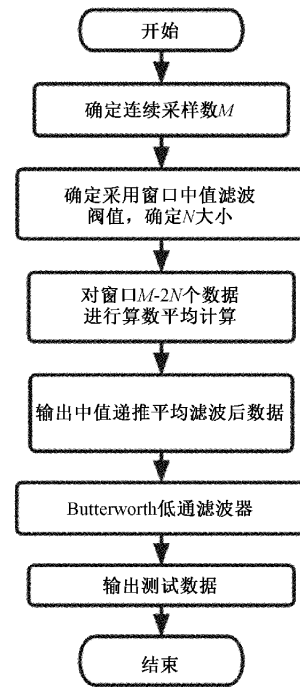


图 9 测试稳定性优化流程

率数据,确定大概的滤波窗口 M 的大小范围,根据本文流阻设备测试数据波动周期约为 0.5 Hz,拟设定递推参数范围为 $[0, 2.048]$ 。将采样的所有数据放在数组 Q 中,如果采样个数小于 M ,则继续采样;当采样数到 M 时得到有效采样数据 S_i 和有效数组 $Q[i]$,进行数据滑移,即去掉队首的数据,队列尾部数据向前位移一位,将最新采样得到的数据放入队尾。

$$Q[i] = \{S_i, S_{i+1}, S_{i+2}, S_{i-3}, \dots, S_{i+(M-1)}\} \quad (1)$$

对已有的 $Q[i]$ 中的数据进行小大排列, $Q[i]$ 数据元素中重从大到小排列得到 $Q[i]_{\max}$ 数组 $\{S_{(i)\max}, S_{(i+1)\max}, \dots, S_{(i+M-1)\max}\}$,去掉 N 个最大值与最小值得到元素数量为 $M - 2N$ 的数据组 $Q[j]$ 。重新定义 $Q[j]$ 的 $M - 2N$ 个元素,表示 $\{S_j, S_{j+1}, S_{j+2}, \dots, S_{j+M-2N-1}\}$ 。然后对 $Q[j]$ 里的数据做算术平均数得到有效值 R_j 。

$$Q[j] = \{S_{(i+n)\max}, S_{(i+n+1)\max}, \dots, S_{(i+M-N-1)\max}\} \quad (2)$$

$$Q[j] = \{S_j, S_{j-1}, S_{j+2}, \dots, S_{j+M-2N-1}\} \quad (3)$$

$$R_j = \frac{\sum_{i=j}^{M-2N-1} S_i}{M-2N} \quad (4)$$

此时中值递推平均滤波法中的连续采样次数 M 与去除最大最小值数量 N 未确定。其中 N 值确定由窗口中的最大值与最小值之差进行判断, $Q[i]_{\max}$ 中 $|S_{(i)\max} - S_{(i+M-1)\max}| > A$, A 为判断设定的阈值(阈值更具工程经验判断,本文该值设定为测量平均值的 20% 的幅度)认定超过该范围的两组信号的脉冲干扰信号,如果判定成立则继续判断 $|S_{(i+1)\max} - S_{(i+M-2)\max}| > A$,直到判定结果不成立,则计数的判定次数为 N 的取值。

在进行测试过程中,递推平均滤波法中的连续采样次数 M 的设定难以按照工程经验设定,设置不当无法消除周期性干扰信号对测试的影响测试精度。

为探究 M 值大小对数据精确度的影响,定义了如下 2 个参数:(1)平均绝对误差;(2)均方误差,判断数据误差。利用仿真软件对采集的数据(计数为 X_i ,其中 $i=0,1, \dots, n$)对数据整体进行 9 次多项式拟合,拟合后的数据用变量 X_{ii} 表示,并以该数据作为平均绝对误差与均方误差计算的基准,其中 9 次多项式拟合数据曲线如图 10 所示。平均绝对误差和均方误差计算公式为,其采样数关系曲线取图 11、12 所示^[16]。

$$E_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - X_{ii}| \quad (5)$$

$$E_{MSF} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{ii})^2 \quad (6)$$

