

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.03.08

# 基于滞后补偿法的磁电式振动传感器 低频拓频研究

焦亮

(江苏东华测试技术股份有限公司, 江苏 泰州 214500)

**摘要:** 为提高磁电式振动传感器在低频段的响应性能, 提出一种基于滞后补偿法的磁电式振动传感器低频拓频方法。首先分析磁电式振动传感器的工作原理及数学模型, 得出影响传感器低频测量性能的关键参数; 然后设计二阶滞后补偿电路, 引入低频补偿-滤波环节优化输入与输出的传递函数, 并利用 MATLAB 软件进行仿真验证; 最后搭建振动对照测试系统进行实验验证。结果表明: 基于滞后补偿法的磁电式振动传感器低频拓频方法可将固有频率为 2.02 Hz 的磁电式振动传感器的测量带宽拓频至 0.202 Hz, 验证了该方法的可行性, 为推动小型磁电式振动传感器在低频测量场景下的应用提供了重要技术支撑。

**关键词:** 振动传感器; 低频拓频; 灵敏度; 固有频率; 补偿电路

中图分类号: TB936; TP212; P315 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2024) 03-0104-07

## Research on low frequency expansion of magnetoelectric vibration sensors based on lag compensation method

JIAO Liang

(Jiangsu Donghua Testing Technology Co., Ltd., Taizhou 214500, China)

**Abstract:** To improve the response performance of magneto electric vibration sensors in the low frequency range, a low-frequency extension method for magneto electric vibration sensors based on hysteresis compensation is proposed. Firstly, the working principle and mathematical model of the magneto electric vibration sensor were analyzed to identify the key parameters that affect the low-frequency measurement performance of the sensor. Then a second-order hysteresis compensation circuit was designed, a low-frequency compensation filtering link was introduced to optimize the transfer functions of input and output, and MATLAB software was used for simulation verification. Finally, a vibration comparison testing system was established for experimental verification. The results showed that the low-frequency extension method of magneto electric vibration sensor based on hysteresis compensation can extend the measurement bandwidth of a magneto electric vibration sensor with a natural frequency of 2.02 Hz to 0.202 Hz, verifying the feasibility of this method and providing important technical support for promoting the application of small magneto electric vibration sensors in low-frequency measurement scenarios.

**Key words:** vibration sensor; low frequency extension; sensitivity; natural frequency; compensation circuit

收稿日期: 2024-06-03; 修回日期: 2024-06-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(SQ2022YFB3200247)

引用格式: 焦亮. 基于滞后补偿法的磁电式振动传感器低频拓频研究[J]. 计测技术, 2024, 44(3): 104-110.

Citation: JIAO L. Research on low frequency expansion of magnetoelectric vibration sensors based on lag compensation method[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(3): 104-110.



## 0 引言

磁电式振动传感器可测量低频或超低频振动信号,且具有高性噪比、稳定性好、动态范围大等优点,在地震观测和地脉动观测、结构健康监测、能源与矿业工程等领域获得广泛应用<sup>[1]</sup>。在超低频测量领域,当信号频率低于磁电式振动传感器的固有频率时,测量灵敏度衰减较为显著,而受结构特性限制,磁电式振动传感器固有频率难以低于1 Hz,制约了其应用场景<sup>[2]</sup>。

研究人员针对磁电式振动传感器低频拓频技术进行探索,提出了多种拓频方法,包括无源补偿法、零极点配置补偿法等<sup>[3-4]</sup>。无源补偿法通过在输出端并联电容增加传感器的等效惯性质量,以降低自然频率,使得低频段的输出电压更为平缓,但该方法会降低中高频段的灵敏度。零极点配置补偿法通过串联校正电路以改善系统的幅频响应特性,但在传感器数学模型精度不高时,该方法的补偿效果较差。

