

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311455

用于原子干涉重力仪的隔振平台模型辨识及验证*

梁昌文^{1,2,3}, 马笑笑^{1,2}, 朱凌晓^{1,2}, 颜树华^{1,2}, 杨俊^{1,2}

(1. 国防科技大学智能科学学院 长沙 410073; 2. 国防科技大学量子信息学科交叉中心 长沙 410073;
3. 中国人民解放军 96783 部队 怀化 418000)

摘要:负刚度隔振平台广泛应用于原子干涉重力仪等量子精密测量设备,其低频特性和环境自适应能力对设备性能影响较大,为此本文对典型商用负刚度隔振平台进行了半主动改造,以进一步增强隔振平台综合性能。首先从理论上对力-位移关系做了简要分析,着重探讨了负刚度特性和承载能力的决定因素;然后建立并分析了系统运动模型,分别在时域和频域对模型参数做了精准辨识,根据测试结果对半主动隔振做了仿真分析,并采用贝叶斯优化算法快速找到最优控制参数;最后在真实系统上进一步验证了该方案,结果表明半主动隔振可将系统的低频共振峰衰减 357 倍,系统在低于 0.3 Hz 和高于 8 Hz 的频段能起到良好的隔振效果,超低频隔振性能有显著提升,文中所提方案可广泛应用于量子精密测量相关隔振设备。

关键词: 原子干涉;重力仪;隔振;模型辨识;贝叶斯优化

中图分类号: TH823 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Model identification and evaluation of vibration isolation platform for atomic interference gravimeter

Liang Changwen^{1,2,3}, Ma Xiaoxiao^{1,2}, Zhu Lingxiao^{1,2}, Yan Shuhua^{1,2}, Yang Jun^{1,2}

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Interdisciplinary Center for Quantum Information, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. 96783 Unit of PLA, Huaihua 418000, China)

Abstract: Negative stiffness vibration isolation platform (NSVIP) is widely used in quantum precision measurement equipment such as atomic interference gravimeter. Its performance is significantly influenced by low-frequency performance and environmental adaptability of the isolator. To improve overall performance of the vibration isolator, this research performs a semi-active transformation of a standard commercial NSVIP. Firstly, the force-displacement relationship is analyzed theoretically, focusing on the determinants of negative stiffness characteristics and bearing capacity. Then, the motion model is formulated and analyzed, and the parameters are accurately identified in the time and frequency domain, respectively. Moreover, the semi-active vibration isolation (SAVI) is simulated and analyzed, and the Bayesian optimization is used to quickly determine the optimal control parameters. Finally, the scheme is further verified on the actual system. The result shows that SAVI can attenuate the low-frequency resonance peak by 357 times. The system can achieve good vibration isolation effects in the frequency band below 0.3 Hz and above 8 Hz. The low-frequency vibration isolation performance is significantly improved. The proposed solution can be widely used in related vibration isolation equipment for quantum precision measurement.

Keywords: atomic interference; gravimeter; vibration isolation; model identification; Bayesian optimization

0 引言

基于负刚度的隔振结构具有超低的固有频率和较高

的承载能力,非常适合隔离 0.01~100 Hz 以内的超低频振动,被广泛应用于引力波探测^[1-3]、原子干涉重力仪^[4-10]等量子精密测量设备的超低频隔振。国内外不少学者都对超低频隔振机构做了分析和测试,早在 1999

收稿日期:2023-05-20 Received Date: 2023-05-20

* 基金项目:国家自然科学基金(12004428)、湖南省自然科学基金优秀青年项目(2021JJ20047)资助

年,朱棣文小组的 Hensley 等^[4]就利用负反馈控制设计了半主动隔振系统,闭环后固有频率可达 0.033 Hz,对 0.1~20 Hz 的振动衰减 300 倍,可满足原子干涉精密测量系统的超低频隔振需求,但该系统使用的是悬挂弹簧隔振结构,体积较大且结构复杂,仅适用于实验室环境下的超低频隔振。2010 年,Freier^[8]在朱棣文工作的基础上,对商用负刚度隔振平台进行了半主动改造,使用两个音圈电机作为负反馈执行器,该平台应用于冷原子干涉绝对重力仪后使重力测量不确定度从 7 mGal 降低至 70 μ Gal,但文献中并未对负刚度隔振机理做深入探讨,且该隔振系统基于经典控制论,控制参数相对固定,容易受到外部环境的干扰和影响。同年,王文超等^[9]对冷原子干涉仪中的半主动隔振系统进行了建模和仿真,分析结果表明隔振系统在 0.1、0.2、0.3 Hz 处的传递率分别为 20%、1%、0.01%,但其仿真信号为单一的简谐激励,对于真实的地面振动还有待于进一步验证。Yang 等^[11]研究了具有负刚度机构的非线性隔振系统的动力学和功率流特性,推导了控制系统非线性动力学的数学方程,并采用平均法得到系统在谐波激励下的频率响应函数。Li 等^[12]提出了一种可变负刚度的磁流变弹性体隔振装置,通过数学变换得到了负刚度与装置性能的关系,并进一步分析了在小振幅简谐激励下的振动响应。Hao 等^[13]提出了一种具有稳定准零刚度的单自由度几何非线性振荡器,并使用扩展的平均法对结构参数进行了优化,最后通过数值模拟实验发现了系统中存在的混沌运动和多解共存等复杂动力学现象。