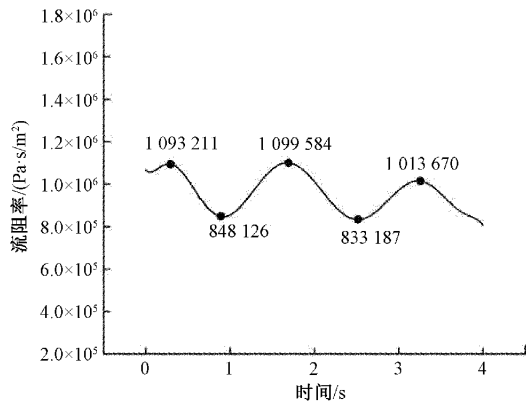


图 10 9 次多项式拟合曲线

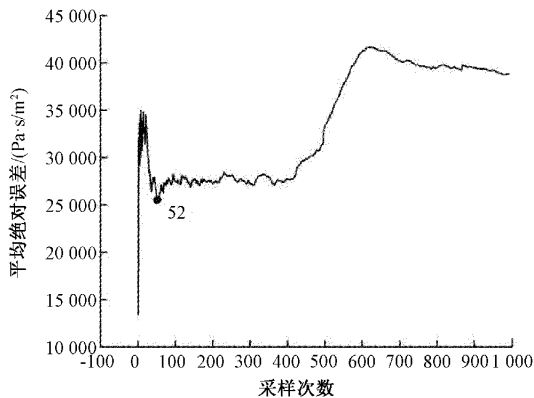


图 11 平均误差与连续采样数关系曲线

通过对数据仿真分析当取值在 $[27, 446]$ 之间时,其平均绝对误差与均方误差较小,取值为 52 时, $c=25\,497.781\,63$ 和 $E_{MSE}=1\,077\,149\,949$ 为最小值,对当前的测试波形建议 M 拟定值为 52,该值采样下的递推平均滤波法保证了值的平均绝对误差和均方误差在较小的范围内^[16]。确定中值递推平均滤波法中递推平均滤波法最优参数流程如图 13 所示。

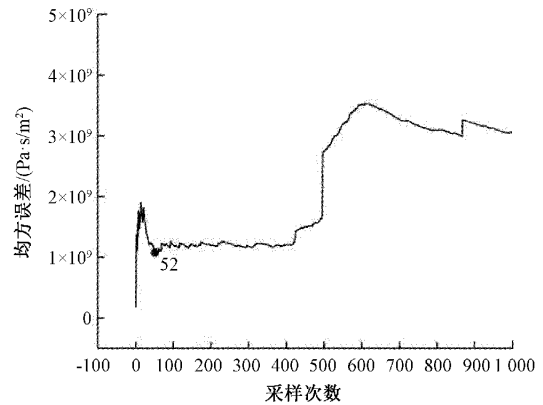


图 12 均方误差与连续采样数关系曲线

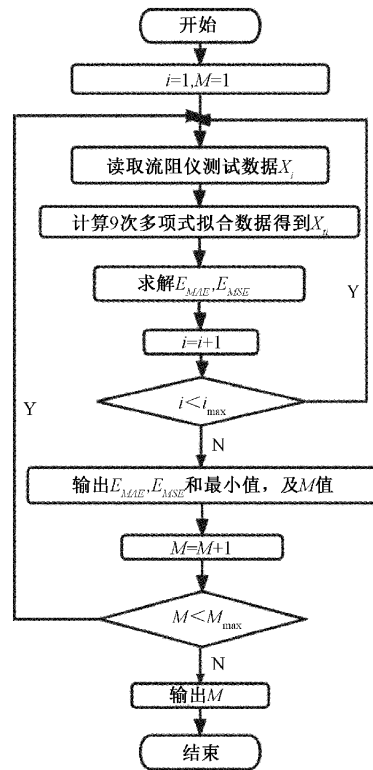
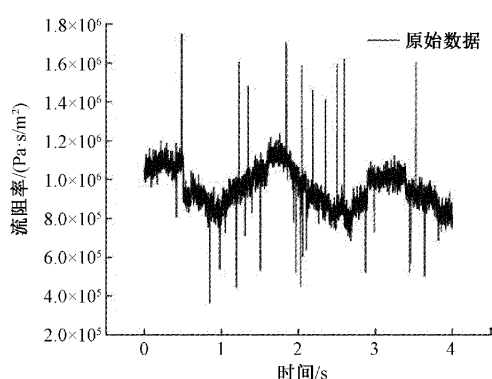