为提升磁电式振动传感器在低频段的响应性能,本文提出基于滞后补偿法的磁电式振动传感器低频拓频方法。在分析磁电式振动传感器结构及原理的基础上,建立二阶滞后补偿电路的数学模型,并开展仿真分析,得到磁电式振动传感器低频补偿电路的传递函数,再通过滤波提高输出信号的信噪比,实现磁电式振动传感器的低频拓频。之后为验证该方法的可行性,搭建了振动对照测试系统并开展实验。

## 1 磁电式振动传感器结构及原理

磁电式振动传感器由传感线圈、永磁体、弹簧阻尼及壳体等部分组成。传感器壳体固定在测量表面,在保护内部组件的同时传递被测表面振动<sup>[5]</sup>。磁电式振动传感器数学模型如图1所示,其中 $y$ 为传感器壳体位移, $x$ 为传感线圈惯性位移, $k$ 为弹簧刚度, $b$ 为阻尼, $m$ 为惯性质量, $G$ 为传感线圈耦合系数, $i$ 为耦合电流, $e$ 为输出电压<sup>[6]</sup>。

磁电式振动传感器可分为机械拾振系统和电磁感应系统两部分。机械拾振部分是典型的二阶阻尼系统,其监测外部振动产生的运动方程为<sup>[7]</sup>

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx + F = -m\ddot{y} \quad (1)$$

式中: $\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$ 分别为惯性位移 $x$ 对时间的一阶导数和二阶导数, $F$ 为传感线圈所受电磁阻力, $\ddot{y}$ 为壳体位移 $y$ 对时间的二阶导数。

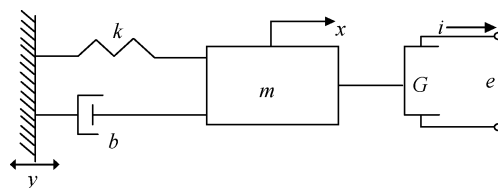


图1 磁电式振动传感器数学模型

Fig.1 Mathematical model of magneto electric vibration sensor

在不受电磁阻力的条件下,对式(1)进行拉普拉斯变换可得

$$\frac{x(s)}{sy(s)} = \frac{-ms}{ms^2 + bs + k} \quad (2)$$

式中: $s$ 为复变量,用于描述系统的动态特性。

磁电式振动传感器的电磁感应部分中,传感线圈输出电压正比于线圈与磁铁的相对速度,计算公式为

$$e = G\dot{x} \quad (3)$$

对公式(3)进行拉普拉斯变换,可得

$$e(s) = Gsx(s) \quad (4)$$

二阶系统的固有频率为 $\omega_0$ ,阻尼比为 $\zeta$ ,则有

$$\begin{cases} 2\zeta\omega_0 = \frac{b}{m} \\ \omega_0^2 = \frac{k}{m} \end{cases} \quad (5)$$

传感器测量速度时输入与输出的传递函数为<sup>[8]</sup>

$$G_0(s) = \frac{x(s)}{sy(s)} = \frac{-Gs^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2} \quad (6)$$

令 $G = 28.8 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ , $\omega_0 = 4.5 \text{ Hz}$ ,阻尼比 $\zeta$ 取不同值,绘制传感器速度档输入与输出的幅频曲线,如图2所示。分析图2可知,在固有频率确定的条件下, $\zeta$ 低于0.707时,降低阻尼比会使幅频曲线畸变,进而导致测量失真; $\zeta$ 高于0.707时,提高阻尼比会使全频段的测量灵敏度降低,故 $\zeta = 0.707$ 称为最佳阻尼比<sup>[9]</sup>。由公式(5)可知,其余参数固定时使用无源补偿法增加等效惯性质量将减小阻尼比,使传感器中高频段灵敏度降低。

令 $G = 28.8 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ , $\zeta = 0.707$ ,固有频率 $\omega_0$ 取不同值,绘制传感器速度档输入与输出幅频曲线,如图3所示。分析图3可知,当阻尼比确定

时,固有频率越低,传感器在低频段的响应特性越好。根据公式(5)可知,减小弹簧刚度 $k$ 、增加惯性块质量 $m$ ,可降低固有频率 $\omega_0$ ,但通过改变传感器内部结构来改善传感器的低频响应性能效果有限。

