

石墨烯气凝胶加速度计低频低幅振动频域 响应特性及应用研究^{*}

王保民¹, 畅 塏^{1,2}, 李义云², 李章朋², 王金清²

(1. 兰州理工大学机电工程学院 兰州 730050; 2. 中国科学院兰州化学物理研究所润滑材料全国重点实验室 兰州 730000)

摘要:石墨烯气凝胶已被证明具有响应振动的能力及开发新型加速度计的潜力,为探究石墨烯气凝胶传感器在低频低幅振动下的响应特性,根据所制备的GA力学性能表现,设计组装了一款新型GA加速度计。其中,GA既是弹性元件也是敏感元件,实现了双功能集成,简化了整体结构。在振动台上测试了该加速度计的响应特性,并在真空泵上进行了电机振动频率监测验证。测试发现,GA加速度计不仅在时域信号上表现出高灵敏度和线性度,1g加速度下的灵敏度均在3 mV/g以上,高于先前的报道2.6 mV/g。其频域信号也表现出高精度和稳定的重复性,其0.44%的最大相对误差率比商业传感器的5.46%低一个数量级。在低频低幅振动响应测试中,GA加速度计的频域信号表现出较大的直流偏移量,屏蔽了相对较小的频域信号,可通过高通滤波去除直流偏移量后得到直观的频域信号。此外,在GA加速度计的振动监测中,其对定频与变频振动均响应出稳定的时域信号,且对输出信号做时频分析得到的结果与所设定的工况相符。在实际监测应用中,其性能表现同样卓越,同一工况下3次频率测试的结果均保持一致,同时,监测信号能够对机身晃动异常行为产生显著的信号输出变化,证实其在设备状态监测方面具有重要的应用潜力。

关键词:石墨烯气凝胶;加速度计;低频低幅振动;响应特性;频域信号

中图分类号: TH825 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Response characteristics and application researches of graphene aerogel accelerometer in low-frequency and low-amplitude vibration frequency domain

Wang Baomin¹, Chang Kun^{1,2}, Li Yiyun², Li Zhangpeng², Wang Jinqing²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key
Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Graphene aerogel (GA) has been shown to possess vibration responsiveness and significant potential for developing novel accelerometers. To explore the response characteristics of GA-based sensors under low-frequency and low-amplitude vibrations, a new GA accelerometer was designed and assembled based on the mechanical properties of the prepared GA. In this design, GA serves simultaneously as both the elastic element and the sensing element, achieving dual-function integration that simplifies the overall structure. The response characteristics of the GA accelerometer were tested on a vibration table and further verified by monitoring motor vibration in a vacuum pump. The results demonstrated that the GA accelerometer exhibits high sensitivity and linearity in the time-domain signal, with a sensitivity exceeding 3 mV/g under 1g acceleration—higher than the previously reported 2.6 mV/g. Meanwhile, the frequency-domain signal showed high precision and stable repeatability, with a maximum relative error rate of 0.44%, which is an order of magnitude lower than the 5.46% of commercial sensors. In low-frequency and low-amplitude vibration tests, the frequency-domain signal of the GA accelerometer exhibits a large DC offset, masking relatively small frequency-domain components; however, clear frequency-domain signals could be obtained after removing the DC offset via high-pass filtering. Moreover, during vibration monitoring, the GA accelerometer produced stable time-domain response to both constant-frequency and variable-frequency vibrations, and time-frequency analysis of the output signals aligned well with the preset operating conditions. In practical monitoring applications, the GA accelerometer also showed excellent performance: results from three frequency tests under identical conditions were highly consistent,

and the monitoring signals exhibited significant output changes in response to abnormal body-shaking events. These findings confirm its strong potential for equipment condition monitoring applications.

Keywords: graphene aerogel; accelerometer; low-frequency and low-amplitude vibrations; response characteristics; frequency domain signal

0 引言

在现代生产和生活中,振动无处不在,因此了解和利用振动对社会发展意义重大。例如,在航空航天、机械、土木、交通和能源等工程领域中,振动均发挥着重要影响。在振动检测中,加速度计是应用最广泛的一类传感器。一般来说,基于传感机理不同,主流加速度计主要有压阻式、压电式和光纤布拉格光栅式(fiber Bragg grating, FBG)等^[1]。然而,现有技术在满足日益增长的复杂振动监测需求方面,尤其在关键性能参数上,面临着显著挑战。如微幅振动下灵敏度与精度不足,传统压阻式与压电式灵敏度低导致精度下降;信号获取与处理复杂,压电式需要配套电荷放大器,FBG需要复杂的光学解调系统,等。压阻式加速度计以其结构简单、易组装、功耗低、抗疲劳性好、应用范围宽和信号漂移低等显著特点而得到重点关注^[2-4]。但是,开发一种可直接获得振动响应信号且能完成高精度、高灵敏度监测的压阻式加速度计仍是一项巨大挑战。

近年来,柔性材料以其低成本、高灵敏度的特点在压力传感器和振动传感器领域得到了广泛应用和快速发展^[5],从生物医学和可穿戴设备^[6-7]到机械设备的状态监测^[8]等各种运用案例层出不穷^[9-11]。

柔性材料中的石墨烯气凝胶(graphene aerogel, GA)具有密度低、结构易加工、形貌易调控、性质稳定、导电性和强度高等诸多优点。研究人员围绕GA的动态响应性能进行了一系列研究。例如,Qiu等^[12]发现石墨烯多孔弹性体表现出几乎与频率无关的压阻行为。随后,Coskun等^[13]开发了基于超轻石墨烯弹性体的柔性传感器并用于宽频率范围内的细微振动检测。Liu等^[14]报道了基于石墨烯弹性体材料组装的电阻式氧化石墨烯薄膜传感器,证实其在高频检测方面具有出色表现。Chen等^[15]利用GA制备的高灵敏度传感器成功实现了对颈动脉信号的检测。Zeng等^[16]开发了一款超轻高柔性气凝胶传感器,其所表现出的超高频振动感应性能显著优于同类传感器。Yang等^[17]使用纯GA制备的传感器成功实现对手机振动信号的检测。Wang等^[18]基于一种改进的GA制备了高温加速度计,并且实现了高达5 000 Hz的高频振动检测。此外,Wang等^[19]在接触电阻的基础上也开发出了GA振动传感器,其具有灵敏度高、响应范围宽的特点。