图 13 递推平均滤波法最优参数选取流程^[16]

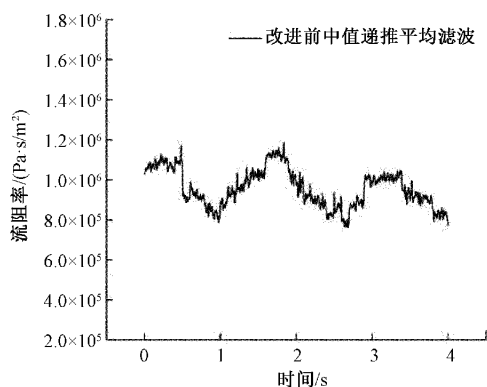
3) 结果分析

经过改进算法后得到的数据,已经较大幅度消除了隔膜式真空泵振动与测试系统的脉冲信号。改进中值递推平均滤波法后得到数据如图 14 所示。通过数据对比,原始数据经过改进后的中值递推算算法处理后,数据中较大脉冲数据与数据抖动被有效消除。

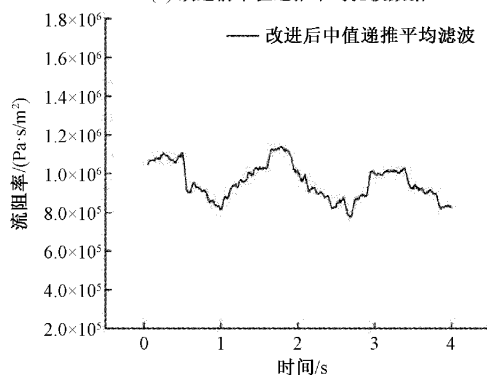
再将改进中值递推算算法处理后的数据导入 Butterworth 低通滤波器与经过改进中值递推算算法处理的数据导入的 Butterworth 低通滤波器输出数据进行对比,以采集数据的最小二乘法拟合线为基准。其测试结果显示,第一次到达最小二乘法拟合时间为 1.254 s,在此时



(a) 原始数据



(b) 改进前中值递推平均滤波数据



(c) 改进后中值递推平均滤波数据

图 14 原始数据与算法改进数据对比图

间后其最大值与最小二乘拟合线差值绝对值为 49 359, 最小值与最小二乘拟合线差值绝对值为 32 284。算法改进后进行低通滤波的数据与最小二乘法拟合线更加接近, 其中改进中值递推平均滤波法变化更加平滑, 算法改进后更慢的响应速度对于静态的流阻测试影响较小, 数据如图 15 所示。

改进后的中值递推平均滤波法有更高的测试精确度与测试稳定性, 能够更加有效消除周期性干扰信号和脉冲干扰信号, 其响应速度较慢, 且计算量较大占用 RAM, 适合运用在参数变化范围较小、测试精度要求高和测试环境稳定的静态测试系统中。

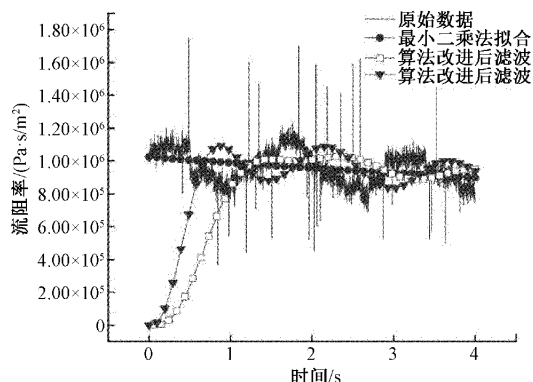


图 15 最小二乘法拟合线与算法改进后数据对比图

3 流阻仪实验及结果分析

3.1 多孔吸声材料流阻实验

将流阻测试设备与电脑连接完成后, 开始多孔吸声材料流阻实验^[17]。在上位机测试软件中的测试界面如图 16 所示。在测试界面进行测试得到的数据曲线如图 17 所示, 4 s 采集数据误差分析表如表 1 所示。其测试系统稳定状态下与测试平均值小于 $\pm 5\%$ 的范围, 符合 (GB/T 25077-2010) 的国家标准。