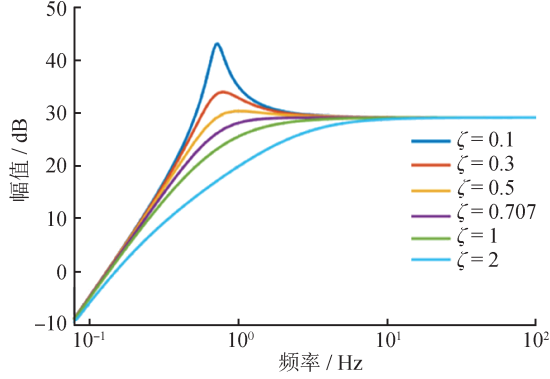


图2 不同阻尼比时的幅频曲线

Fig.2 Amplitude frequency curves at different damping ratios

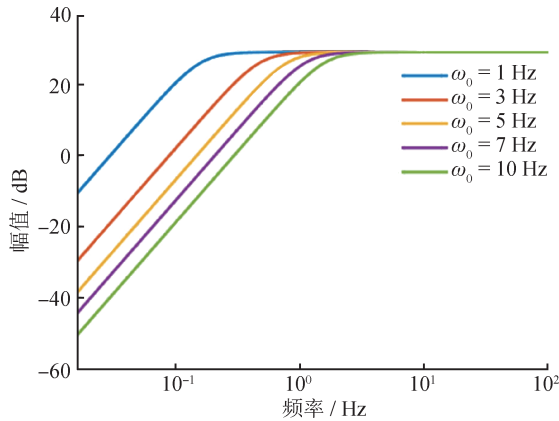


图3 不同固有频率时幅值图

Fig.3 Amplitude diagram at different natural frequencies

综合分析图2和图3可知,不论固有频率和阻尼比取何值,在某频段以下,磁电式振动传感器的灵敏度总会随着频率减小而降低。

## 2 低频补偿技术

### 2.1 二阶滞后补偿电路原理

为获得更良好的低频响应且不影响磁电式传感器整体灵敏度,采用二阶滞后补偿电路实现传感器的低频段拓频。二阶滞后补偿电路在一阶滞后补偿电路的基础上发展而来,一阶滞后补偿电路如图4所示,其中, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 为电阻, $C_1$ 为电容, $U_1$ 、 $U_2$ 为电压。

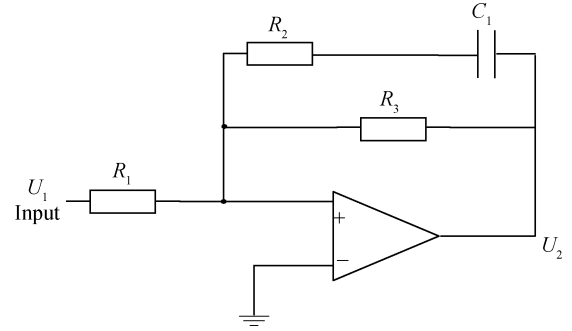


图4 一阶滞后补偿电路

Fig.4 First order hysteresis compensation circuit

计算得到 $U_1$ 与 $U_2$ 的传递函数 $G_1(s)$ 为<sup>[10]</sup>

$$G_1(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{R_3(R_2C_1s + 1)}{R_1[C_1(R_2 + R_3)s + 1]} \quad (7)$$

设 $K_1 = R_3/R_1$ ,  $T_1 = C_1(R_2 + R_3)$ ,  $T_2 = R_2C_1$ , 则

$$G_1(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{K_1(T_2s + 1)}{T_1s + 1} \quad (8)$$

