

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.03.004

基于 EMI 技术的质量流量计 U 型管动态测试研究*

张 军,罗德昌,丁鹏飞
(安徽理工大学 机械工程学院,安徽 淮南 232001)

摘要:针对质量流量计 U 型管(以下简称 U 型管)的频率特性对质量流量计的性能影响较大的问题,以 U 型管为研究对象,研究施加动态信号后,其导纳和阻抗值变化对其频率特性的影响。首先,搭建了声学实验和压电阻抗实验平台,对 U 型管进行了声学实验和阻抗实验;其次,对 U 型管进行了模态分析,并将实验结果与模态分析结果进行了比较,得到了两者一致的结果;最后,搭建了对 U 型管施加动态信号的阻抗实验平台,对 U 型管的共振区、低频非共振区、高频非共振区分别进行了实验。研究表明:当扫频信号接近所加的共振信号时,会发现明显的共振现象,且共振信号对 U 型管固有特性的影响大于非共振信号。

关键词:压电阻抗技术;质量流量计 U 型管;动态信号;声学实验;阻抗实验

中图分类号:TH814

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)03-0293-07

Dynamic testing of mass flowmeter U-tube based on EMI technology

ZHANG Jun, LUO De-chang, DING Peng-fei

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Aiming at the problem that the frequency characteristic of mass flowmeter U-tube (hereinafter referred to as U-tube) had great influence on the performance of mass flowmeter, the U-tube was taken as the research object, the influence of admittance and impedance on the frequency characteristics under the dynamic signal was studied. Firstly, the acoustic experiment and piezoelectric impedance experiment platform were set up to carry out the acoustic and impedance experiments on U-tube. Secondly, the modal analysis of U-tube was carried out, the results of experiment were compared with the results of modal analysis, both results are consistent. Finally, the impedance experimental platform under dynamic signal on U-tube was built to test the resonance region, low-frequency non resonance region and high-frequency non resonance region of the U-tube. The research results indicate that when the sweep signal is close to the added resonance signal, the obvious resonance phenomenon was found, the influence of resonance signal on the inherent characteristics of U-tube is greater than that of non-resonant signal.

Key words: electro-mechanical impedance(EMI)technology; mass flowmeter U-tube; dynamic signal; acoustical experiment; impedance experiment

0 引 言

压电阻抗(electro-mechanical impedance, EMI)技术是一种结构健康监测技术,在结构损伤识别的研究领域应用广泛;与传统的健康诊断技术相比,其具有操作简单、结果直观准确的优点。

近年来,国内外的学者将压电阻抗技术应用到机械结构损伤研究中,并且取得了一定的研究成果。王涛等学者^[1-5]针对工程应用中螺栓松动问题,进行了基于压电阻抗技术的螺栓松动监测实验;陶娟等^[6]验证

了将压电阻抗法应用于构造地震预测的可行性;张军等^[7]针对小型直流电机工作时出现的振动噪声问题,通过实验确定了同频共振是噪声产生的原因;段磊光等^[8]针对固体推进剂的老化的问题,构建了基于线粘弹杆的结构一维机电耦合模型,并对模型进行了数值计算及试验验证;陈刚等^[9]针对导管架平台节点受循环载荷影响易受到疲劳损伤导致破坏问题,对导管架平台上的典型的节点进行了疲劳加载试验;邵俊华等^[10]探究了采用压电阻抗中峰值频率变化表征金属材料弹性变形状态的方法的可行性;XU D Y 等^[11]提

收稿日期:2020-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175005);煤炭科学基金资助项目(MTKJ2015327)

作者简介:张军(1963-),男,福建漳州人,教授,主要从事机电液一体化和阻抗理论方面的研究。E-mail:zhj63@163.com

出了基于谐振频率的标量损伤度量方法,对结构不同位置的裂纹进行了分析;WU Y G 等^[12]建立了压电陶瓷换能器与结构间机电耦合的三维数值模型,并与实验结果进行了对比验证;S MASMOUDI 等^[13]将压电传感器埋入复合材料中,通过实验验证了压电传感器会对复合材料的力学性能产生影响。

质量流量计是准确且高效的流量测量仪表,但要想检测其高信号自振频率仍十分困难的。因此,为了防止其自振频率过高,质量流量计 U 型管(以下简称 U 型管)的管壁一般都设计得比较薄,但这会导致 U 型管易受到外界振动的干扰,影响质量流量计的性能。

本文通过对 U 型管施加一定频率的动态信号,模拟其在正常工作状况下所受到的外界干扰,再利用实验的方法对其阻抗(导纳)频谱的变化进行研究。

1 压电阻抗理论

EMI 技术主要是通过压电材料的机电耦合效应来工作的,其采用 PZT4 型压电陶瓷片;对粘贴于结构上的 PZT4 施加激励,使结构产生机械振动,然后通过压电效应在 PZT4 内产生电信号,测量分析 PZT4 与结构耦合电阻抗来获得结构的机械阻抗,从而实现对结构固有属性的研究^[14]。