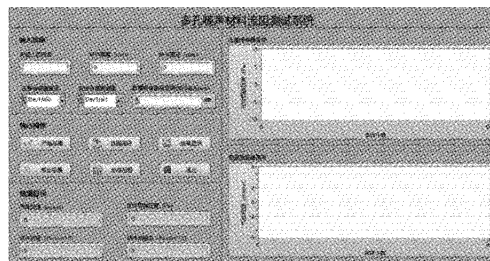


图 16 测试程序操作界面

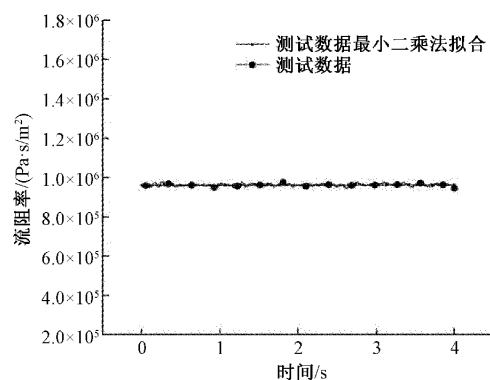


图 17 流阻仪测试流阻率

根据 (GB/T 25077-2010), 要求流阻测试系统测试时的空气线流速最低可至 0.5 mm/s 左右进行测量, 所以需要验证该系统系统在空气线流速在 0.5 mm/s 时的测量数据趋于平稳。

根据国标测试平均值小于 $\pm 5\%$ 的范围的要求, 测试系

表 1 吸收材料 A 误差分析表

序列	流阻率/(Pa·s/m ²)
总数 N	4 045
均值	960 525.155 79
标准差	6 846.099 53
最小值	941 677.664 2
中位数	960 338.754 8
最大值	981 952.146 3

统计数据输出的标准差和最小值与最大值的极差越小,其测试系统的稳定性与精准度越高。

3.2 流阻仪测试数据分析

某品牌的吸声材料 B 与 C,由无纺纱和 JMT 板制成,两层材料一起进行测量得到此吸声材料的等效作为测试结果。吸声材料 B 与 C 在压差与流速传感器稳定的静态状态下,调整通过材料的流速,从 0.1 mm/s~1.1 mm/s 变化中的 10 组数据,得到吸声材料的在 10 组数据中材料的两端压差、通过材料的空气流速、材料测试流阻和测试流阻率的数据。

吸声材料 B 与 C 测量后的数据如表 2、3 所示,其流阻率变化对比图如图 18 所示。两组材料测试数据中空气流速为 0.1 mm/s 时由于空气流速过小,气体收到测试管道内干扰气流影响较大。该测试设备的空气流速在 0.5 mm/s 时左右时的曲线较为稳定,当测试的空气流速继续增大时,其测试材料流阻与流阻率逐渐增大,该系统在线流速 0.5 mm/s 时测量数据趋于稳定。

表 2 某平品牌型号吸收材料 B

序号	压差/ Pa	空气流速/ (mm·s ⁻¹)	流阻/ (Pa·s/m ³)	流阻率/ (Pa·s/m ²)
1	0.456	0.1	561 793	1 103 078
2	0.664	0.2	402 922	791 135
3	0.873	0.3	364 801	725 184
4	1.118	0.4	354 758	696 482
5	1.377	0.5	348 408	684 098
6	1.66	0.6	347 243	681 809
7	1.952	0.7	351 317	689 809
8	2.259	0.8	355 587	698 193
9	2.556	0.9	359 907	706 676
10	2.872	1.0	365 281	717 228
11	3.196	1.1	369 860	726 218
平均流阻率(去除序号 1 后)				711 793

根据国标(GB/T 25077-2010)材料流阻与流阻率的测

表 3 另一品牌型号符合吸收材料 C

序号	压差/ Pa	空气流速/ (mm·s ⁻¹)	流阻/ (Pa·s/m ³)	流阻率/ (Pa·s/m ²)
1	0.434	0.1	529 159	1 039 512
2	0.605	0.2	370 251	726 987
3	0.813	0.3	339 587	666 778
4	1.038	0.4	323 749	635 681
5	1.229	0.5	309 109	615 703
6	1.456	0.6	305 722	600 284
7	1.702	0.7	307 860	604 481
8	1.941	0.8	308 687	606 105
9	2.223	0.9	314 463	617 446
10	2.524	1.0	320 177	628 666
11	2.824	1.1	325 360	638 844
平均流阻率(去除序号 1 后)				634 097