二阶滞后补偿电路如图5所示。

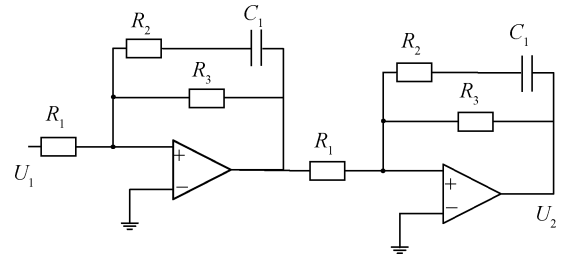


图5 二阶滞后补偿电路

Fig.5 Second-order hysteresis compensation circuit

令 $\omega_1 = 2\pi/T_1$ ,  $\omega_2 = 2\pi/T_2$ , 则二阶滞后补偿电路的传递函数 $G_2(s)$ 为<sup>[11]</sup>

$$G_2(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{K_1^2\omega_1^2(s^2 + 2\omega_2s + \omega_2^2)}{\omega_2^2(s^2 + 2\omega_1s + \omega_1^2)} \quad (9)$$

将一阶补偿电路和二阶补偿电路的传递函数归一化处理后,绘制幅频响应曲线,如图6所示。其中, $f_1 = \omega_1/(2\pi)$ ,  $f_2 = \omega_2/(2\pi)$ ,  $f_{LA}$ 为二阶补偿电路频响曲线截止频率。分析图6可知,一阶滞后补偿电路和二阶滞后补偿电路在中高频时幅值相同且保持稳定,而二阶滞后补偿电路的低频响应性能明显优于一阶滞后补偿电路。 $f_{LA}$ 决定磁电式振动传感器速度档低频扩展后的高通截止频率,因此二阶滞后补偿电路中的 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 是影响校准后低频扩展效果的关键指标。

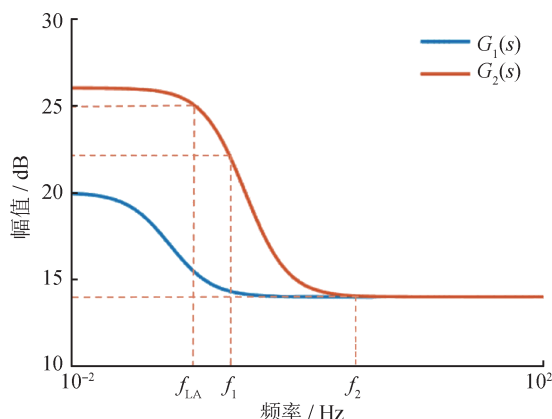


图6 两种电路的幅频响应曲线

Fig.6 Amplitude frequency response curves of two types of circuits

## 2.2 二阶滞后电路补偿设计

将公式(9)与公式(6)联立, 得到滞后补偿后系统的新传递函数  $G_{\text{ext}}(s)$  为<sup>[8]</sup>

$$G_{\text{ext}}(s) = \frac{-G(sK_1\omega_1/\omega_2)^2}{s^2 + 2\omega_1s + \omega_1^2} \cdot \frac{s^2 + 2\omega_2s + \omega_2^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2} \quad (10)$$

进行傅里叶变换可得<sup>[12]</sup>

$$G_{\text{ext}}(j\omega) = \frac{G(\omega K_1\omega_1/\omega_2)^2}{-\omega^2 + 2j\omega_1\omega + \omega_1^2} \cdot \frac{-\omega^2 + 2j\omega_2\omega + \omega_2^2}{-\omega^2 + 2j\zeta\omega_0\omega + \omega_0^2} \quad (11)$$

式中:  $\omega$  为频率,  $j$  为虚数。

该系统的截止频率  $f_{\text{LA1}}$  对应的  $\omega_{\text{LA1}}$  需满足<sup>[13]</sup>

$$20 \lg \left( \frac{|G_{\text{ext}}(j\omega_{\text{LA1}})\omega_2^2|}{GK_1^2\omega_1^2} \right) = -3 \text{ dB} \quad (12)$$