1.1 压电方程

1、2、3 对应 x 、 y 、 z 坐标轴方向,4、5、6 对应绕 x 、 y 、 z 轴旋转方向。

其正压电方程^[15]为:

$$D_i = d_{ik} T_k + \varepsilon_{ij}^T E_j \quad (i, j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (1)$$

逆压电方程为:

$$S_i = s_{ik}^E T_k + d_{ji} E_j \quad (i, k = 1, 2, 3, 4, 5, 6; j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中: d_{ik} 、 d_{ji} —压电应变矩阵(压电应变常数); ε_{ij}^T —应力 T 为常数时的介电矩阵, F/mm ; s_{ik}^E —电场强度 E 为常数时的弹性柔度矩阵, mm^2/N 。

1.2 结构压电耦合电阻抗理论

单自由度弹簧-质量-阻尼(spring-mass-damper, SMD)系统如图 1 所示。

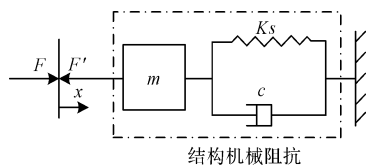


图 1 单自由度 SMD 系统模型

系统的激振力 F , 机械阻抗 Z_s 和响应位移 X 的关系可表示为:

$$F = -Z_s \dot{X} \quad (3)$$

$$Z_s = C + m \frac{\omega^2 - \omega_n^2}{\omega} j \quad (4)$$

$$\dot{X} = j\omega X \quad (5)$$

联立上式可得:

$$F = -[C\omega j - m(\omega^2 - \omega_n^2)]X \quad (6)$$

系统动态刚度 $K_D = [C\omega j - m(\omega^2 - \omega_n^2)]$, 简化式(6)可得:

$$F = -K_D X \quad (7)$$

式中: C —系统阻尼, $N/(mm \cdot s^{-1})$; m —系统质量, g ; ω —激振频率, Hz ; ω_n —系统谐振频率, Hz ; j —虚数单位。

PZT4 与单自由度 SMD 系统耦合模型如图 2 所示。

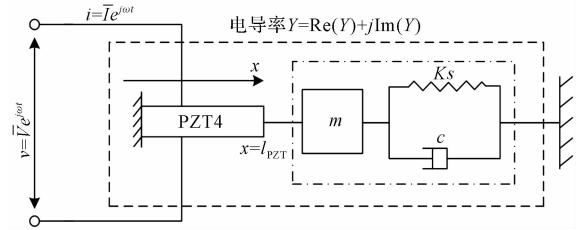


图 2 PZT4 与 SMD 系统耦合模型

耦合模型的振动位移为:

$$u = \frac{d_{31} \bar{E}_3 \sin(kx) e^{j\omega t}}{k \cos(kl_{PZT}) + j\omega \frac{\bar{E}_3^E Z_s}{w_{PZT} h_{PZT}} \sin(kl_{PZT})} \quad (8)$$

所加交变电场为 $E_3 = \bar{E}_3 e^{j\omega t}$, 等效激励力为:

$$F_{PZT} = \bar{K}_{PZT} u_f = \bar{K}_{PZT} l_{PZT} d_{31} \bar{E}_3 e^{j\omega t} \quad (9)$$

PZT4 自由状态时的振动位移为:

$$u_{PZT} = \frac{d_{31} \bar{E}_3}{k \cos(kl_{PZT})} \sin(kx) e^{j\omega t} \quad (10)$$

PZT4 的机械阻抗为:

$$Z_{PZT} = \frac{F_{PZT}}{u_{PZT}} = -j \frac{\bar{K}_{PZT} k l_{PZT}}{\omega \tan(kl_{PZT})} \quad (11)$$

PZT4 的电导纳为:

$$Y = j\omega \frac{w_{PZT} l_{PZT}}{h_{PZT}} \left(\frac{d_{31}^2 \bar{c}_{11}^E Z_{PZT} \tan(kl_{PZT})}{Z_{PZT} + Z_s} + \varepsilon_{33}^T - d_{31}^2 \bar{c}_{11}^E \right) \quad (12)$$

实际应用中, $\frac{\tan(kl_{PZT})}{kl_{PZT}} \approx 1$, 故上式又可简化为:

$$Y = j\omega \frac{w_{PZT} l_{PZT}}{h_{PZT}} \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{Z_s}{Z_{PZT} + Z_s} d_{31}^2 \bar{c}_{11}^E \right) \quad (13)$$

PZT4 的电阻抗为:

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{-j \cdot h_{PZT}}{\omega w_{PZT} l_{PZT} \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{Z_s}{Z_{PZT} + Z_s} d_{31}^2 \bar{c}_{11}^E \right)} \quad (14)$$

式中: l_{PZT} —压电片的长度, mm; w_{PZT} —压电片的宽度, mm; h_{PZT} —压电片的高度, mm; k —波数, mm^{-1} ; $\bar{K}_{\text{PZT}}$ —PZT4 的复静态刚度, N/mm; u_f —PZT4 自由端的位移, mm; $\bar{c}_{11}^E$ —PZT4 在 E 恒定时的复刚度常数。

由上述结果可知, PZT4 与结构耦合的电阻抗主要受 PZT4 自身特性以及耦合系统的机械阻抗的影响。

2 U 型管的声学 and 阻抗模态实验

2.1 U 型管的声学实验

笔者搭建的声音采集处理实验平台如图 3 所示。

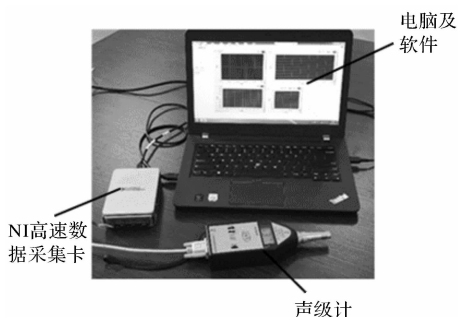


图 3 声音采集处理实验平台

图 3 中, 实验平台由声级计、NI 高速数据采集卡以及电脑组成, 电脑内装有 LabVIEW 可视化声音采集及处理软件。

2.1.1 实验方法和步骤

实验方法和步骤如下: 首先对 U 型管进行激振, 使 U 型管发出声音, 通过声级计测量将声音信号转换为电信号; 再由高速采集卡将声级计的数据返回电脑上, 通过 LabVIEW 程序实现可视化, 并经过快速傅里叶变换将时域信号变为频域信号; 最后经过数据处理得到实验图像。

2.1.2 实验结果与分析

声音实验结果如图 4 所示。

图 4 中, U 型管在 2 070 Hz、2 440 Hz、3 102 Hz、5 300 Hz 处的波峰较为明显, 这些频率即为 U 型管的固有模态频率。由于外界干扰会影响采集到的声音信号, 得到的波形杂乱, 并且实验需要对 U 型管进行敲击, 敲击力度的大小会对实验结果产生影响。

为了排除外界因素对实验的干扰, 笔者将通过 EMI 技术对 U 型管的模态频率进行进一步的研究。

2.2 U 型管的压电阻抗实验

在激励频率确定的情况下, 阻抗值的大小受到 PZT4 和耦合结构体的机械阻抗影响, 本次实验主要观察 PZT4 和 U 型管耦合时阻抗的变化。

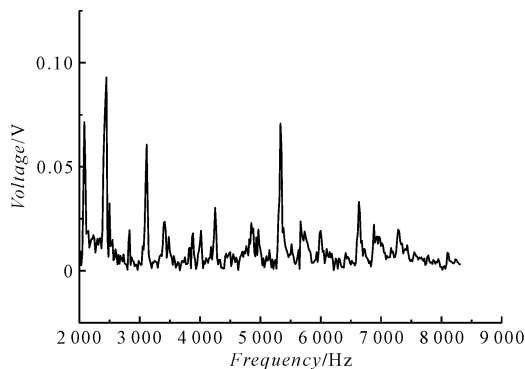


图 4 声音实验结果图像

2.2.1 实验方法步骤

此处搭建的阻抗实验平台以及阻抗实验原理图如图 5 所示。

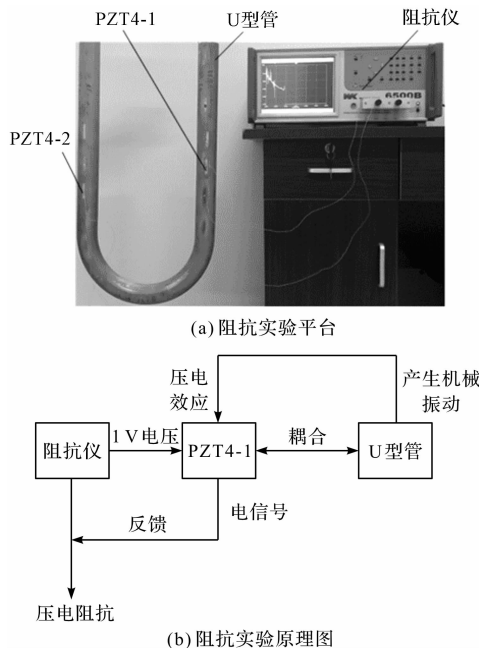


图 5 阻抗实验平台以及实验原理图

图 5 中, 阻抗实验平台主要由 WK6500B 精密阻抗仪、PZT4 压电片、U 型管以及导线组成; 实验所需其他器材还包括导电银胶、硬化剂、丙酮以及电焊台等。