以上文献为分析超低频隔振机构提供了很好的思路和方法,但目前还很少有关对商用负刚度隔振平台进行半主动改造的理论研究和测试方法。本文以商用被动隔振平台为研究对象,对其负刚度隔振特性做了理论推导,并对半主动隔振控制做了仿真分析,然后以原子干涉重力仪重力测量不确定度为优化目标,使用贝叶斯优化算法对控制参数做了优化整定,最后在真实系统上验证了该方案的可行性。

1 结构分析及参数辨识

1.1 隔振平台半主动改造

MinusK 公司生产的商用隔振平台^[14]性能非常出众,竖直方向出厂固有频率可达 0.5 Hz,对 1 Hz 以上的振动隔振效果非常显著,其内部主要结构为正负刚度并联机构,如图 1(a)所示。两组刚性波片通过挠性铰链与负载相连,其外侧受水平预紧弹簧的作用且只能左右移动,为保证两组波片水平预紧力大小一致,右侧波片直接与壳体相连。刚度恒定的承载弹簧位于负载下部,主要起到提高隔振平台承载能力的作用,在不考虑水平隔振器的

情况下,负载在平衡位置做微幅往复运动。为进一步增强其隔振性能,对该隔振平台进行了半主动改造,设计并加工了附属配件以便在其内部中心对称的位置加装两个音圈电机,作为主动控制的末端执行器。负载的振动信号由商用加速度计(Nanometrics Titan)采集,信号经控制器处理后转换为电压控制信号并传递至压控电流源(voltage control current source, VCCS),输出与控制电压等比例的控制电流,进而控制音圈电机完成对负载振动的反馈抑制。

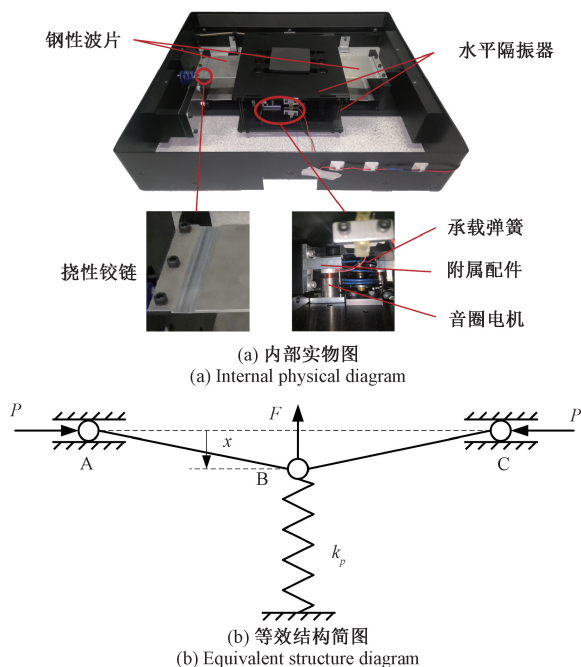


图1 半主动隔振平台内部实物图及等效结构简图
Fig. 1 Internal physical diagram and equivalent structure diagram of the semi-active vibration isolation platform

1.2 隔振平台刚度特性分析

相对正刚度而言,负刚度就是回复力跟变形量成反比关系,通常和正刚度并联使用,以便在不降低承载能力的条件下,使系统获得一个较低的刚度,提高隔振性能,下面从理论上对其刚度特性做简要分析。

假设图 1(b)中 B 点(负载)在平衡位置做往复振动,所受回复力为 F ,方向与 B 点运动方向相反,始终指向平衡位置,B 点竖直方向位移为 x ,承载弹簧预压缩量为 x_0 ,对 B 点做受力分析可得回复力 F 的表达式:

$$F = F_p + F_n = k_p(x + x_0) - Px / \sqrt{L^2 - x^2} \quad (1)$$

式中: F_p 为承载弹簧对负载的作用力, k_p 为承载弹簧弹性系数, F_n 为两组压杆对负载的作用力, P 为预紧力, L 为杆长, x_0 为弹簧预压缩量。

