

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508661

星壤力学感知模组的动态特性补偿技术

祁 旗¹ 张彬彬² 范锦彪¹ 姜生元³

(1. 中北大学极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室 太原 030051; 2. 北京卫星制造厂有限公司 北京 100190; 3. 哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

摘要:在星壤侵入式探测过程中,探测器工作在高过载的环境条件下,力学感知模组通常位于探测器的最前端,所处的应力环境最为恶劣。为避免高过载对力学感知模组的损坏,需对其进行灌封处理。然而灌封材料在提高模组抗冲击性能的同时,带来了幅频响应的非线性。针对这一问题,提出了“共面激励”冲击校准方法和“阶次自适应辨识+NLS-Wolfe线搜索”的数据处理方法。首先,基于对称原理,将标准传感器与被校模组安装在冲击放大器可动台的对称位置,在共面激励脉冲的作用下,实现对力学感知模组的动态校准;在校准数据处理时,通过阶次自适应辨识确定传递函数的阶次,采用NLS-Wolfe线搜索辨识模组的传递函数参数;基于动态补偿原理,构建逆传递函数模型,求出力学感知模组的补偿函数。结果表明,经补偿后的力学感知模组幅值误差 $\pm 5\%$ 的工作频带被有效展宽至12.356 kHz,主脉冲的相关性达到97.69%。

关键词:共面激励法;阶次自适应辨识;NLS-Wolfe线搜索;动态补偿;力学感知模组

中图分类号: TN911.7;V476.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050;590.6510

Dynamic performance compensation method for lunar soil mechanics sensing module

Qi Qi¹ Zhang Binbin² Fan Jinbiao¹ Jiang Shengyuan³

(1. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Beijing Satellite Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100190, China; 3. School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: During the star-soil penetrative exploration process, the detector operates under high-overload conditions. The mechanical sensing module, typically located at the foremost part of the detector, experiences the most severe stress environment. To prevent damage from high overloads, the module requires potting. However, while potting materials enhance the module's impact resistance, they introduce nonlinearities in the amplitude-frequency response. This paper addresses this issue by proposing the 'co-planar excitation' impact calibration method and the data processing method of 'order-adaptive identification NLS-Wolfe line search'. First, leveraging the principle of symmetry, the reference sensor and the module under calibration are mounted symmetrically on the movable table of a shock amplifier. Dynamic calibration of the mechanical sensing module is achieved under co-planar excitation pulses. During the calibration data processing, the order of the transfer function is determined through order-adaptive identification, and the transfer function parameters are identified using the NLS-Wolfe line search identification module. Results show that after compensation, the operating frequency bandwidth with amplitude error within $\pm 5\%$ is effectively extended to 12.356 kHz, and the correlation of the main pulse reaches 97.69%.

Keywords: co-planar excitation method; order-adaptive identification; NLS-Wolfe line search; dynamic compensation; Mechanical Sensing Module

0 引言

星壤的力学参数是星球科学探测的重要参数之一,直接关系到星球表面的稳定性、地形的形成与演变,同时对探测器的着陆、巡视和采样等工程任务产生重要影响^[1-5]。目前针对星壤侵入式探测的研究主要有英国的 MOONLITE 月壤侵入器、日本的 Lunar-A 的月壤侵入器、美国 Deep-Space2 火星侵入器、俄罗斯的 Mars-96 火星侵入器等^[6-9]。国外,Shiraishi 等^[10]设计了一套加速度数据采集系统,并设计等比例试验模型对模拟月壤进行地面侵入试验,获取了侵入过程中的轴向过载曲线。MOONLITE 是由英国主导的一项月球撞击探测任务,为验证 MOONLITE 撞击器的侵入能力以及自身的生存性能,Gowen 等^[11]设计了地面测试试验,通过装载在侵入器前方的加速度记录仪记录侵入全过程的过载曲线。他们都获得了地面模拟实验中的加速度,但对加速度的准确性及加速度信号的利用没有研究。

国内,Li 等^[12]和 Jiang 等^[13]在获取侵入过程加速度信号的基础上,研究表明侵入过程的加速度信号与星壤力学参数如颗粒形状、粒径分布、密度、内聚力和内摩擦角等有关,是建立星壤力学参数反演模型的基础输入。梁赫^[14]通过分析侵入过程中弹体加速度峰值和加速度峰值的响应时间,结合测温点的温度数据,建立了模拟星壤相对密度的反演模型,并得出加速度峰值越高,月壤相对密度越大的结论。许杰^[15]分析侵入过程中的加速度数据,发现侵入过载曲线的起始段斜率可以用来推算星壤密度,并通过侵入过载曲线起始段斜率结合弹体信息建立了反演星壤密度的数学模型。这说明星壤力学参数的反演不仅依赖于侵入过载信号的峰值,还与峰值的响应时间等数据密切相关。因此,侵入过载信号的测量精度直接影响到星壤力学参数的反演精度。