以上研究证明了GA具备对振动响应的能力及在开发新型加速度计上的广阔前景。但是,低频振动(如微风振动、电机振动等)作为振动中常见的现象,其振动传感对GA加速度计的灵敏度及低频低幅振动的响应特性提出了较高要求,而传统的加速度计在面对低频弱信号时,往往存在灵敏度低、精度差、信号采集复杂等问题。因此,为了充分发掘GA材料在加速度传感领域的独特优势,解决现有加速度计在关键性能指标上面临的挑战,迫切需要对GA加速度计的传感性能,特别是其频域响应特性进行深入、系统的研究。

综上所述,针对GA加速度计频域响应特性研究尚不完善的问题,本研究基于对GA力学与电学特性的研究基础,设计制备了一款GA加速度计,并利用振动台测试系统,对该加速度计的响应特性以及实际应用效果等进行了系统的研究。

1 GA加速度计结构设计及性能分析

1.1 GA制备与力学性能分析

机械加速度计主要由基础框架、弹簧或其他弹性元件、以及质量块3部分构成。GA作为结构单元中的弹性元件,加速度计的输出要想保持良好的稳定性,就必须保证工作时GA的变形在线性变形区间内。组装加速度计所用的GA材料是将氧化石墨烯与羧基化纤维素纳米纤维(6%分散液)通过复合制备得到的,其(直径12 mm、高10 mm)具有优异的弹性和大变形下的恢复能力。将GA材料放置于AGS-X电子万能试验机在90%应变下进行压缩试验(图1),获得的应力-应变($\sigma-\varepsilon$)曲线如图2所示。可以看出,GA材料的压缩变形主要呈现出3个阶段,即:线性弹性阶段、弹性形变阶段和致密化阶段^[7]。压缩过程中,在小应变时呈线性关系(特别是在前10%的压缩区间内曲线均保持了一段良好的线性),而在中等至较大应变时则表现为明显的非线性关系。



图1 在90%应变下对GA进行压缩试验

Fig. 1 Compression test of GA at 90% strain

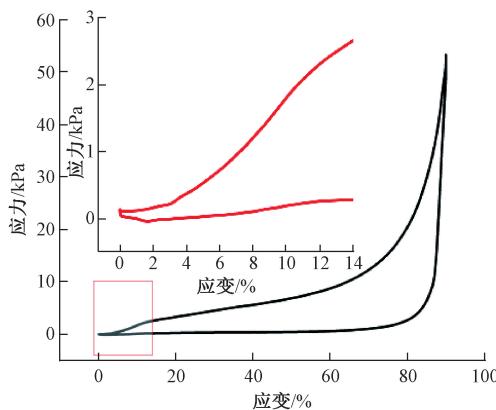


图 2 GA 的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of GA

1.2 加速度计结构设计

GA 加速度传感器的组成结构如图 3 所示, GA 既是传感器的弹性元件也是敏感单元, 实现了双功能集成。在其上方放置惯性质量块, 以提供惯性载荷。为保证低振幅下加速度计的响应特性, 系统刚度应保持不变, 基于 GA 的应力应变曲线关系图可知其在 4% ~ 10% 的曲线斜率接近平滑直线。相应地, 质量块提供的压力大小应使其获得 4% 以上的压缩形变, 选取 4.2 g 的质量块来满足该要求。GA 下方为铜箔双电极, 这样的电极布置使传感器封装接线更容易。

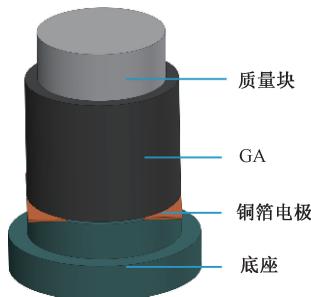


图 3 GA 加速度计结构

Fig. 3 Diagram of the GA accelerometer structure

1.3 加速度计理论分析

阻尼是材料在振动中能量耗散的能力, 阻尼小意味着材料能更好地保持弹性形变, 储存和释放能量, 而不是将能量转化为热能散失。对于弹性体来说, 较小的阻尼意味着更好的弹性回复性和更少的能量损失。对 GA 施加动态应变, 该应变利用复数形式可表示为:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

式中: ω 为周期; ε_0 为振幅。则应力响应为:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)} = \sigma_0 e^{i\delta} e^{i\omega t} \quad (2)$$

式中: σ_0 为应力振幅; δ 为应力滞后于应变的相位角

(由材料阻尼引起)。其复模量为应力与应变复振幅的比值:

$$E^* = \frac{\sigma_0 e^{i\delta}}{\varepsilon_0} = \underbrace{\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta}_{E'} + i \underbrace{\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta}_{E''} \quad (3)$$

式中: E' 为储能模量; E'' 为损耗模量。损耗因子 η 表示为两者的比值, 即:

$$\eta = \tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (4)$$

若相位差越大, 则损耗因子也就越大, 材料的阻尼越强。根据研究^[20], GA 的阻尼较小, GA 可以视为优良弹性体。

固有频率是结构系统在受到外界激励产生运动时, 按特定频率发生自然振动的频率, 是一种固有属性, 也是传感器的重要动态指标之一。为了避免共振现象对传感器造成破坏, FBG 加速度计的固有频率通常都会设计的比较高, 从而使测量区间避开传感器的固有频率^[21]。研究发现^[20], GA 材料由于杨氏模量低, 所组装传感器的固有频率也比较低, 在低频的检测范围内传感器的共振现象难以避免, 但不同于其他刚性结构加速度计, GA 材料的柔性结构及优异的弹性赋予其在大变形下的高恢复能力, 即在共振现象下, GA 加速度计结构不会被破坏, GA 在大的振幅下仍能保持良好的工作状态并获得稳定的信号输出。