为简化计算过程, 根据补偿电路的幅频响应特性和低频扩展性质, 令  $\omega_2 = \omega_0$ ,  $\zeta = 1$ , 以降低传递函数阶数。可得补偿后传感系统的截止频率  $f_{\text{LA2}}$  为

$$f_{\text{LA2}} = \frac{\omega_1}{2\pi\sqrt{\sqrt{2}-1}} \quad (13)$$

$\omega_1$  的值取决于电路参数, 因此需要根据二阶滞后补偿电路的增益和传感信号信噪比, 对电阻和电容进行微调, 得到最佳的截止频率。

## 3 仿真和实验验证

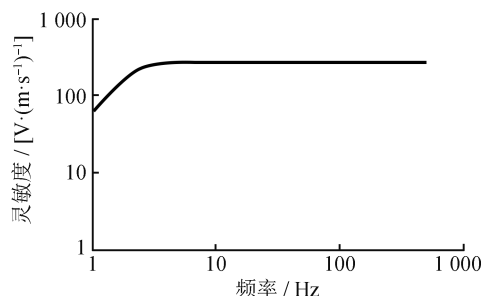
### 3.1 仿真验证

选用 ST-2A 型磁电式振动传感器<sup>[14]</sup>作为研究对象, 其固有频率  $\omega_0$  为 2 Hz, 直流电阻为 6 400  $\Omega$ , 灵敏度为 260 V/(m·s<sup>-1</sup>), 开路阻尼为 0.7, 其实物图及幅频特性曲线如图 7 所示。



(a) ST-2A型传感器实物图

(a) Physical picture of ST-2A sensor



(b) ST-2A型传感器的幅频特性曲线

(b) Amplitude frequency characteristic curve of ST-2A sensor

图7 ST-2A型传感器的实物图及幅频特性曲线图

Fig.7 Physical image and amplitude frequency characteristic curve of ST-2A sensor

在低频信号电路补偿后, 为提高传感信号的信噪比, 需减小磁电式振动传感器的前置放大噪声。图 8 为传感器低频补偿-滤波系统示意图, 通过电阻器和一级运算放大器实现了磁电式振动传感器差分信号到单端信号的转换, 通过二阶滞后补偿电路放大低频信号。

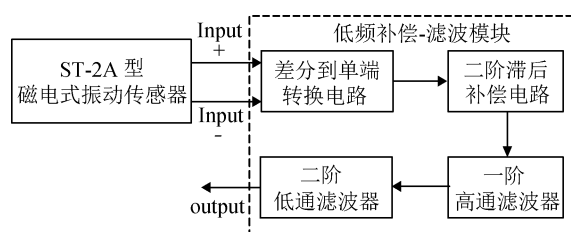


图8 传感器低频补偿-滤波系统示意图

Fig.8 Schematic diagram of sensor low-frequency compensation filtering system

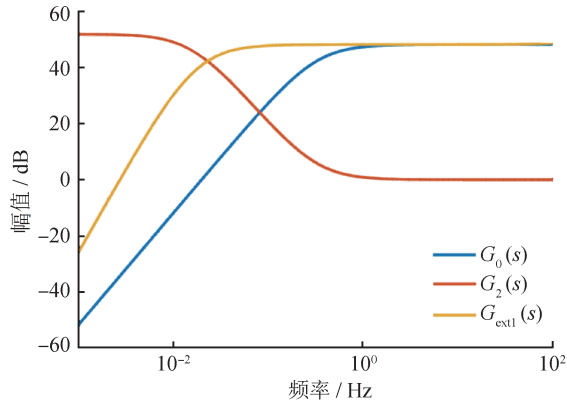
在补偿电路后, 增加截止频率为 0.02 Hz 的一阶高通滤波器和截止频率为 274 Hz 的二阶低通滤波器。高通滤波器用于减小零点漂移导致的噪声干扰, 低通滤波器用于抑制高频伪谐振峰值。新系统传递函数  $G_{\text{ext1}}(s)$  为<sup>[11]</sup>

$$G_{\text{ext1}}(s) = G_2(s) \cdot G_{\text{HP}}(s) \cdot G_{\text{LP}}(s) \quad (14)$$