本文针对星壤原位探测中力学感知模组因灌封引起的幅频响应非线性问题,开展幅值与频率响应特性的校准技术研究。鉴于力学模组结构的特殊,现有的校准方法无法直接采用,因此借鉴比较法校准思想,提出了一种“共面激励”动态校准方法,通过将标准传感器与力学模组对称布置于冲击放大器可动台面上,在平面碰撞条件下实现等效同步加载。在校准数据处理方面,固定阶次模型难以适应动态系统的时变特性,而高阶模型虽能捕捉细节却易引发过拟合;同时,非线性优化算法在参数估计过程中常因步长选择不当陷入局部最优或收敛缓慢^[16-18]。针对上述问题,提出“阶次自适应辨识+非线性最小二乘-沃尔夫(nonlinear least squares-Wolfe, NLS-Wolfe)线搜索”两步协同框架:一方面,通过阶次自适应机制动态优化模型结构,实现模型复杂度与泛化性能之

间的自适应平衡,克服传统固定阶次在非线性系统中适用性受限的问题;另一方面,将 Wolfe 线搜索准则嵌入 NLS 优化框架,构建具备充分下降性的自适应步长调节机制,显著提升参数估计的收敛效率与全局搜索鲁棒性。该框架将模型结构自适应与优化算法步长动态控制深度融合,形成“阶次-参数”协同优化的系统。基于辨识结果,进一步构建逆动态模型,设计相应的动态补偿函数,实现对灌封引入非线性的校准。

1 星壤力学感知模组

在星壤力学参数探测的进展中,侵入过程中的加速度信号具有直接可测性,本文所述的力学感知模组是以加速度计为基础,采用真空灌封工艺将其与壳体封装为一体,如图 1 所示。

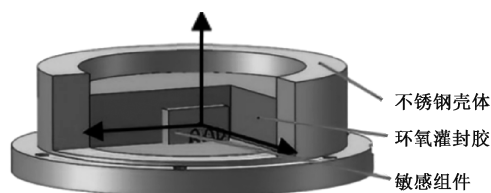


图 1 力学感知模组模型结构

Fig. 1 Mechanical sensing module model structure diagram

图 1 中,敏感组件包括 X 轴向的双量程加计和 Y、Z 轴向的单量程加计及其适配放大电路,其中加计可等效为一个单自由度的弹簧质量系统^[19-21],如图 2 所示。

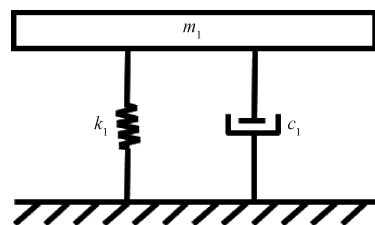


图 2 加计物理模型

Fig. 2 Accelerometer physics-based model schematic

图 2 中, m_1 为运动质量块的质量, c_1 为阻尼器的阻尼系数, k_1 为弹性元件的刚度系数。其数学模型可以用二阶微分方程表示。

其数学模型可以用以下二阶微分方程表示:

$$m_1 \ddot{x}(t) + c_1 \dot{x}(t) + k_1 x(t) = m_1 a \quad (1)$$

系统归一化传递函数为:

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2)$$

幅频特性为:

$$A(\omega) = \frac{1}{\omega_1^2} \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta_1 \frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}} \quad (3)$$

相频特性为:

$$\phi(\omega) = -\arctg \frac{2\zeta_1 \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2} \quad (4)$$

式中: $\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}$ 为加速度计的固有谐振频率; $\zeta_1 = \frac{c_1}{2\sqrt{m_1 k_1}}$ 为加速度计的阻尼比。

在图1的模型结构中,加速度计被灌封材料紧密包裹在不锈钢壳体内,在力传递的路径上,灌封材料实际上起到缓冲的作用^[22]。目前,灌封材料尚没有明确的动力学模型^[23-25],将其假定为多个二阶系统和一阶系统的组合,则星壤力学感知模组的单轴总模型如图3所示。