假设 $L=0.2$ m, $k_p=100$ N/m,则不同参数下的力-位移关系如图 2 所示。由图 2(a)可以看出,当负载在平衡

位置做微幅振动时,系统表现出正刚度或准零刚度特性,可近似等效为低刚度的线性弹簧,且预紧力越大,系统刚度越小,该区域为隔振平台的正常工作区。当振幅较大时,负载回复力与位移呈负相关,表现出典型的负刚度特性,且预紧力越大,负刚度特性越明显。在正负刚度过度区,系统呈现非线性特性,状态不稳定。实际工作时需要根据承载弹簧刚度及系统状态适时调整预紧力,过大会使平衡位置处的线性工作区变小,系统线性工作范围变窄,甚至整个系统都呈现负刚度特性,系统不稳定且起不到隔振作用,过小则平衡位置处的刚度过大,系统固有频率增大,超低频隔振作用弱化。

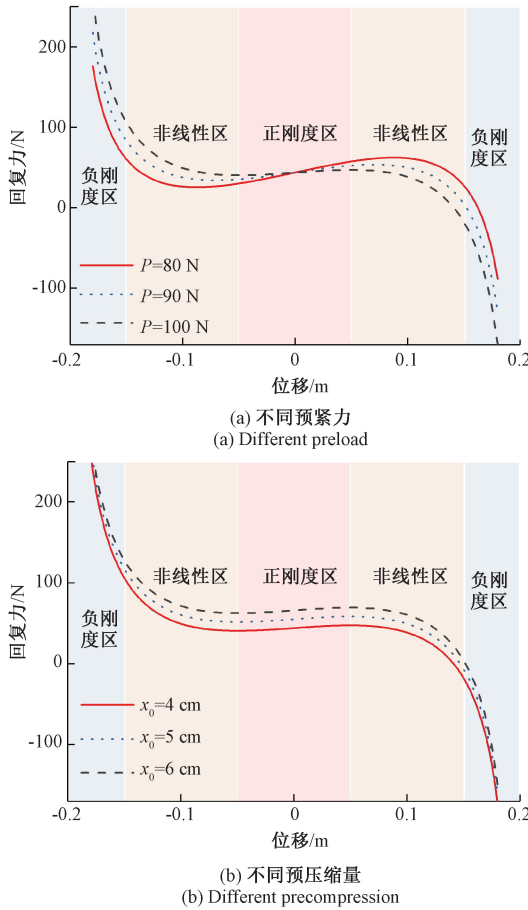


图2 不同参数下的力-位移关系

Fig. 2 Force-displacement relationship under different parameters

当 $P = 100 \text{ N}$ 时,不同预压缩量下的力-位移关系如图2(b)所示,可以看出,预压缩量直接影响系统的承载能力,预压缩量越大,系统承载能力越强。实际应用中需要根据负载综合调整预紧力和预压缩量的大小,一方面需要调整预紧力使系统在工作区呈现接近于零的正刚度,同时又能保证系统能容纳负载可能的变化范围;另一方面要适当调整预压缩量的大小以适应不同重量的负载。

1.3 运动模型分析

由图2可知,当预紧力固定不变且负载在平衡位置做微幅振动时,平台可近似为一刚度极小的线性弹簧,系统运动简图如图3所示,其中 k 为系统等效刚度, c 为系统等效阻尼, m 为系统负载, $f(t)$ 为音圈电机施加在负载上的作用力,负载在竖直方向的位移为 x ,地面在竖直方向的振动位移为 y 。

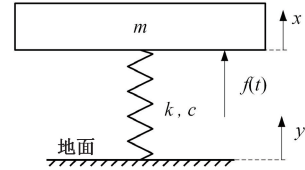


图3 半主动隔振平台等效运动模型

Fig. 3 Equivalent motion model of semi-active vibration isolation platform

当忽略地面振动时,系统只有唯一的输入 $f(t)$,运动微分方程为:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) + c\dot{x}(t) = f(t) \quad (2)$$

拉氏变换为:

$$\ddot{X}(s) = K_m G_1(s) F(s) \quad (3)$$

式中: $G_1(s) = s^2 / (s^2 + 2\xi_0\omega_0 s + \omega_0^2)$ 为作用力至负载加速度的传递函数, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ 为系统等效固有频率, $\xi_0 = c / (2m\omega_0)$ 为系统等效阻尼, $K_m = 1/m$ 为系统负载比例系数。同样,若忽略作用力 $f(t)$,则系统只有唯一的输入 y ,对应运动微分方程为:

$$m\ddot{x} + k(x - y) + c(\dot{x} - \dot{y}) = 0 \quad (4)$$

拉氏变换为:

$$\ddot{X}(s) = G_2(s) Y(s) \quad (5)$$

式中: $G_2(s) = (2\xi_0\omega_0 s + \omega_0^2) / (s^2 + 2\xi_0\omega_0 s + \omega_0^2)$ 为地面振动加速度至负载振动加速度的传递函数,由式(2)~(5)可知,影响系统振动特性的主要参数为 ω_0 、 ξ_0 ,这也是需要进行辨识的两个主要参数。