实验步骤如下: (1) 打磨 U 型管的表面, 并用丙酮擦拭, 将导电银胶和硬化剂按比例混合均匀后, 涂抹在 U 型管的表面, 粘贴 PZT4-1 并轻轻按压使 PZT4-1 与 U 型管接触完全; (2) 等待 PZT4-2 与 U 型管表面粘贴牢固后, 在 PZT4-1 和 U 型管表面分别焊接一根引出导线通过夹具连接阻抗仪; (3) 设定实验测量相关参数, 进行实验; (4) 将实验结果分类做好标记, 用 Origin 绘制实验所得的阻抗频谱图。

2.2.2 实验结果与分析

笔者对 U 型管进行了阻抗模态实验, 得到的阻抗频谱如图 6 所示。

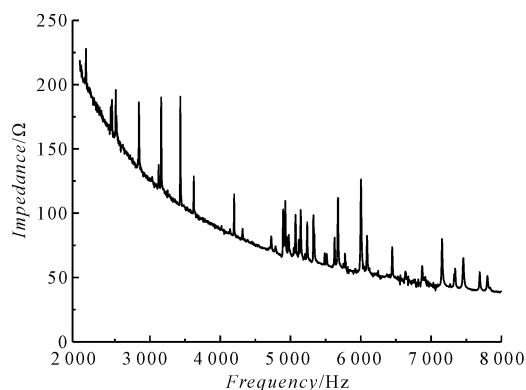


图 6 阻抗实验频谱图

当扫频频率接近管件的固有频率时,会发现共振现象,能听到 U 型管发出尖锐的鸣叫声。

由实验得到 U 型管模态频率如表 1 所示。

表 1 阻抗试验的模态频率

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	2 073	8	4 213	15	6 003
2	2 449	9	4 852	16	6 367
3	2 500	10	4 996	17	7 163
4	2 843	11	5 154	18	7 352
5	3 180	12	5 223	19	7 479
6	3 442	13	5 636	20	7 616
7	3 587	14	5 924	21	7 812

观察表 1 中的频率值可知,声学实验中得到的频率,在阻抗实验中都能得到相应频率与此对应;对比声音实验可知,阻抗实验的图形较为稳定,没有过多杂乱的波形,阻抗峰值点突变也比较明显,且得到的共振频率点也比较多,实验结果更准确。

2.3 U 型管的模态分析

在阻抗实验中,PZT4 片要粘贴在 U 型管上,但粘贴 PZT4 可能会对其固有特性产生影响。因此,本次实验就要对 U 型管进行模态分析,分析其未粘贴 PZT4 时的模态频率。

通过模态分析得到的模态频率如表 2 所示。

表 2 模态分析的模态频率

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	2 129.4	8	4 213.7	15	6 090.2
2	2 374.9	9	4 824.8	16	6 379.8
3	2 553.5	10	4 974.3	17	7 130.2
4	2 856.1	11	5 152.0	18	7 301.9
5	3 213.0	12	5 250.2	19	7 479.2
6	3 354.0	13	5 564.4	20	7 643.0
7	3 556.2	14	5 974.9	21	7 877.5

U 型管的应力主要集中在管壁处,越靠近管道口应力越大,因此,在粘贴 PZT4 片时,沿管道方向粘贴对 U 型管的激振效果好。

将阻抗试验数据和模态实验数据进行对比,其数

据对比图如图 7 所示。

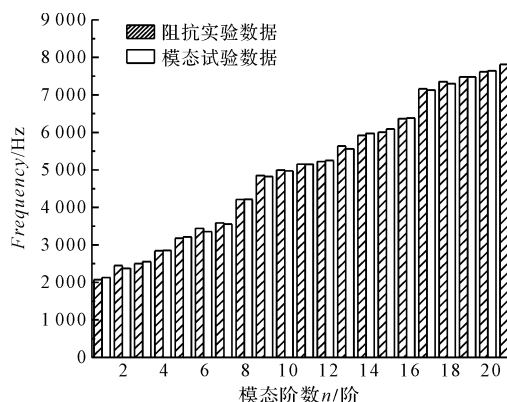


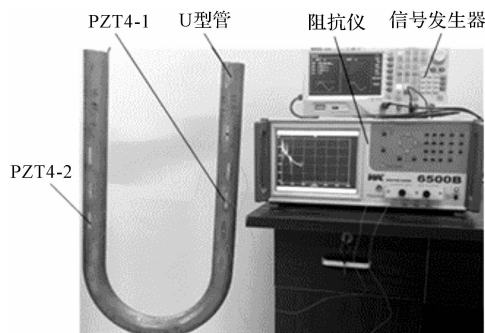
图 7 实验数据对比图

由图 7 可知:阻抗实验与模态实验得到的各阶频率基本一致;由此可见,粘贴 PZT4 对 U 型管的模态频率的影响较小,通过阻抗实验获得 U 型管模态频率的方法是可行的。