对 GA 加速度计的固有频率进行计算, 初步了解其固有频率所在的区间。GA 加速度计的工作方式是质量块在其平衡位置的往复运动, 因此可将 GA 视为弹簧, 即传感器的结构可近似为弹簧质量系统。系统的固有频率计算如式(5)所示。

$$fr = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

式中: k 为系统刚度系数; m 为系统质量。在弹簧质量系统中, 系统的等效质量由质量块与弹簧质量决定。

$$m_e = m + \frac{m_s}{3} \quad (6)$$

式中: m_e 为系统的等效质量; m 为质量块质量; m_s 为弹簧质量。在该系统中, GA 质量约为 10 mg, 对系统质量的影响微乎其微, 因此系统的等效质量可近似为质量块的质量, 即 $m_e = m$ 。

弹簧质量系统中, 系统的等效刚度为弹簧的刚度, 在该系统中, 系统的等效刚度为 GA 工作线性区间的拟合刚度。图 4 中拟合结果为 251 N/m。

忽略系统阻尼的影响, 该系统固有频率的计算公式为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_e}} \quad (7)$$

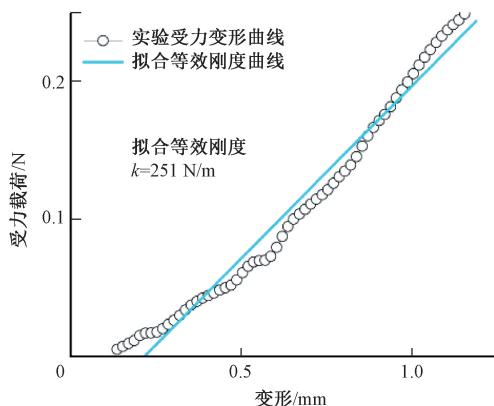


图4 GA 线性区间的拟合刚度

Fig. 4 Fitted stiffness of GA in the linear region

根据式(7)得出结果为38.9 Hz。此外,通过ANSYS有限元软件对其进行模态分析验证,建立相应的弹簧质量系统模型,设置为单自由度系统,得到其固有频率为39.15 Hz,与计算结果相一致。

2 GA 加速度计采集测试系统设计

2.1 加速度计工作原理与电路设计

在GA加速度计结构中,GA与弹簧等弹性元件不同的是GA在振动中的变形伴随着电信号的变化,且该信号可以被记录。即当有垂直振动产生时,惯性质量块提供惯性载荷作用于GA,气凝胶因受到载荷而被压缩变形导致其电阻值发生变化,在这一振动过程中,GA由于自身优异的弹性可迅速完成被压缩和恢复一系列的形变过程来响应振动。这时,将传感器与一定值电阻串联在恒压测试电路中分压,其电阻变化导致电路中定值电阻分压值改变,这个过程可通过单片机完成采集记录输出给上位机(VOFA+),再由上位机显示并分析数据,得出振动规律,完成对振动信号的频率监测。

采集电路设计如图5所示。

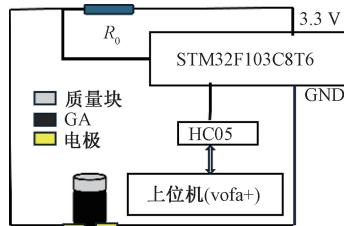


图5 采集电路示意图

Fig. 5 Diagram of the acquisition circuit

在恒压电路中,设输入电压为V,定值电阻为 R_0 ,GA加速度计为 R_1 ,定值电阻 R_0 的分压输出可表示为:

$$V_{\text{out}} = V \frac{R_0}{R_1 + R_0} \quad (8)$$

对 R_1 求导,可得分压灵敏度(分压比),即:

$$\left| \frac{dV_{\text{out}}}{dR_1} \right| = V \frac{R_0}{(R_1 + R_0)^2} \quad (9)$$

分析阻值关系对分压灵敏度的影响有 $R_0 \approx R_1$ 、 $R_1 \gg R_0$ 和 $R_0 \gg R_1$ 这3种情况,对其分别进行讨论,即:

1)当 $R_0 \approx R_1$ 时,设 $R_0 = R_1 = R$,则:

$$\left| \frac{dV_{\text{out}}}{dR_1} \right| = V \frac{R}{(2R)^2} = \frac{V}{4R} \quad (10)$$

此时,分压灵敏度为 $V/4R$,为常数。

2)当 $R_1 \gg R_0$ 时,设总电阻 $R_{\text{total}} = R_1$,则:

$$\left| \frac{dV_{\text{out}}}{dR_1} \right| \approx V \frac{R_0}{R_1^2} \quad (11)$$

此时,分压灵敏度约为 VR_0/R_1^2 ,趋近于0。

3)当 $R_0 \gg R_1$ 时,设总电阻 $R_{\text{total}} = R_0$ 。此时,电路基本不受 R_1 变化的影响,始终保持稳定,即输出电压基本不发生变化。

电阻值接近时,分压灵敏度为常数 $V/4R$,明显高于其他两种情况,分压比动态范围在 R_0 与 R_1 接近时最大,微小阻值变化会显著改变输出电压;而阻值相差较大时,系统对 R_1 的变化不敏感。

传感器电阻的变化值 ΔR 远小于传感器自身的阻值 R_1 ,为了使上位机展示最优的信号输出效果,串联的定值电阻阻值 R_0 与GA加速度计在静止状态下的阻值 R_1 相近。如图6所示为经数字源表测量得到的GA加速度计静止状态下的阻值 R_1 ,约为9.3 Ω。