式中:  $G_{\text{ext1}}(s)$  为新系统二阶滞后补偿电路传递函

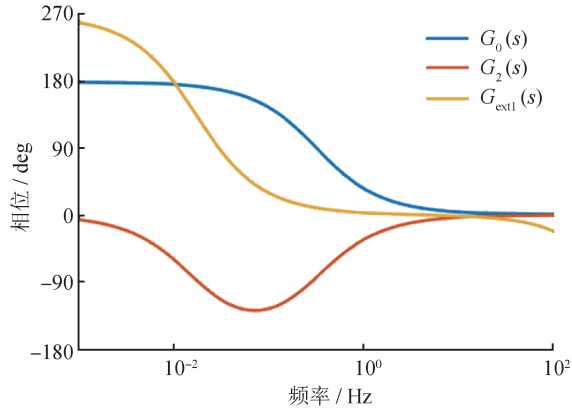
数,  $G_{\text{HP}}(s)$  为高通滤波传递函数,  $G_{\text{LP}}(s)$  为低通滤波传递函数。

利用 MATLAB 软件中的 Simulink 进行仿真, 设置参数  $K_1 = 20$ ,  $\omega_1 = 0.1 \text{ Hz}$ , 得到 ST-2A 传感器经低频补偿-滤波后的幅频和相频特性曲线, 如图 9 所示。由图 9 可知, 增加了低频补偿-滤波环节后, 在低频段下新系统的幅值响应明显大于原系统的幅值响应。



(a) 仿真得到的幅频特性曲线

(a) Simulated amplitude frequency characteristic curve



(b) 仿真得到的相频特性曲线

(b) Simulated phase frequency characteristic curve

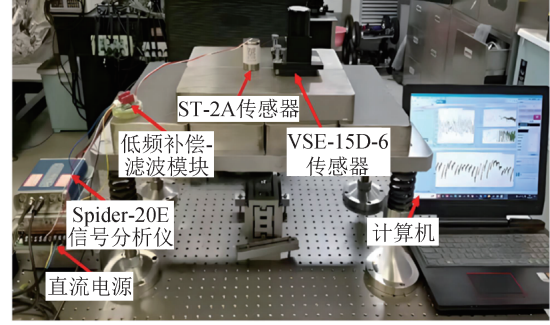
图9 仿真得到的ST-2A型传感器幅频相频响应曲线

Fig.9 Amplitude frequency and phase frequency response curves of ST-2A sensor obtained from simulation

### 3.2 实验验证

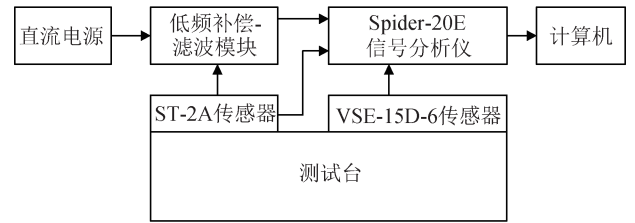
为验证磁电式振动传感器低频段补偿方法的应用效果, 在室内  $25^\circ\text{C}$  恒温条件下, 搭建振动对照测试系统并开展实验验证。振动对照测试系统由测试台、ST-2A 型传感器、VSE-15D-6 型高精度伺服速度传感器、低频补偿-滤波模块、 $\pm 15 \text{ V}$  直流电源、Spider-20E 动态信号分析仪和计算机等

部分组成。VSE-15D-6 型高精度伺服速度传感器具有低带宽截止频率和强低频测量能力<sup>[15]</sup>, 利用该传感器作为标准对照传感器, 其输出信号作为 ST-2A 型传感器的理想输入信号。振动对照测试系统实物图及结构图如图 10 所示。