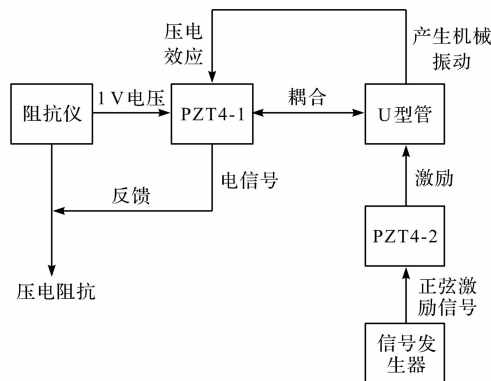
3 EMI 技术在加载动态信号 U 型管中的应用

大多数机械结构的工作环境都有一定的干扰,在这种状态下检测结构健康状态是有困难的。

此处通过对 U 型管施加动态信号模拟其在正常工作所受的干扰,所搭建的施加动信号的阻抗实验平台以及实验原理图,如图 8 所示。



(a) 加载动态信号的阻抗实验平台



(b) 加载信号的阻抗实验原理图

图 8 加载动态信号的阻抗实验平台以及实验原理图

对 U 型管施加正弦动态信号,观察其阻抗(导纳)的变化,验证 EMI 技术应用在动态信号激励实验中的可行性。

3.1 共振频段施加动态信号的结果与分析

根据施加动态信号频率值的大小,对共振区施加动态信号的研究,可分为共振频率与非共振频率研究;施加频率为 2 500 Hz、3 442 Hz(共振频率)、2 700 Hz、3 000 Hz(非共振频率)。

加载动态信号后导纳频谱如图 9 所示。

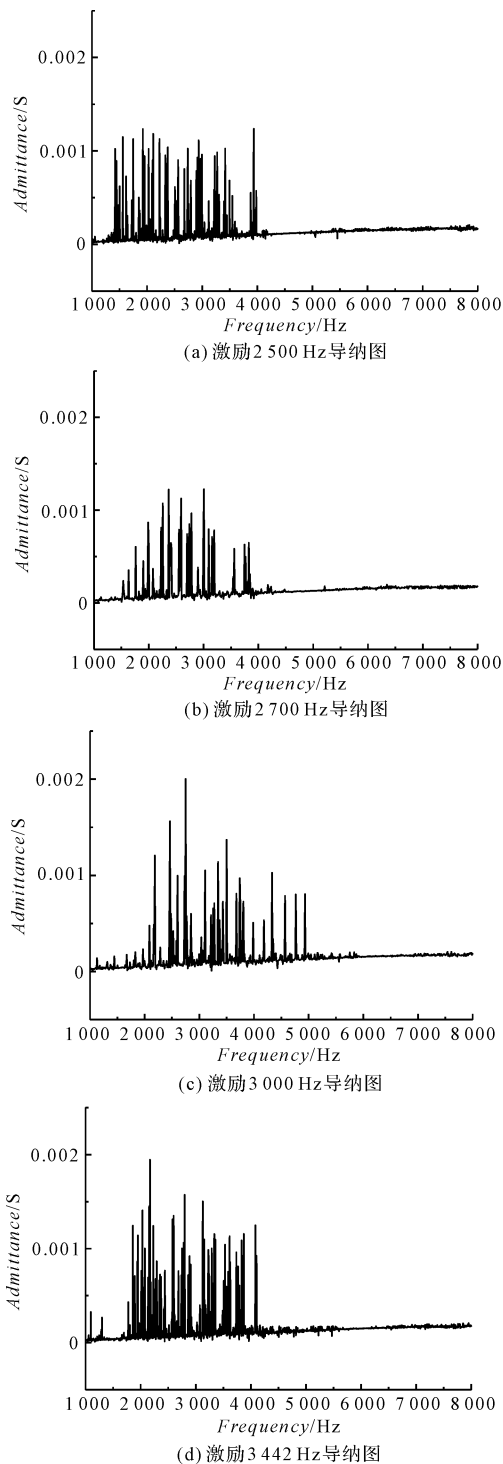


图 9 导纳频谱图

由图 9 可以看出:加载动态信号后,导纳图像会出现范围不等的波动现象,这是由于导纳曲线的上下波动造成的;激励频率越大,其导纳值波动越大,但是仅通过导纳频谱图想要区别出施加共振频率还是非共振频率是有困难的,需要通过数学方法分析,引入导纳均方根偏差法对实验前后导纳值的偏差进行统计,以此来研究施加动态信号对 U 型管导纳值的影响。