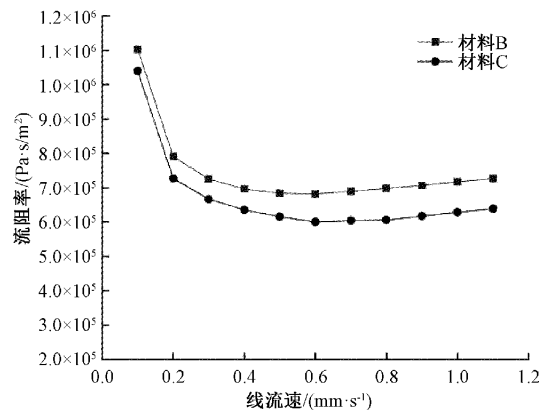


图 18 吸收材料 B 与 C 流阻率曲线变化对比

试的取空气流速为 0.5 mm/s 时测试结果为该材料流阻与流阻率。为验证流阻测试仪器实际使用改进中值递推平均算法后的效果,让流阻测试设备直接运用 Butterworth 低通滤波器进行滤波的数据与改进中值递推平均算法处理后再使用 Butterworth 低通滤波器进行滤波的数据进行对比,各在空气流速为 0.5 mm/s 时,各取 10 组数据进行对比。

测试设备仅使用低通滤波进行数据测试,和先运用改进后的中值递推算算法滤波在进行低通滤波的 10 组数据进行对比如表 4、5 所示。对测试设备和数据进行软件与硬件方面稳定性处理后,系统的测试稳定性明显增加如图 19 所示。改进中值递推平均算法优化前与优化后标准差分别为 32 051 和 6 530,其极差分别为 88 732 与 20 091,经过对比,改进中值递推平均算法对测试稳定性有较大提升。

表4 吸收材料D改进前测试数据

序号	压差/ Pa	空气流速/ (mm·s ⁻¹)	流阻/ (Pa·s/m ³)	流阻率/ (Pa·s/m ²)
1	2.518	0.507	631 894	1 240 721
2	2.522	0.509	631 107	1 239 167
3	2.404	0.505	605 901	1 189 684
4	2.332	0.501	592 060	1 162 506
5	2.402	0.505	605 633	1 189 157
6	2.449	0.501	621 753	1 220 809
7	2.443	0.500	621 321	1 219 961
8	2.352	0.503	595 715	1 169 684
9	2.461	0.508	616 921	1 219 201
10	2.315	0.502	586 703	1 151 989
平均流阻率				1 200 287

表5 吸收材料D算法改进后测试数据

序号	压差/ Pa	空气流速/ (mm·s ⁻¹)	流阻/ (Pa·s/m ³)	流阻率/ (Pa·s/m ²)
1	2.414	0.505	609 846	1 196 041
2	2.412	0.502	611 612	1 200 897
3	2.413	0.504	609 091	1 195 948
4	2.436	0.509	608 757	1 195 291
5	2.410	0.502	611 786	1 201 238
6	2.436	0.505	614 530	1 206 627
7	2.413	0.505	608 829	1 195 432
8	2.413	0.505	608 829	1 195 432
9	2.409	0.502	611 341	1 200 365
10	2.437	0.501	618 989	1 215 382
平均流阻率				1 200 204

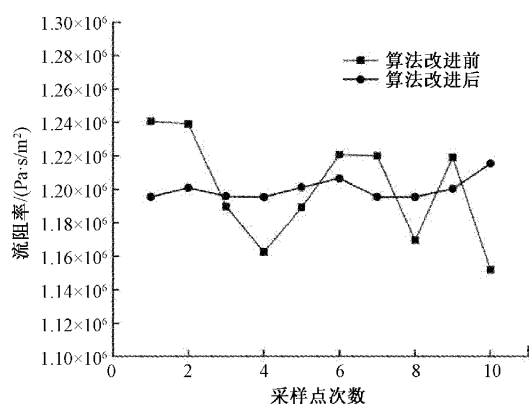


图19 吸收材料D改进前后流阻率测试数据变化

4 结 论

本文设计的流阻测试设备经过改进中值递推平均算法后,对供气装置真空泵输出气体波动、真空泵自身振动和电

子测试设备脉冲干扰的影响测试稳定性的干扰进行优化,测试系统稳定性有较大提升,提高了对多孔吸声材料的流阻与流阻率的测试精准度与稳定性。可得出如下结论:

改进中值递推平均算法后,能够更有效消除周期性干扰信号、振动抖动干扰和脉冲信号干扰的影响。

改进中值递推平均算法经过 Butterworth 低通滤波器与测试数据直接滤波后相比,有更高的测试稳定性与测试精度,更有效的避免 Butterworth 低通滤波器带来的数据失真。

改进中值递推平均算法处理数据再进行低通滤波的数据采集方法,拥有更强的抗周期性波动、环境振动抖动和脉冲干扰的能力,测试数据更加精确稳定,但是计算量过大,占用 RAM 量过大,且响应速度较慢,适用于对测试精度和稳定性要求较高且数值变化缓慢的静态测试系统。

参考文献

- [1] 熊鑫忠,刘学文,吴量,等. 边界条件对多孔材料声学参数测试的影响研究[J]. 功能材料, 2020, 51(1): 1105-1108, 1119.
- [2] 熊鑫忠,刘学文,吴量,等. 边界条件对多孔材料声学参数测试的影响研究[J]. 功能材料, 2020, 51(1): 1105-1108, 1119.
- [3] 于长帅,罗忠,骆海涛,等. 多孔吸声材料声学模型及其特征参数测试方法研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(4): 226-236.
- [4] 卜炬鹏. 陶粒吸声材料的流阻与吸声性能相互关系研究[D]. 广西:广西科技大学, 2019.
- [5] DELANY M E, BAZLEY E N. Acoustic properties of fibrous absorbent materials [J]. Applied Acoustics, 1970, 3(2): 105-116.
- [6] YANG Y, CHEN Z. A model for calculating the air flow resistivity of glass fiber felt [J]. Applied Acoustics, 2015, 91: 6-11.
- [7] 王永华,武海权,刘哲明,等. 一种快速测试多孔介质声学特征参数的方法[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2018, 41(1): 85-89.
- [8] 孙丰山. 多孔材料吸声计算的等效模型研究与性能测试[D]. 山东:山东理工大学, 2019.
- [9] 赵毅. 多孔吸声材料吸声性能仿真分析与优化[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
- [10] 王连会. 汽车多孔吸声材料吸声性能分析与优化[D]. 吉林:吉林大学, 2017.
- [11] GLAISTER P. Exponential curve fitting with least squares [J]. International Journal of Mathematical Education in Science & Technology, 2007, 38(3): 422-427.
- [12] KOSSLER W J, GRECO E F. Fourier transforms, Hilbert transforms and fitting to Fourier components [J]. Physica

- B; Physics of Condensed Matter, 2003, 326(1): 222-225.
- [13] 熊东, 黎小娇, 李庆问, 等. 汽车转弯自动照明控制系统数据采集滤波方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2016, 39(3): 68-74.
- [14] 黄波. 巴特沃斯数字滤波器的设计与仿真实现[J]. 河南科技, 2021, 40(36): 10-12.
- [15] 雷铭, 冯志辉, 南亚明, 等. 基于自适应滤波的相敏检测算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 193-198.
- [16] 郭健忠, 程峰, 谢斌, 等. 改进型限幅递推平均滤波法在燃油表中的应用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(16): 62-67.
- [17] 孙文星, 林春耀, 杨帆, 等. LabVIEW 下的扫频阻抗测试系统稳定性研究[J]. 自动化仪表, 2018, 39(7): 70-73.

作者简介

付江华, 博士, 副教授, 主要从事汽车 NVH 开发、NVH 测试设备开发方面的研究。

E-mail: jhfu08@cqut.edu.cn

谢林易, 硕士研究生, 主要从事 NVH 技术与汽车电子方面的研究。

E-mail: 626564198@qq.com

李劲松(通信作者), 硕士, 副教授, 主要从事智能汽车运动控制及优化方面的研究。

E-mail: jslj0326@cqut.edu.cn