(a) 振动对照测试系统实物图

(a) Physical picture of vibration comparison testing system



(b) 振动对照测试系统结构图

(b) Structural diagram of vibration comparison testing system

图10 振动对照测试系统实物图及结构图

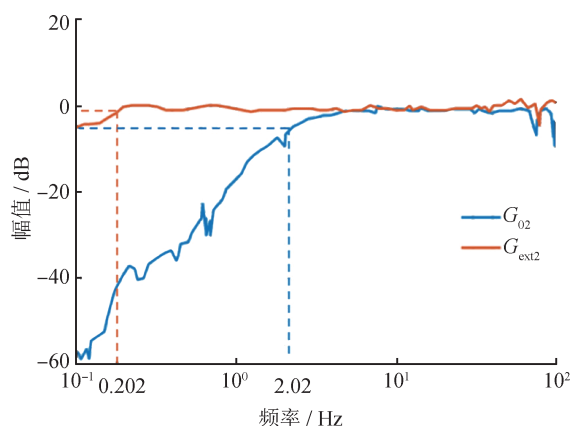
Fig.10 Physical and structural diagrams of vibration comparison testing system

实验时, 将 ST-2A 型传感器和 VSE-15D-6 型传感器固定在测试台表面测量地面的低频微量振动, 利用 Spider-20E 信号分析仪分析得到输出信号的频率响应特性, 通过计算机获得 ST-2A 型传感器的原输出信号  $V_{\text{ST-2A}}$ 、经低频补偿滤波后的信号  $V_{\text{EXT}}$  及 VSE-15D-6 型传感器对照信号  $V_{\text{VSE-15D-6}}$ 。将  $V_{\text{VSE-15D-6}}$  作为输入信号,  $V_{\text{ST-2A}}$ 、 $V_{\text{EXT}}$  作为输出信号, 则可定义式(15)。

$$\begin{cases} G_{02} = \frac{V_{\text{ST-2A}}}{V_{\text{VSE-15D-6}}} \\ G_{\text{ext2}} = \frac{V_{\text{EXT}}}{V_{\text{VSE-15D-6}}} \end{cases} \quad (15)$$

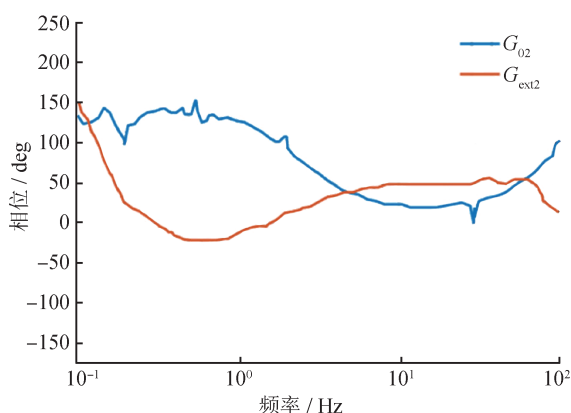
式中:  $G_{02}$  为 ST-2A 型传感器的直接响应,  $G_{\text{ext2}}$  为 ST-2A 型传感器经低频补偿滤波后的响应。 $G_{02}$  和  $G_{\text{ext2}}$  的幅频、相频响应特性曲线如图 11 所示。由图 11 可以看出 ST-2A 型传感器低频扩展前的截止频

率约为 2.02 Hz, 扩展后截止频率约为 0.202 Hz, 且与图 9 的仿真幅频曲线相匹配, 相频特性差异不大, 证明了利用二阶滞后电路进行低频补偿的有效性。



(a)  $G_{02}$  和  $G_{ext2}$  的幅频特性曲线

(a) Amplitude frequency characteristic curves of  $G_{02}$  and  $G_{ext2}$



(b)  $G_{02}$  和  $G_{ext2}$  的相频特性曲线

(b) Phase frequency characteristic curves of  $G_{02}$  and  $G_{ext2}$

图 11  $G_{02}$  和  $G_{ext2}$  的幅频、相频响应特性曲线

Fig.11 Amplitude frequency and phase frequency response characteristic curves of  $G_{02}$  and  $G_{ext2}$