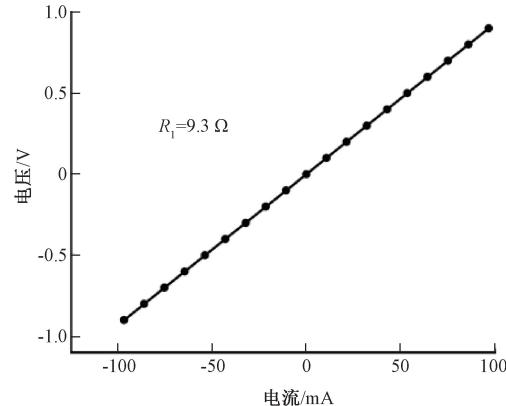


图6 GA 加速度计的I-V曲线

Fig. 6 I-V characteristic curve of GA accelerometer

信号的采集使用单片机系统直接采集电路中的电信号,采用STM32F103C8T6核心板,开启模数转换器(analog-to-digital converter, ADC),为了保证采样精度和频率,使用外部高速时钟作为时钟源,设置定时器自动装载。此外,将ADC的工作频率尽可能拉高,ADC分频后为12 MHz(该核心板的最高上限不超过14 MHz),采样频率控制为1 kHz(每过1 ms 定时器溢出触发中断,ADC

采集一次电压值,理论上最高可采集 500 Hz 的振动信号),将采集到的数据通过 HC05 蓝牙模块传输给上位机,随后通过上位机显示和处理所采集到的电压信号得到波形图,再经过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)得到该段信号的频谱图。

2.2 采集系统验证

为确保测试环境可靠,对信号发生器(SA-SG030,内置功率放大器)和采集电路板进行测试,了解传感器自身以外的环境条件对测试结果的影响,从而判断测试环境是否可靠。将信号发生器设置为三角波输出,连接一个定值电阻到信号发生器的电极,再用采集电路采集加载到该定值电阻两端的电压值信号,通过上位机观察分析。据此方法分别按 5、100 和 150 Hz 进行了 3 次测试,测试结果如表 1 所示。可以看出,信号发生器和采集电路板对采集结果的影响较小,证实该传感器的测试环境比较稳定可靠。

表 1 采集系统三角波验证测试结果

Table 1 Verification test results of triangular wave acquisition system

输出信号/Hz	测试结果/Hz	误差率/%
5	5.2	4.0
100	99.6	0.4
150	149.7	0.2

3 实验测试结果与分析

3.1 GA 传感器与采集系统搭配测试

GA 加速度计的测试装置如图 7 所示,信号发生器输出的频率信号可经过功率放大器来驱动振动台控制振幅。首先测试传感器对振动信号的响应情况,设置发生器的信号输出为 80 Hz,随后,调节功率放大器提供一定振幅,再将传感器连接采集电路板固定在振动台上进行测试,得到时域图以及经 FFT 处理后的频谱图,结果如图 8 和 9 所示。时域图信号接近正弦波信号(受测试环境中的杂波影响),因采集信号为非零点上下变动的波形,频谱图中具有较大的直流偏移量,直接执行 FFT 后在 0 Hz 附近产生大的脉冲,屏蔽掉了相对较小的响应信号,无法明确得到频域信号结果。对此,将输出信号做高频滤波去除直流偏移量后再做 FFT 得到频谱图,最大能量峰值信号对应的频率为 80.078 Hz(较小的峰为杂波信号峰)。本次测试结果表明,传感器可对振动信号进行频率检测。

3.2 传感器响应特性分析

当外界振动信号频率和传感器固有频率一致时,传感器的振动能量最大,通过对传感器采集的数据做 FFT

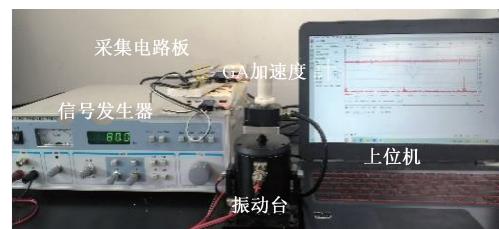


图 7 测试装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the testing setup

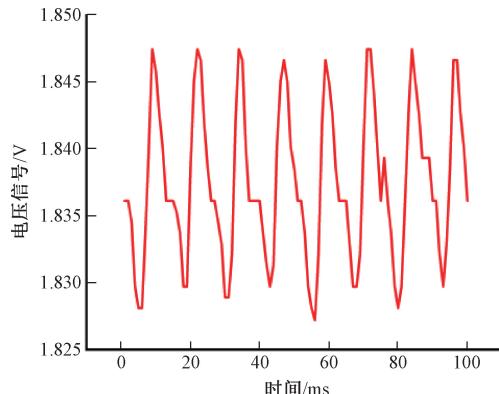
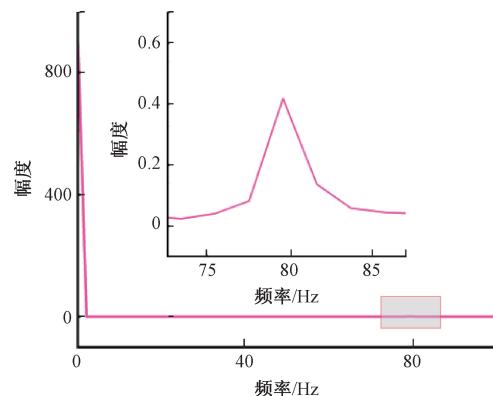
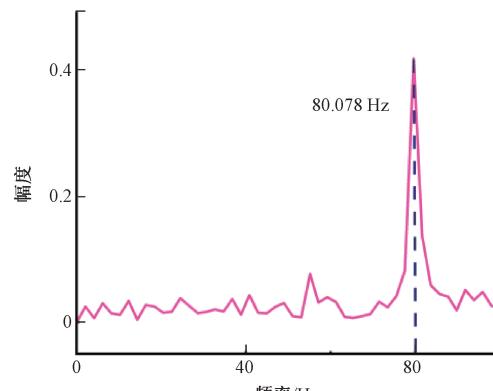