1.4 系统参数辨识

为辨识系统参数,设计了如图4所示开环测试方案,激励信号依次经过 VCCS、音圈电机、隔振平台对负载进行激励,负载振动加速度信号由加速度计实时采集,示波器(RIGOL MSO2302A)同步采集输入信号和加速度信号。



图4 开环测试方案

Fig. 4 Open loop test scheme

首先利用时域阶跃响应法辨识系统低频参数,根据各元件数据手册,VCCS 比例系数为 $K_{vc}=0.2\text{ A/V}$,音圈电机输出系数为 $K_{vo}=8.5\text{ N/A}$,加速度计灵敏度 $K_s=8.16\text{ V/(m/s}^2\text{)}$,其传递函数 $K_{acc}(s)$ 各参数如表 1 所示,在低频测试中,可近似认为加速度计为纯比例环节,设激励信号为 $V(s)$,系统输出为 $U(s)$,则系统输入输出存在如下关系:

$$U(s)=K_0G_1(s)V(s)\tag{6}$$

式中: $K_0=2K_{vc}K_{vo}K_m$, 因子 2 源于音圈电机数量为 2。

表 1 加速度计传递函数 $K_{acc}(s)$

Table 1 Transfer function $K_{acc}(s)$ of accelerometer			
名称	符号	值	单位
零点	z	-515	rad/s
		-977±328i	
极点	p_n	-1 486±2 512i	rad/s
		-5 736±4 946i	
归一化因子	κ	$1.007\ 7\times10^{18}$	$(\text{rad/s})^5$

系统阶跃响应测试结果如图 5 所示,其中实线所示的拟合曲线为式(6)的时域表达式,各参数拟合结果为 $K_0=0.339\ 1$ 、 $\omega_0=4.941$ 、 $\xi_0=0.019\ 6$ 。系统固有频率和共振峰幅值都略高于出厂值,被动隔振性能有所下降,可能由于改造过程中其内部结构的变动导致。

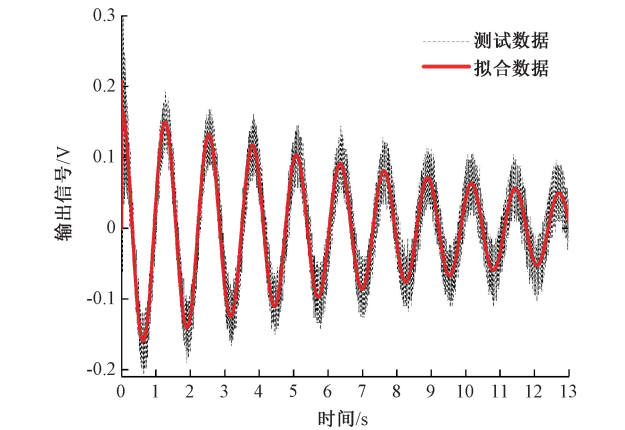


图 5 系统阶跃响应

Fig. 5 System step response

为进一步测试高频特性并验证时域测试结果,对系统做简谐扫频测试,使用信号发生器(Tektronix, DPO2024)作为信号源,产生 0.1~200 Hz 的正弦信号对系统进行激励,系统幅频响应如图 6 中圆点所示。可以看出,系统在低频处的固有频率为 0.8 Hz,与阶跃响应吻合较好,但在 100 Hz 处有一个共振峰,与理论分析不符。

因此,在式(6)的基础上进一步考虑表 1 所示的加速度计传递函数:

$$K_{acc}(s)=\frac{\kappa(s-z)}{\prod_n(s-p_n)}\tag{7}$$

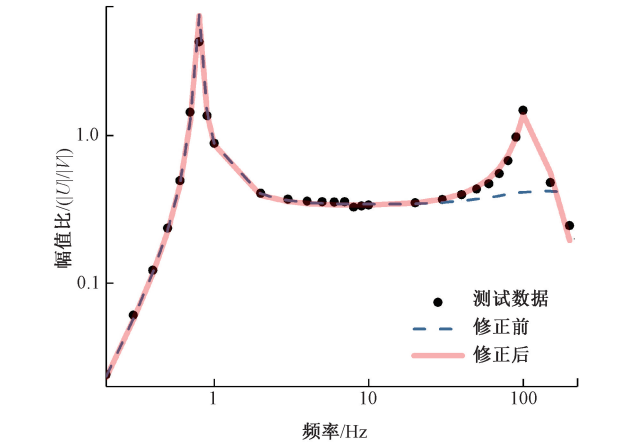


图 6 系统幅频响应

Fig. 6 System amplitude-frequency response

则系统总的幅频响应如图 6 中虚线所示,在小于 30 Hz 频段内与测试结果吻合较好,且高频处稍有上升,但 30~200 Hz 频段内依然与测试结果差异较大。该处的共振峰可能源于刚性波片的高阶振动模式和音圈电机组件的安装误差,因此推测系统在高频处仍存在一个二阶振荡环节,假设其传递函数为:

$$H_2(s)=\frac{K_2}{s^2+2\xi_2\omega_2s+\omega_2^2}\tag{8}$$

则系统总的传递函数可表示为:

$$G(s)=K_0G_1(s)H_2(s)K_{acc}(s)\tag{9}$$

利用式(9)对测试结果进行拟合,可以得到 $H_2(s)$ 中的各参数为 $K_2=5.146\times10^5$ 、 $\omega_2=722.9$ 、 $\xi_2=0.093\ 5$,添加二阶振荡修正后的理论曲线如图 6 中实线所示,与测试结果高度吻合。

2 基于贝叶斯优化的半主动隔振控制仿真分析

原子干涉重力仪的拉曼光反射镜是隔振平台的主要负载,其低频振动对重力仪测量精度影响很大^[15],过大的振动噪声甚至会完全淹没干涉条纹,导致无法完成重力测量。反射镜振动噪声对干涉仪输出相位不确定度的影响可表示如下^[16]:

$$(\sigma_{\text{vib}}^{\text{rms}})^2=\int_0^\infty|H(\omega)|^2\frac{k_{\text{eff}}^2}{\omega^4}S_a(\omega)\text{d}\omega\tag{10}$$

$$H(\omega) = \frac{4\Omega_R \omega i}{\omega^2 - \Omega_R^2} \cdot \sin\left(\omega \frac{T + 2\tau}{2}\right) \cdot \left[\cos\left(\omega \frac{T + 2\tau}{2}\right) + \frac{\Omega_R}{\omega} \sin\left(\omega \frac{T}{2}\right) \right] \quad (11)$$

式中: k_{eff} 为拉曼光有效波矢, 对于波长 $\lambda = 780 \text{ nm}$ 的拉曼光 $k_{\text{eff}} \approx 4\pi/\lambda = 1.6106 \times 10^7 \text{ nm}^{-1}$, $S_a(\omega)$ 为反射镜振动功率谱, $H(\omega)$ 为原子干涉仪相位传递函数, Ω_R 为广义拉比频率, 对于 π 脉冲 $\Omega_R \tau = \pi$, τ 为拉曼脉冲宽度, T 为原子自由演化时间。原子干涉仪重力测量不确定度和相位不确定度的关系为^[17]:

$$\sigma_g = \sigma_{\text{vib}}^{\text{rms}} / (k_{\text{eff}} T^2) \quad (12)$$

原子干涉重力仪振动控制的目的即为最大限度地减小 σ_g 。前文已经对系统中各环节参数做了测试和辨识, 现在进一步对半主动隔振控制进行仿真分析, 以评估半主动改造的可行性和有效性, 控制策略采用传统的 PID 控制。

针对原子干涉重力仪中的超低频微幅振动, 为评估隔振的有效性, 需要计算由隔振平台负载振动信号产生的 σ_g , 由式 (10) ~ (12) 可知, 评估 σ_g 需要较长的采集时间以获取能反映低频振动的功率谱, 从而导致 PID 参数的整定非常困难, 并且当隔振平台应用环境发生变化时, 还需要对控制参数重新整定, 降低了其环境适应能力。

为解决上述问题, 本文采用贝叶斯优化算法对 PID 控制器的参数进行优化整定, 贝叶斯算法的中心思想是贝叶斯更新^[18], 通过引入观测数据实现模型参数更新, 使模型预测更加准确, 相比传统的网格搜索和随机搜索, 可通过较少的迭代实现最优参数预测^[19], 极大提高优化效率。算法中的概率代理模型采用高斯模型, 采集函数为期望增强 (expectation enhance, EI), 优化目标为 σ_g , 式 (11) 中各参数取典型实验参数 $T = 90 \text{ ms}$, $\tau = 11 \text{ } \mu\text{s}$, 地面振动采用本实验室采集的真实地面振动信号, 每次迭代采集 30 s 时域信号用来计算目标函数。当满足以下两个条件即终止迭代: 1) 迭代次数达到 25 次; 2) 连续 8 次迭代历史最优值未能进一步改善。