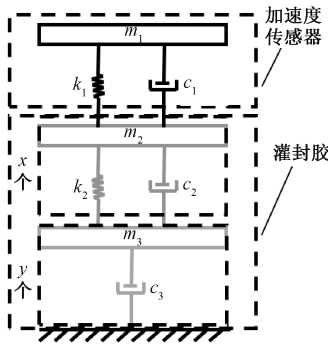


图3 力学感知模组单轴物理模型

Fig. 3 Single-axis physical model diagram of the mechanical sensing module

图3中, m_i 为运动质量块的质量, c_i 为阻尼器的阻尼系数, k_i 为弹性元件的刚度系数,将只带阻尼和质量块的部分视作一阶模型。星壤力学感知模组的传递函数为感知模组为偶数阶次时, $y=0$:

$$H_1(s) = H(s) \cdot \prod_{i=1}^x K_i \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_{ni} s + \omega_{ni}^2} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (m \geq 4, n \geq 4) \quad (5)$$

感知模组模型为奇数阶次时, $y=1$:

$$H_2(s) = H(s) \cdot \frac{K}{\tau + 1} \cdot \prod_{i=1}^x K_i \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_{ni} s + \omega_{ni}^2} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (m \geq 5, n \geq 5) \quad (6)$$

2 星壤力学感知模组校准原理

2.1 动态校准原理

加速度计的校准方法分为绝对法和相对法,依据的国家标准分别是 GB/T 20485.13-2007^[26] 和 GB/T 20485.22-2008^[27]。然而,由于星壤力学感知模组的结构特殊性,这两个标准中提供的校准方法无法直接使用,因此借鉴比较法校准思想,提出一种“共面激励”校准方法,该方法由冲击放大器(图4)的基座与可动台的对撞产生一高幅值的面冲击脉冲作为力学感知模组校准的激励信号源。工作原理为冲击放大器随跌落台从一定高度落下,当跌落台撞击到底座时产生反弹,固定在跌落台上的冲击放大器基座随跌落台一起反向运动,与正向运动的可动台平面碰撞,产生一个高幅值的激励加速度脉冲,脉冲的宽度由可动台与基座之间的毡垫调整。

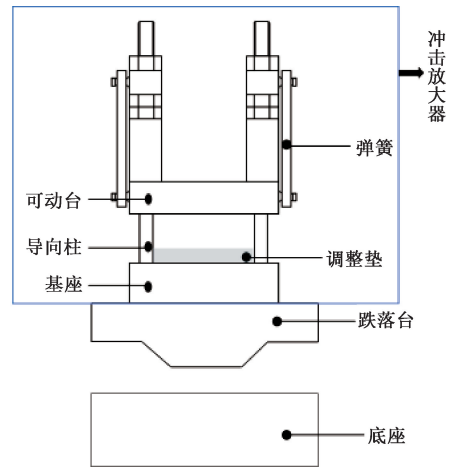


图4 冲击放大器装置

Fig. 4 Shock amplifier device

相较于传统落锤,该冲击放大器通过独特的二次碰撞设计,提升了冲击加速度幅值,同时可实现比较准确的波形控制。

冲击放大器放大机理分析为假设跌落台+基座质量为 M_1 ,可动台质量 M_2 。

运动时序为阶段1:跌落台和可动台从高度 h_1 处自由落体,与底座碰撞后以速度 v_1 反弹 ($v_1 = e\sqrt{2gh_1}$, e 为恢复系数);阶段2:可动台因惯性继续向下运动,速度 $v_2 = \sqrt{2g(h_1 + \Delta h)}$, Δh 为可动台与基座之间的距离,由于 Δh 很小,在忽略弹簧阻尼,则 $v_2 = \sqrt{2gh_1}$;阶段3:理想情况下,可动台相对于基座碰撞速度, $v_2' = v_1 + v_2$ 。

但实际应用中,由于碰撞能量损耗、系统阻尼、空气阻力等多重因素的综合影响,碰撞速度通常会有所损耗。

2.2 动态校准试验

为确保“共面激励法”中标准传感器与力学感知模组感受的激励信号相同,校准前按照如图 5 所示的安装进行了验证。

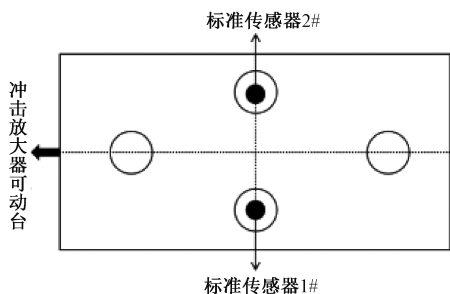


图 5 标传安装示意图

Fig. 5 Standard transmission installation schematic diagram

图 5 中,传感器 1#和传感器 2#选择 ENDEVCO 2270 量值传递级标准加速度传感器,通过 M6 的链接螺钉沿着冲击台轴线对称安装在台面上。两标准传感器的信号经电荷放大器后由高精度采集卡同步采集,确保数据在时间域上的时间零点相同。