图 8 GA 加速度计测试信号时域图

Fig. 8 Time domain waveform of GA accelerometer test signal



(a) 含直流偏移量的频谱图
(a) Spectrum with DC offset



(b) 去除直流偏移量的频谱图
(b) Spectrum with DC offset removed

图 9 GA 加速度计测试信号频谱图

Fig. 9 Frequency spectrum of GA accelerometer test signal

处理后,得到能量最大时的频率就是传感器的固有频率。传感器连上采集电路板,并固定在振动台上,将信号发生器扫频输出进行测试。通过上位机观察采集到的信号并做FFT分析,得到的结果如图10所示,图像峰值所对应的频率就是传感器的固有频率41 Hz,这与前述计算所得传感器的固有频率值基本相符。

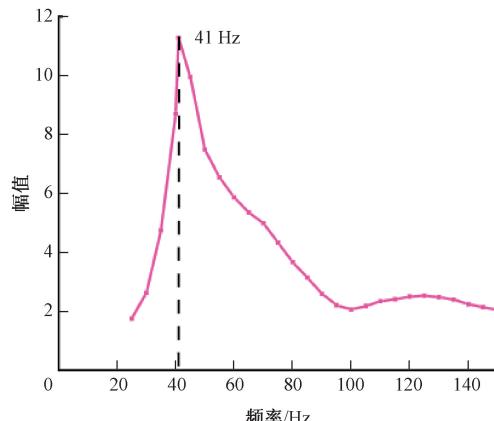


图10 扫频实验结果

Fig. 10 Results of swept frequency experiment

为揭示GA加速度计的灵敏度与频率之间的关系,功率放大器控制振动台输出加速度大小,信号发生器控制输出频率步进增大,根据Z轴的运动速度确定加速度,正弦振动中的加速度与频率和速度的关系式为:

$$a = 2\pi f v \quad (12)$$

式中: a 为加速度; f 为频率; v 为速度。

实验先测试了加速度大小为1g(9.8 m/s^2)时的信号输出,根据上述公式计算出振动台输出1g加速度时不同频率在Z轴上应有的运动速度 v ,通过商业三轴速度传感器(WTVB02-485)中Z轴方向的速度保证振动台的输出效果。将商业传感器通过变径螺丝安装在振动台台面,再将GA加速度计连接在该传感器上,保证两个传感器在Z轴方向的响应均是来自同一信号条件下的振动。灵敏度定义为输出电压变化的幅值大小 ΔU 与加速度的比值,即 $S = \Delta U/a$ 如图11所示为1g加速度下不同频率对应的灵敏度。可以看出,传感器的灵敏度相对稳定,均在 3 mV/g 以上,高于先前报道的灵敏度 2.6 mV/g ^[13]。且在40 Hz左右时的灵敏度最大,分析其原因是该频率接近GA加速度计的固有频率,传感器产生了较为剧烈的振动且振动幅值较大,因此,GA的电阻变化较大,电压变化的幅值也大,故此时的灵敏度达到最大峰值。同时,这也再一次确认了传感器的固有频率所在区间。

在得到1g加速度下测试的灵敏度响应后,根据上述实验方法,改变振动台的输出条件,分别对2g、3g、4g加速度下的灵敏度响应进行实验测试,得到传感器在不同

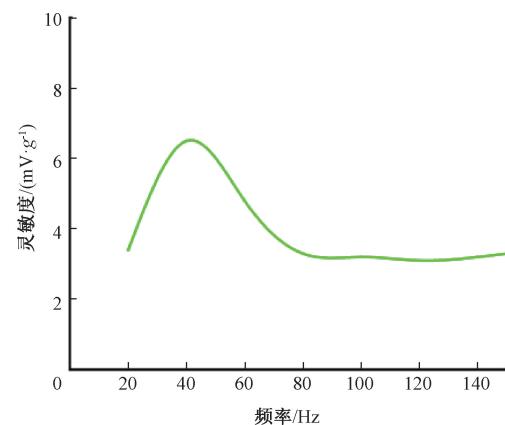


图11 1g 加速度下的灵敏度输出

Fig. 11 Sensitivity output of GA accelerometer under 1g acceleration

频率下的灵敏度随加速度值变化的关系曲线。测试结果表明,电压变化幅值的大小随着加速度值的变大而变大。图12为传感器分别在40、80、120 Hz振动频率下的输出与加速度的关系曲线,从中可以看出传感器输出与加速度的大小表现出一定的线性关系。随着频率值的增加,对应的灵敏度越低(线性斜率越小)。这一结果也符合幅频特性,接近固有频率,响应更为激烈,信号输出与输入的斜率也就越大;在远离固有频率,响应趋于平缓,信号输出与输入的斜率也就越小。

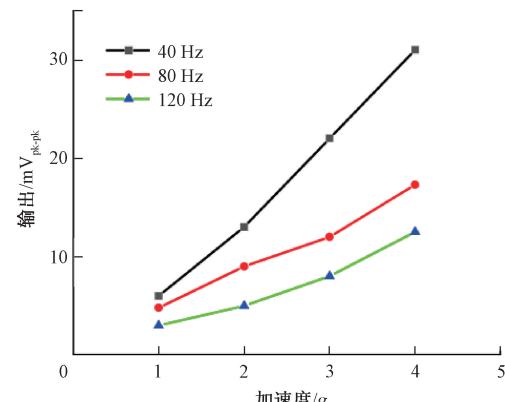


图12 输出与加速度线性关系

Fig. 12 Linear relationship between output and acceleration of GA accelerometer

此外,为了解频域信号的响应特性,将商业加速度计与GA加速度计进行振动监测的对比实验,得出对频率测试结果的精度。设置振动台的输出效果,随机模拟不同频率下的低幅振动场景,对比两者采集到的结果。对比测试中,信号发生器以10 Hz为步长,测试了20~150 Hz的振动响应,以输出频率为基准,结合GA加速度计与商业传感器的采集结果的偏差得出两者的误差率,结果如表2所示。