贝叶斯优化过程仿真结果如图 7 所示, 每轮迭代开始时, 贝叶斯模型根据采集函数预测出一组可能出现最优值的 PID 参数 (采样参数), 及其对应的系统输出 (图中星号), 将该组 PID 参数代入仿真模型后运行一次仿真实验并计算目标函数 σ_g , 得到本次迭代的观测值 (图中圆圈), 优化算法根据本次采样参数和观测值更新高斯代理模型并进入下一轮迭代, 历史最优观测值由图中实线表示。优化算法共迭代了 20 次, 总耗时 113.5 s, 可以看出贝叶斯优化速度非常快, 第 6 次迭代就已经非常接近全局最优, 第 13 次迭代后达到历史最优, 因此该算法可应用于控制参数的快速整定, 增强控制策略的鲁棒性, 提高隔振平台在不同应用环境下的自适应能力。

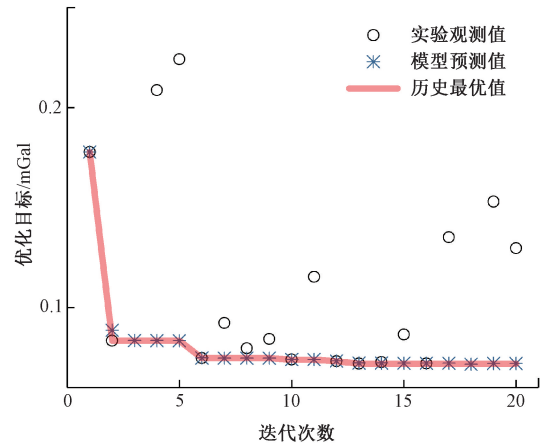


图 7 PID 参数贝叶斯优化过程

Fig. 7 Bayesian optimization process of PID parameters

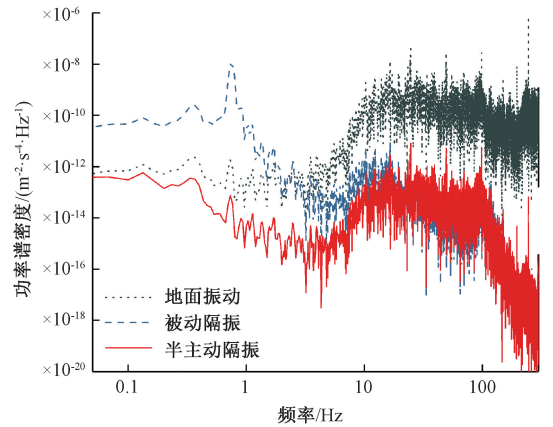


图 8 仿真环境下振动功率谱对比

Fig. 8 Comparison of vibration power spectrum density in simulation environment

仿真环境下的振动功率谱对比如图 8 所示, 其中点线为地面振动, 虚线为被动隔振后的负载振动, 实线为半主动隔振后的负载振动。可以看出上述 3 种情况在 0.8 Hz 和 100 Hz 处都有两个共振峰, 跟前文的测试实验是相吻合的, 其中被动隔振对 2 Hz 以上的振动能形成有效抑制, 但由于 0.8 Hz 共振峰过高, 低于 1.5 Hz 的振动反而被不同程度的放大, 半主动隔振则对全频段振动噪声都起到了很好的抑制作用, 其中 0.1 ~ 0.5 Hz 降低约 1 个数量级, 0.5 ~ 2.5 Hz 降低约 2 个数量级, 2.5 ~ 7 Hz 降低约 3 个数量级。另外, 相比被动隔振, 半主动隔振对 0.8 Hz 处的低频共振峰衰减近 6 个数量级, 隔振平台的低频隔振性能得到显著提升。将所得功率谱代入式 (10) ~ (12) 可得到地面振动、被动隔振、半主动隔振对应的重力测量不确定度分别为 0.96 mGal、7.55 mGal 和 72 μGal , 可见, 虽然被动隔振有效压制了大部分高频振动, 但低频振动恶化严重, 由于原子干涉仪相位传递函

数 $H(\omega)$ 的低通性,重力测量不确定度反而提高了近 8 倍。半主动隔振对全频段振动噪声的压制有效降低了干涉仪的测量不确定度,相比地面振动降低约 1 个量级,相比被动隔振降低 2 个量级。