定义影响指标 $MI^{[16]}$ 如下:

$$MI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i^1 - R_i^0)^2}{\sum_{i=1}^n (R_i^0)^2}} \quad (15)$$

式中: R_i^1 —加动态信号后 U 型管的导纳值, s ; R_i^0 —未加动态信号后的导纳值, s 。

由式(15)可知: $MI \geq 0$,当 $MI = 0$ 时,表示未加动态信号;当 $MI > 0$ 时, MI 值越大, $\sum_{i=1}^n (R_i^1 - R_i^0)^2$ 值就越大,即加载动态信号后 U 型管的导纳值越大,对导纳的影响就越大。

不同频率的影响指标图如图 10 所示。

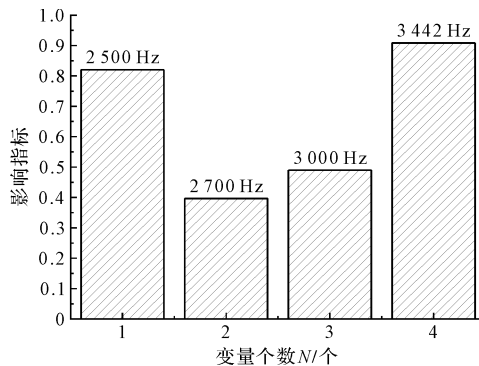


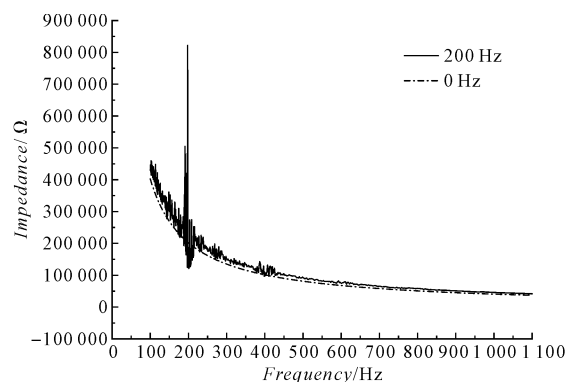
图 10 不同频率的影响指标图

共振信号的影响指标大于非共振信号,所以施加共振信号时,对 U 型管导纳的影响大于施加非共振信号时的影响;在实验过程中,施加共振信号,当扫频频率接近所加频率时,会听见管件发出刺耳的声音,而施加非共振信号在实验过程中没有发出刺耳的尖叫声。

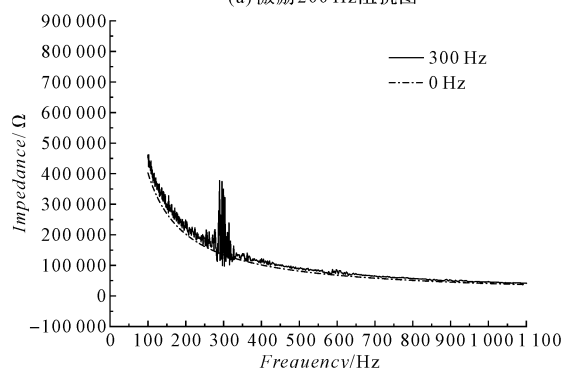
3.2 低频段施加动态信号的结果与分析

低频非共振区频率范围为 $f \leq 2$ kHz,此处设定阻抗仪的频率扫频范围为 100 Hz ~ 1 100 Hz,依次设定好函数信号频率为 200 Hz、300 Hz、400 Hz、500 Hz,施加动态信号进行实验。

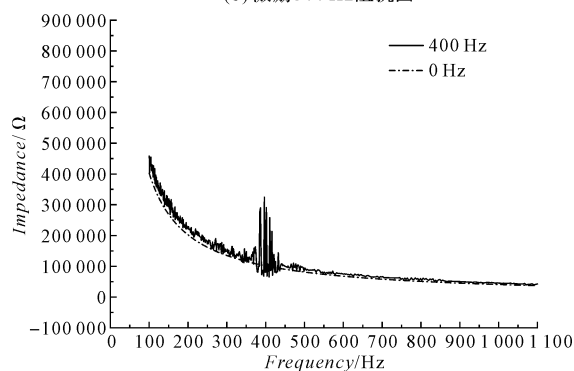
在实验过程中,笔者发现导纳图像变化规律不明显,故以阻抗值为研究参数,进行数据处理,绘制的阻抗频谱图如图 11 所示。