表 2 对比测试结果统计
Table 2 Comparison of test results

振动台		商业加速度计 (wtvb02-485)		GA 加速度计	
振动频率 /Hz	振幅 /mm	测量频率 /Hz	误差率 /%	测量频率 /Hz	误差率 /%
20	1.00	20.3	1.50	20.089	0.44
30	0.50	30.8	2.67	29.948	-0.17
40	0.40	40.3	0.75	40.148	0.37
50	0.13	51.1	2.20	50.000	0.00
60	0.14	60.9	1.50	60.059	0.10
70	0.10	72.8	4.00	69.824	-0.25
80	0.10	83.3	4.13	80.078	0.10
90	0.10	91.4	1.56	89.844	-0.17
100	0.10	102.9	2.90	100.098	0.10
110	0.07	114.1	3.73	109.863	-0.12
120	0.10	126.1	5.08	120.117	0.10
130	0.20	137.1	5.46	129.883	-0.09
140	0.07	142.4	1.71	139.974	-0.02
150	0.08	152.4	1.60	150.391	0.26

根据表 2 中的数据可知, 在 20~150 Hz 频率区间的测试中, GA 加速度计的测试结果均优于商业传感器。同时, 在测试范围内, GA 加速度计的误差均明显低于商业加速度计, 尤其是在 70~150 Hz 区间最为明显。商业传感器的误差率较高, 在 130 Hz 时最大误差率达到了 5.46%, 高出 GA 加速度计最大误差率一个数量级; 其最小误差率出现在 40 Hz 下的 0.75%, 但仍高于 GA 加速度计的测试最高误差率。因此, GA 加速度计在 20~150 Hz 范围具有优异的动态响应特性。

3.3 振动监测性能分析

为剖析 GA 加速度计的响应特性, 测试其频率变化的响应能力以及在电机工作状态监测方面的效果, 使用振动台输出 50 Hz 的振动信号来模拟电机工作时的振动状态, 分别模拟了电机启停与电机变频工作的状态进行监测。如图 13 和 14 所示, 当工作状态发生变化, 其时域信号表现出明显差异, 对信号进行短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT) 得到信号时频图, 可直观看到不同时间段内工作状态, 表明 GA 加

速度计信号输出稳定。当输出信号由 50 Hz 增加到 53.6 Hz, 不仅在时域图上有明显变化, 在时频图上也可看到后半段频率值与前半段相比有明显的增加。可以看出 GA 加速度计对变频的响应能力同样具有良好的输出特性。此外, 在 50 Hz 监测时, 上位机输出与精度测试中的结果相符, 相对误差率一致。

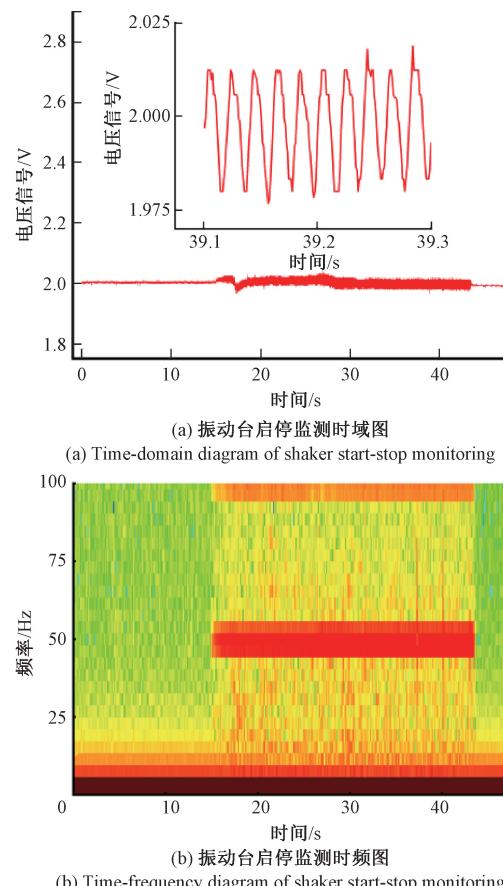
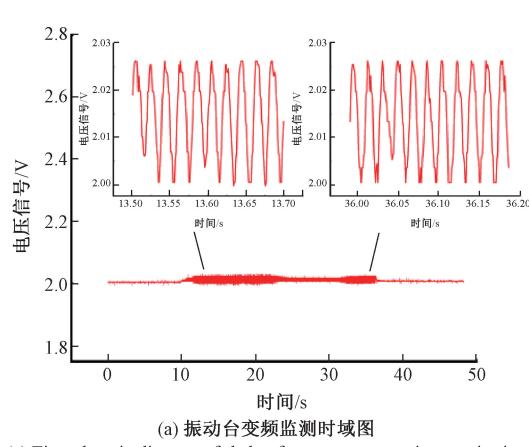
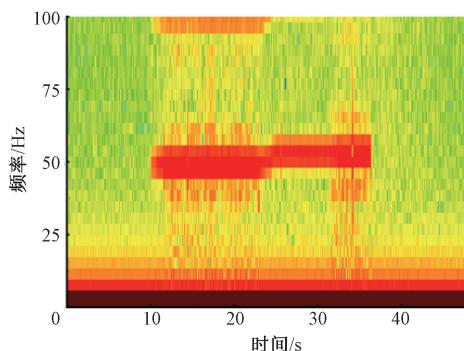