## 4 结论

提出了利用二阶滞后补偿电路实现磁电式振动传感器低频段拓频的方法, 分析机械拾振部分和二阶滞后补偿电路的数学模型, 引入带有低频补偿和信号滤波的拓频环节优化输入与输出的传递函数, 并利用 MATLAB 软件进行了仿真验证。设计并搭建了振动对照测试系统开展实验, 结果表明该方法能够在不降低传感器中高频段灵敏度的情况下, 提高低频段灵敏度。本文的研究成果对于拓展小型磁电式振动传感器的应用场景具有

积极意义, 为促进低频拓频技术发展提供了新思路。

## 参考文献

- [1] 王劲松, 迟晓珠. 特种传感器发展及趋势[J]. 计测技术, 2019, 39(4): 57-63.  
WANG J S, CHI X Z. Development trend of special sensors[J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(4): 57-63. (in Chinese)
- [2] 赵锦春. 低频超低频振动计量技术的现状与展望[J]. 中国计量, 2011, 16(6): 94-96.  
ZHAO J C. The current status and prospects of low frequency and ultra-low frequency vibration measurement technology[J]. China Metrology, 2011, 16(6): 94-96. (in Chinese)
- [3] 赵国龙. 超低频隔振中绝对速度信号低频带扩展技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
ZHAO G L. Low frequency band extension technology for absolute speed signal in ultra-low frequency vibration isolation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [4] 涂常和. 磁电式地震检波器低频补偿技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
TU C H. Low-frequency compensation technology of magnetoelectric geophone [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [5] 肖明伟. 磁电式振动传感器低频特性补偿的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.  
XIAO M W. The study on the magnetoelectric vibration velocity sensor low-frequency characteristic compensation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [6] 毛宏宇, 胡卓林, 朱宇川, 等. 一种提高振动传感器动态校准精度的方法[J]. 计测技术, 2013, 33(增刊1): 94-96.  
MAO H Y, HU Z L, ZHU Y C, et al. A method for improving the dynamic calibration accuracy of vibration sensors[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(supplement 1): 94-96. (in Chinese)
- [7] 程艺苑. 小型永磁磁共振磁体的仿真设计与优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
CHENG Y Y. Simulation design and optimization of the permanent magnet for the small-sized MRI system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)

- [8] 毕超, 樊楚一, 张超, 等. 磁电式振动传感器的性能测试与验证研究[J]. 航空精密制造技术, 2022, 58(3): 14-18.
- BI C, FAN C Y, ZHANG C, et al. Study on performance test and verification of magnetoelectric vibration velocity transducer [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2022, 58 (3): 14-18. (in Chinese)
- [9] HUANG Z, ZHANG F, LI X, et al. A method to enhance the low-frequency performance of geophone [C]// 2023 2nd International Symposium on Sensor Technology and Control (ISSTC). IEEE, 2023: 124-129.
- [10] 王慧玲. 磁电式振动传感器低频补偿和自噪声评估的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- WANG H L. Research on low frequency compensation and self-noise evaluation of magnetoelectric vibration sensor [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [11] 匙庆磊. 低频标准振动台系统和振动校准技术研究[J]. 国际地震动态, 2015, 45(4): 40-41.
- SHI Q L. Research on low frequency standard vibration table system and vibration calibration technology [J]. Progress in Earthquake Sciences, 2015, 45(4): 40-41. (in Chinese)
- [12] 刘雷钧. 主动隔振系统传感器信号调理技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- LIU L J. Signal conditioning technology for sensor of active vibration isolator [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [13] 武尚. 陆地动圈式检波器低频数据增强技术初探[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- WU S. A preliminary study of low-frequency data enhancement for land moving-coil geophone [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [14] 杨争雄. 超低频测振传感器动态测试技术若干问题的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- YANG Z X. Research on some problems of dynamic measurement technology of ultra-low frequency vibration sensors [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [15] 廖飞红, 李小平, 邵新宇. 精密运动台主动减振与重力补偿技术的研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7): 153.
- LIAO F H, LI X P, SHAO X Y. Research on active vibration reduction and gravity compensation technology for precision motion platform [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (7): 153. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



**第一作者:** 焦亮(1980—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事振动、位移、压力、力矩等传感器技术研究和设计开发。