为验证仿真结果,将上述贝叶斯算法在真实系统上做了进一步测试。负载振动传感器更换为可测得更低频信号的地震计(Güralp 3ESP,带宽 120~0.01 s),其输出的模拟信号与负载速度成正比,相比加速度计具有更高的信噪比。为获取更加准确的低频信号,每次迭代采集 5 min 的时域信号。优化过程与模型仿真较为一致,算法可快速找到最优控制参数,最终测试结果如图 9 所示。可以看出,系统共振峰由原来的 0.8 Hz 变为 0.7 Hz,这主要由于负载质量发生了变化,并且共振峰的幅值远高于仿真结果,这主要源于大量的外界干扰。各频段被动隔振和半主动隔振有不同的表现,其中 0.3 Hz 以下半主动隔振性能最佳,相比被动隔振衰减约 1.5 倍,相比地面衰减约 4.3 倍;0.3~1 Hz 覆盖了系统的共振频率,半主动隔振将该共振峰衰减了 3 个量级,约 357 倍,极大改善了被动隔振平台的低频性能,但由于过高的低频共振峰,该频段的振动仍高于地面;1~8 Hz 半主动隔振高于被动隔振,主要原因是控制器误差信号主要来源于高强度的低频振动,从而弱化了更高频段的隔振性能,且二者均高于地面振动,不能启到隔振作用;8 Hz 以上被动隔振低于半主动隔振,且都低于地面振动,隔振方式以被动隔振为主。综上所述,半主动隔振在 0.3~8 Hz 频段未能启到隔振作用,主要原因可能是平台改造过程中系统性能恶化较为严重,尤其是高强度低频共振峰的产生,极大增加了系统隔振难度。另外,经测试发现,除地面以外的其他振源,如大声说话、人员走动、空调运转等也给系统带来了

额外的振动噪声,增大了隔振难度。但单就系统本身而言,半主动隔振可显著改善系统低频性能,尤其对低频共振峰的衰减非常显著。可进一步推断,若能增大系统阻尼或设计具有较小低频共振峰的结构,则在全频段都将启到良好的隔振效果,这也是后续工作需着重研究的内容。

3 结 论

本文对典型的商用负刚度隔振平台进行了半主动改造,从理论分析、参数辨识、模型仿真、实验分析等方面对半主动隔振平台做了全面的分析和验证。理论分析表明,负刚度机构的等效固有频率与压杆预紧力密切相关,预紧力越大,固有频率越低,但线性工作区越窄。通过对平台运动模型和时频域测试结果进行分析,发现了一个潜在的二阶振荡环节,该环节可能源于刚性波片的高阶振动模态和音圈电机组件的安装误差,二阶修正后的模型与测试结果高度吻合。根据测试结果对半主动隔振做了仿真实验,并使用贝叶斯算法对隔振控制参数做了优化整定,仿真环境下半主动隔振可以有效压制平台低频共振峰,优化后的隔振平台将由地面振动引起的重力测量不确定度从 0.96 mGal 降低至 72 μ Gal。最后,在真实系统上进一步验证了上述方案,测试结果表明,优化算法可快速找到最优控制参数,与仿真过程较为吻合,为提高隔振平台的鲁棒性以适应复杂多变的应用环境提供了解决思路。但系统只能在低于 0.3 Hz 和高于 8 Hz 的频段启到较好的隔振作用,这可能源于平台改造对低频共振峰的恶化和其他振源的影响,但就平台本身而言,半主动隔振可将低频共振峰衰减 357 倍,极大改善系统超低频性能,为后续半主动隔振平台的设计和改造提供了思路,具有重要借鉴意义。

参考文献

- [1] GIAIME J, SAHA P, SHOEMAKER D, et al. A passive vibration isolation stack for LIGO: Design, modeling, and testing[J]. Review of Scientific Instruments, 1996, 67(1): 208-214.
- [2] CELLA G, SANNIBALE V, DESALVO R, et al. Monolithic geometric anti-spring blades [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2005, 540(2-3): 502-519.
- [3] DESALVO R. Passive, nonlinear, mechanical structures for seismic attenuation[J]. Journal of Computational and

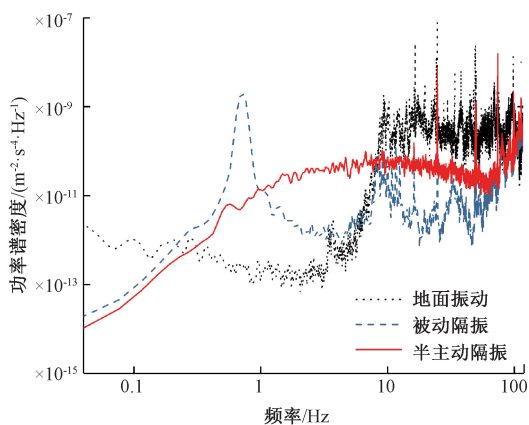


图9 真实系统下的振动功率谱对比

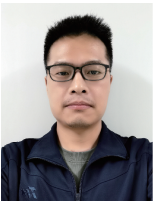
Fig. 9 Comparison of vibration power spectrum density on the actual system