图 13 在 50 Hz 时对振动台启停监测
Fig. 13 Monitoring the start-stop behavior of shaker at 50 Hz



(a) Time-domain diagram of shaker frequency conversion monitoring



(b) 振动台变频监测时频图

(b) Time-frequency diagram of shaker frequency conversion monitoring

图 14 在 50~53.6 Hz 区间对振动台的变频监测

Fig. 14 Variable-frequency monitoring of shaker in the range of 50~53.6 Hz

3.4 实际应用

为了进一步验证 GA 加速度计的响应特性,在真空泵上对其工作时的状态分别进行了 3 次振动测试。根据相关国家标准(泵的振动测量与评价方法, GB/T 29531—2013)^[22],运行转速<600 r/min 时,非旋转部件振动的双振幅不超过 0.13 mm,符合低频低幅特点。将 GA 加速度计安装在真空泵上,真空泵负载工作,振动产生。图 15 为采集数据做 FFT 处理得到相应的频谱图,可以看出在 48.8 Hz 左右出现最大振动能量值,记录本次测试的结果为 48.8 Hz,随后又在相同条件下测试了 2 次,3 次结果均在 48.8 Hz 出现最大振动能量值,说明真空泵工作时产生的振动为 48.8 Hz,接近根据电机铭牌计算出的振动频率结果 46.7 Hz,再次证明测试结果的可靠性,也证明了该 GA 加速度计在频率测试上具有良好的重复性。在随后的测试中,对电机进行突然断电使其骤停,随后通电重启,得到相应的信号如图 16 所示,时域图中工作状态下的信号相对稳定,机器重启阶段出现了

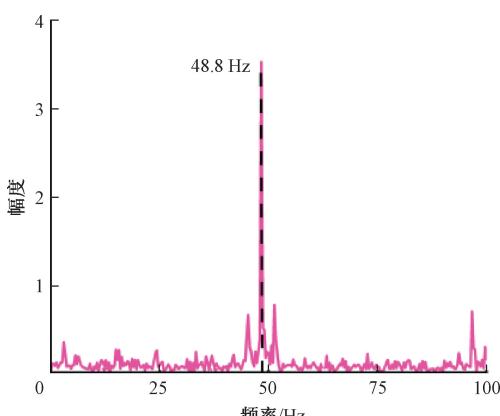
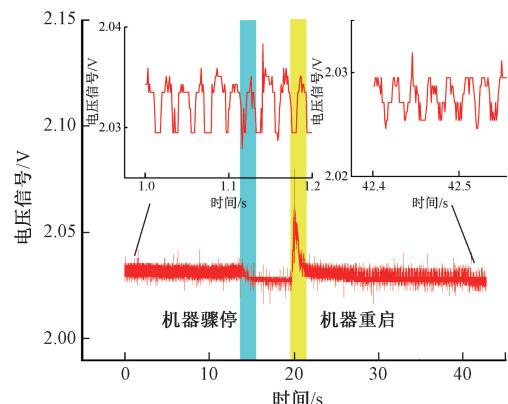


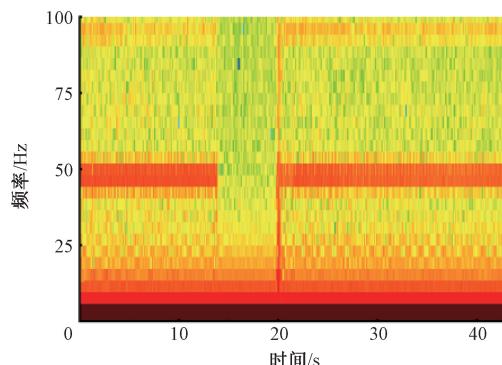
图 15 对真空泵振动监测的频谱图

(Fig. 15 Spectrum on vibration monitoring for vacuum pump)



(a) 真空泵监测时域图

(a) Time-domain diagram of vacuum pump monitoring



(b) 真空泵监测时频图

(b) Time-frequency diagram of vacuum pump monitoring

图 16 对真空泵骤停与重启状态的监测

Fig. 16 Monitoring of stop and restart states of vacuum pump

异常信号,这是因为重启时机身晃动导致。而时频图也反映出了相应的工作状态,对异常信号也有明显的表现,证明了 GA 加速度计可用于电机运行状态的监测与故障诊断。

4 结 论

本研究为揭示 GA 加速计对低频低幅振动的响应特性,分析了 GA 材料的力学性能,设计了一款 GA 加速度计,通过振动台做振动试验获得其低频低幅的振动响应特性,并以真空泵上电机振动监测为验证手段,成功实现了对电机振动频率的监测。结果表明,该加速度计具有较高的灵敏度和线性度。在对比测试中发现,该加速度计响应信号的频域特性显著优于商业传感器,且该加速度计也表现出较高的频域精度和稳定的重复性。总之,实验结果证实所设计组装的 GA 加速度计在振动变化响应能力方面展现出优异的性能,其在设备状态检测、故障诊断等方面具有广阔的应用潜力。