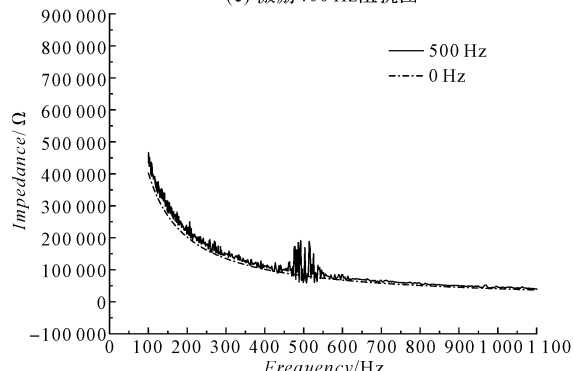
(a) 激励 200 Hz 阻抗图



(b) 激励 300 Hz 阻抗图



(c) 激励 400 Hz 阻抗图



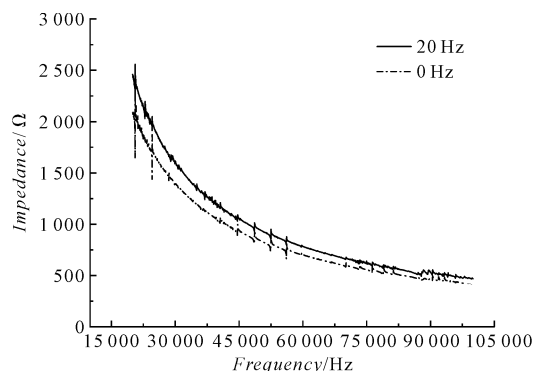
(d) 激励 500 Hz 阻抗图

图 11 阻抗频谱图

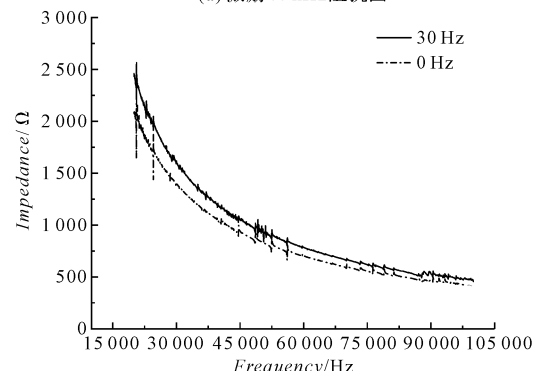
图 11 中,施加低频动态信号后,U 型管的阻抗曲线在所加的动态信号附近阻抗值会发生突变,且随着所加频率值的增加阻抗突变的峰值在减小,在 200 Hz 左右的共振效果最好。

3.3 高频段施加动态信号的结果与分析

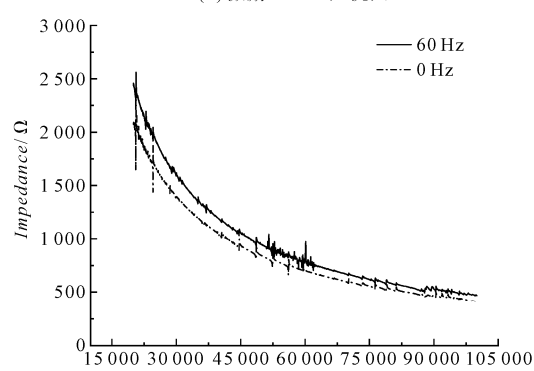
设定函数信号器的发生频率为 40 kHz、50 kHz、60 kHz、70 kHz,对 U 型管进行施加动态信号阻抗实验。实验阻抗频谱图如图 12 所示。



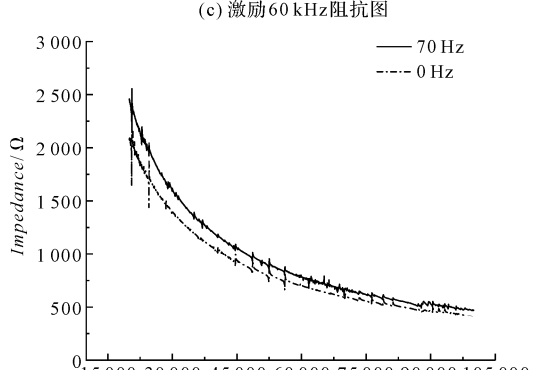
(a) 激励 40 kHz 阻抗图



(b) 激励 50 kHz 阻抗图



(c) 激励 60 kHz 阻抗图



(d) 激励 70 kHz 阻抗图

图 12 阻抗频谱图

图 12 中,加载高频非共振信号后,U 型管的整体阻抗值变大,但相较于在共振段、低频非共振段,阻抗值没有明显的突变,所以在高频非共振区施加动态信号对 U 型管的影响较小。