- Nonlinear Dynamics, 2007, 2(4): 290-298.
- [4] HENSLEY J M, PETERS A, CHU S. Active low frequency vertical vibration isolation [J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(6): 2735-2741.
- [5] 陈斌. 可搬运原子干涉重力仪及其减振系统的研制[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2020.
- CHEN B. Development of portable atomic gravimeter and its vibration isolation system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [6] 熊鑫. 原子干涉重力测量中的三维主动隔振研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
- XIONG X. Research on three-dimension active vibration isolation in atom interferometry gravimeters [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [7] 陈斌, 龙金宝, 谢宏泰, 等. 可移动三维主动减振系统及其在原子干涉重力仪上的应用[J]. 物理学报, 2019, 68(18): 117-125.
- CHEN B, LONG J B, XIE H T, et al. A mobile three-dimensional active vibration isolator and its application to cold atom interferometry [J]. Chinese Journal Physics, 2019, 68(18): 117-125.
- [8] FREIER C. Measurement of local gravity using atom interferometry [D]. Berlin: Humboldt University of Berlin, 2010.
- [9] 王文超, 汤彪, 周林, 等. 原子干涉仪中的超低频隔振系统的设计及仿真[J]. 量子电子学报, 2010, 27(3): 367-372.
- WANG W CH, TANG B, ZHOU L, et al. Design and matlab simulation of an ultra-low frequency vibration-isolating system for atom interferometers [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2010, 27(3): 367-372.
- [10] 王凯楠, 徐晗, 周寅, 等. 基于车载原子重力仪的外场绝对重力快速测绘研究[J]. 物理学报, 2022, 71(15): 347-356.
- WANG K N, XU H, ZHOU Y, et al. Research on rapid surveying and mapping of outfield absolute gravity based on vehicle-mounted atomic gravimeter [J]. Chinese Journal of Physics, 2022, 71(15): 347-356.
- [11] YANG J, XIONG Y P, XING J T. Dynamics and power flow behaviour of a nonlinear vibration isolation system with a negative stiffness mechanism [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(1): 167-183.
- [12] LI R P, DU CH B, GUO F, et al. Performance of variable negative stiffness MRE vibration isolation system [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015: 1-8.
- [13] HAO ZH F, CAO Q J. The isolation characteristics of an archetypal dynamical model with stable-quasi-zero-stiffness [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 340: 61-79.
- [14] PLATUS D. Negative-stiffness-mechanism vibration isolation systems [C]. SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, Denver, CO, 1999: 98-105.
- [15] 章欢开, 颜树华, 朱凌晓, 等. 冷原子干涉绝对重力精密测量与系统误差 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 1-12.
- ZHANG H K, YAN SH H, ZHU L X, et al. Precision measurement of absolute gravity by cold atom interference and the system errors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 1-12.
- [16] GUO J, MA S Q, ZHOU CH, et al. Vibration compensation for a vehicle-mounted atom gravimeter [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(13): 12939-12946.
- [17] 吴彬. 高精度冷原子重力仪噪声与系统误差研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- WU B. Research on the noise sources and the systematic errors of the high precision cold atom gravimeter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [18] 张玉杰, 冯伟童, 刘大同, 等. 基于贝叶斯更新的机电作动器健康因子构建方法 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 124-131.
- ZHANG Y J, FENG W T, LIU D T, et al. Health indicator construction method based on Bayesian updating for electro-mechanical actuator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 124-131.
- [19] 苏鸿, 马超, 苏鹏, 等. 基于 XGBoost 的下肢步态相

位识别研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 95-101.

SU H, MA CH, SU P, et al. XGBoost algorithm-based method research on lower limb gait phase recognition[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 95-101.

作者简介



梁昌文, 2010 年于合肥工业大学获得学士学位, 2015 年于合肥工业大学获得硕士学位, 现于国防科技大学攻读博士学位, 主要研究方向为量子精密测量。

E-mail: changwen_110@163.com

Liang Changwen received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hefei University of Technology in 2010 and 2015, respectively. He is currently a Ph.D. candidate at National University of Defense Technology. His main research interest is quantum precision measurement.



颜树华(通信作者), 1992 年于清华大学获得学士学位, 1994 年于清华大学获得硕士学位, 2004 年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学智能科学学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为原子惯性传感器、重力异常探测、量子时空基准和纳米测量。

E-mail: yanshuhua996@163.com

Yan Shuhua (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Tsinghua University in 1992 and 1994, and received his Ph.D. degree from National University of Defense Technology in 2004. He is currently a professor and a Ph.D. advisor in the College of Artificial Intelligence at National University of Defense Technology. His main research interests include atomic inertial sensors, gravity anomaly detection, quantum space-time reference and nano-measurement.