参考文献

- [1] BABATAIN W, BHATTACHARJEE S, HUSSAIN A M, et al. Acceleration sensors: Sensing mechanisms, emerging fabrication strategies, materials, and applications [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3(2): 504-531.
- [2] 乔诗翔, 李豪杰, 于航, 等. 高低温环境对三轴高 g 值加速度传感器灵敏度变化影响研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(5): 240-248.
- QIAO SH X, LI H J, YU H, et al. Research on the influence of high and low temperature environment on the sensitivity change of three-axis high- g accelerometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(5): 240-248.
- [3] 张宇, 许高斌, 尹盛华, 等. 多梁凹槽高 g 值加速度计的设计与分析 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(4): 90-97.
- ZHANG Y, XU G B, YIN SH H, et al. Design and analysis of multi-beam groove high g -value accelerometer [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(4): 90-97.
- [4] 王毓婷, 石云波, 赵锐, 等. 一种高 g 值面内加速度传感器的设计与仿真 [J]. *电子测量技术*, 2023, 46(5): 192-196.
- WANG Y T, SHI Y B, ZHAO R, et al. Design and simulation of a high- g in-plane acceleration sensor [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(5): 192-196.
- [5] ASUTKAR S, KORRAPATI M, SINGH S, et al. Performance evaluation of post-curing method for sensitivity enhancement of elastomer vibration sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 334:113313.
- [6] CHEN Y, LI G L, MU W J, et al. Nonenzymatic sweat wearable uric acid sensor based on N-doped reduced graphene oxide/Au dual aerogels [J]. *Analytical Chemistry*, 2023, 95(7): 3864-3872.
- [7] 王保民, 李义云, 陈天弟, 等. 石墨烯气凝胶全柔性触觉传感器的设计、组装及性能 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2023, 53(4): 499-508.
- WANG B M, LI Y Y, CHEN T D, et al. Design, assembly, and property of a graphene aerogel-based fully flexible tactile sensor [J]. *Scientia Sinica (Technological)*, 2023, 53(4): 499-508.
- [8] WANG Z B, XIAO ZH J, MEI J, et al. Graphene aerogel-based vibration sensor with high sensitivity and wide frequency response range [J]. *Nano Research*, 2023, 16(8): 11342-11349.
- [9] XIANG Q X, ZHANG H, LIU ZH Y, et al. Engineered structural carbon aerogel based on bacterial cellulose/chitosan and graphene oxide/graphene for multifunctional piezoresistive sensor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 480:147825.
- [10] 刘雨富. 基于石墨烯气凝胶压阻效应的柔性三维力触觉传感器研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- LIU Y F. Flexible three-dimensional force tactile sensor based on graphene aerogel piezoresistive effect [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [11] YANG G CH, LEI S Q, CHANG K, et al. Generalized strategy to construct multifunctional inorganic nanomaterials/silicone rubber composite aerogels: Taking CNTs as an example for smart sensing [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 489:151378.
- [12] QIU L, COSKUN M B, TANG Y, et al. Ultrafast dynamic piezoresistive response of graphene-based cellular elastomers [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(1): 194-200.
- [13] COSKUN M B, QIU L, AREFIN M S, et al. Detecting subtle vibrations using graphene-based cellular elastomers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(13): 11345-11349.
- [14] LIU SH B, WU X, ZHANG D D, et al. Ultrafast dynamic pressure sensors based on graphene hybrid structure [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(28): 24148-24154.
- [15] CHEN T D, YANG G CH, WANG J Q, et al. Surfactant stabilized GO liquid crystal for constructing double-walled honeycomb-like GO aerogel with supersensitivity for fingertip pulse monitoring [J]. *Carbon*, 2021, 184: 53-63.
- [16] ZENG ZH H, WU N, YANG W D, et al. Sustainable-macromolecule-assisted preparation of cross-linked, ultralight, flexible graphene aerogel sensors toward low-frequency strain/pressure to high-frequency vibration sensing [J]. *Small*, 2022, 18(24): 2202047.
- [17] YANG G CH, QIN X L, CHEN T D, et al. Ultralight, superelastic pure graphene aerogel for piezoresistive sensing application [J]. *Journal of Materials Science*,

2023, 58(2): 850-863.

- [18] WANG Z B, ZHOU W Y, XIAO ZH J, et al. A high-temperature accelerometer with excellent performance based on the improved graphene aerogel [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(15): 19337-19348.
- [19] WANG Z B, XIAO ZH J, MEI J, et al. Graphene aerogel-based vibration sensor with high sensitivity and wide frequency response range [J]. Nano Research, 2023, 16(8): 11342-11349.
- [20] 王子波. 石墨烯气凝胶基弹性体的力学性质和振动传感研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2023.
- WANG Z B. Mechanical properties and vibration sensing of graphene aerogel-based elastomers [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [21] 蒋宇飞, 陶传义, 李梦影, 等. 基于光纤光栅的紧凑型高频振动传感器的设计与应用[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 252-260.
- JIANG Y F, TAO CH Y, LI M Y, et al. Design and application of compact high-frequency vibration sensor based on fiber bragg grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 252-260.
- [22] 全国泵标准化技术委员会(SAC/TC 211). 泵的振动测量与评价方法: GB/T 29531—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- National Technical Committee 211 on pumps of Standardization Administration of China. Methods of measuring and evaluating vibration of pumps: GB/T 29531—2013 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

作者简介



王保民,1996 年于辽宁工程技术大学获得学士学位,2003 年于兰州理工大学获得硕士学位,2009 年于兰州理工大学获得博士学位,现为兰州理工大学教授,硕士生导师,主要研究方向为摩擦与润滑、工业机器人、传感器等。

Email: wbm2007@163.com

Wang Baomin received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 1996, his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Lanzhou University of Technology in 2003 and 2009, respectively. He is currently a full professor and master's supervisor at Lanzhou University of Technology. His main research interests include friction and lubrication, industrial robotics, and sensors.



王金清(通信作者),1999 年于西北师范大学获得学士学位,2004 年于中国科学院兰州化学物理研究所获得博士学位,现为中国科学院兰州化学物理研究所研究员、博士生导师,主要研究方向为功能润滑材料与技术、各种传感材料与柔性应变传感器件研发等。

E-mail: jqwang@licp.acs.cn

Wang Jinqing (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northwest Normal University in 1999, and his Ph. D. degree from Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences in 2004. He is currently a research professor and doctoral supervisor at the Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences. His research interests include functional lubricating materials and technologies, various sensing materials, and the development of flexible strain sensor devices.