综上所述,施加频率信号会影响 U 型管的阻抗。在共振区,施加共振信号后,当扫频频率接近信号频率时,会出现明显的共振现象,通过分析对比发现施加共振频率信号对 U 型管导纳的影响比施加非共振频率信号的大;在低频非共振区,施加动态频率信号,U 型管的阻抗值会增大,在所加的动态频率信号处 U 型管的阻抗会发生突变,在该信号频率处也会发生共振,且 200 Hz 处的共振效果好;在高频非共振区,加载高频非共振信号,阻抗值变大,整个过程中并未发现明显共振现象,所以对 U 型管的影响较小。

4 结束语

本文以质量流量计 U 型管为研究对象,对其进行加载动态信号后的压电阻抗实验,验证将 EMI 技术应用于动态信号激励 U 型管中研究的可行性,得到如下结论:

(1)通过对比阻抗实验和模态实验得到的模态频率,阻抗实验与模态实验结果一致,验证了粘贴的 PZT 对 U 型管的频率特性的影响较小,同时验证了通过阻抗实验获得 U 型管模态频率是可行的;

(2)通过对 U 型管施加动态信号发现,当频率在 200 Hz 处时 U 型管有明显的共振现象;

(3)在共振区施加动态信号,对 U 型管的固有属性都有一定的影响。施加共振信号后影响指标达到了 0.8 以上,而非共振信号的影响指标在 0.5 左右,所以共振信号对 U 型管导纳的影响大于施加非共振信号时的影响,验证了 EMI 技术在动态信号激励下的 U 型管固有特性研究的可行性及有效性。

参考文献 (References):

- [1] 王 涛,杨志武,邵俊华,等. 基于压电阻抗技术的螺栓松动检测试验研究[J]. 传感技术学报,2014,27(10):1321-1325.
- [2] 王 涛,杨志武,邵俊华,等. 压电阻抗技术用于智能螺栓的实验研究[J]. 机械设计与制造,2015,53(9):56-60.
- [3] 宋琛琛,谢丽宇,薛松涛. 基于压电阻抗技术的螺栓松动监测试验研究[J]. 公路交通科技,2016,33(4):113-119.
- [4] 邵俊华,王 涛,汪正傲,等. 基于压电阻抗频率变化的螺栓松动检测技术[J]. 中国机械工程,2019,30(12):1395-1399.
- [5] 张 斯,王 涛,邵俊华,等. 压电阻抗解耦技术在螺栓联接状态监测中的应用[J]. 机械设计与制造,2019,57(8):161-164.
- [6] 陶 娟,张 军,李宪华,等. EMI 与 ANN 技术在构造地震模拟实验中的应用[J]. 机械设计与制造,2018,56(10):47-50.
- [7] 张 军,陆俊峰,袁 翔,等. 基于 EMI 技术的小型直流电机振动噪声研究[J]. 噪声与振动控制,2019,39(4):134-140.
- [8] 段磊光,王 广,强洪夫,等. 压电阻抗技术监测固体推进剂老化研究[J]. 推进技术,2019,40(8):1912-1920.
- [9] 陈 刚,许雨心,张大朋,等. 基于压电阻抗技术的导管架平台的典型节点损伤检测试验研究[J]. 应用力学学报,2019,36(4):889-894.
- [10] 邵俊华,王 涛,张 政,等. 基于压电阻抗技术的金属材料弹性变形检测研究[J]. 数学的实践与认识,2019,49(17):156-164.
- [11] XU D Y, CHENG X, HUANG S F, et al. Identifying technology for structural damage based on the impedance analysis of piezoelectric sensor[J]. **Construction and Building Materials**, 2010, 24(12):2522-2527.
- [12] WU Y G, XIAO Z G, LI D H, et al. Numerical and experimental study on crack identification based on the piezoelectric ceramic lead zirconate titanate impedance technology [J]. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. 2019, 30(11):1706-1716.
- [13] MASMOUDI S, MAHI A E, TURKI S. Fatigue behavior and structural health monitoring by acoustic emission of E-glass/epoxy laminates with piezoelectric implant [J]. **Applied Acoustics**, 2016(108):50-58.
- [14] 左春愿,冯 新,周 晶. 一种埋入型 PZT 的三维等效机电阻抗模型——第一部分:理论[J]. 振动与冲击,2014,33(21):119-124.
- [15] 吴建中. 基于压电阻抗损伤识别技术的有限元研究[D]. 淮南:安徽理工大学机械工程学院,2011.
- [16] 高 琴. 压电阻抗技术在动态信号激励梁的应用研究[D]. 淮南:安徽理工大学机械工程学院,2012.

[编辑:杨骏泽]

本文引用格式:

张 军,罗德昌,丁鹏飞. 基于 EMI 技术的质量流量计 U 型管动态测试研究[J]. 机电工程,2021,38(3):293-299.

ZHANG Jun, LUO De-chang, DING Peng-fei. Dynamic testing of mass flowmeter u-tube based on EMI technology[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021, 38(3):293-299.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>