激励脉冲的幅值和持续时间通过改变图 4 中调整垫的材料及厚度来调节。在满量程范围内,进行了 1 000g 以及 5 000g 下的测试,测试数据如表 1 所示,其中,脉宽由半峰值法读取^[28]。

表 1 标准传感器 1#、2#实测数据表

Table 1 Measured data table of standard sensor 1# and 2#

序号	标传 1#	标传 1#	标传 2#	标传 2#	幅值
	幅值/g	脉宽/ms	幅值/g	脉宽/ms	误差/%
1	1 100.06	2.010	1 094.74	1.975	0.48
2	5 197.14	0.568	5 165.12	0.553	0.62

由表 1 可知,当可动台与基座碰撞作用时间大于 0.5 ms 时,在台面上的两标准传感器安装位置处的幅值误差小于 1%,即实现共面激励的基本要求。

替换图 5 中的标传 2#为力学感知模组。将力学感知模组通过专用夹具固定在浮动台面上。夹具构型依据模组的几何外形与安装接口特征进行设计,确保力学模组与台面之间紧密均匀接触,避免因局部应力集中或连接松动引入额外振动模态。安装如图 6 所示。

2.3 动态校准结果

在 6 000g 的量程范围内,对力学感知模组进行了 5 次冲击校准,校准数据如表 2 所示。

图 7 是表 2 中第 1 组数据,图 7(a)是标传 1#的原始输出信号,图 7(b)是被校的力学感知模组的原始输出信号。对数据进行处理、分析得出力学感知模组的频率特

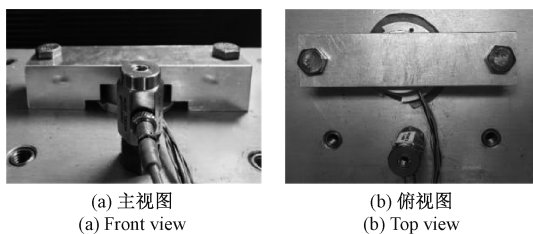


图 6 共面激励法安装图

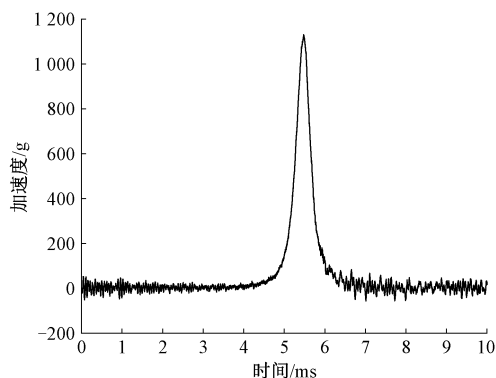
Fig. 6 Co-planar excitation method installation diagram

性,如图 8 所示。

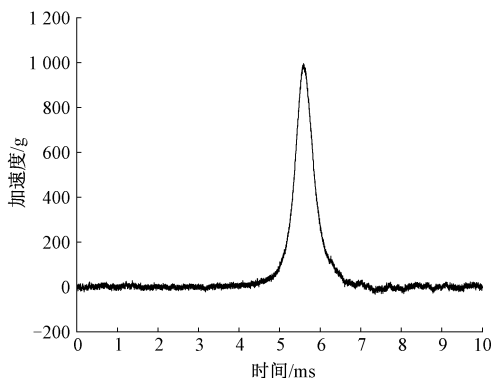
表 2 力学感知模组校准数据表

Table 2 Mechanical sensing module calibration data sheet

序号	标传 1#	标传 1#	模组	模组
	幅值/g	脉宽/ms	幅值/g	脉宽/ms
1	1 130.31	2.037	996.21	2.560
2	2 173.68	1.343	1 510.94	1.970
3	2 932.92	1.116	1 776.54	1.400
4	4 206.52	0.812	2 100.56	1.330
5	5 078.56	0.736	2 266.74	1.199



(a) 标传 1#原始信号
(a) Tracker 1# original signal



(b) 模组原始信号
(b) Original signal of the sensing module

图 7 原始信号

Fig. 7 Original signal diagram

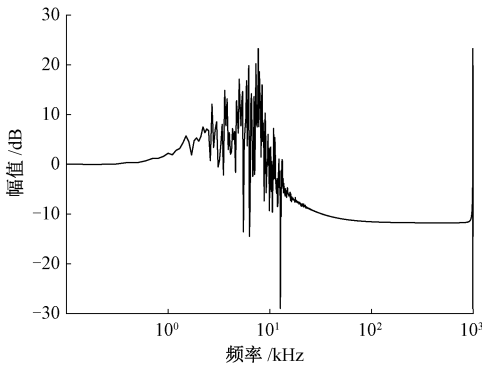


图8 力学感知模组幅频特性曲线
Fig. 8 Frequency response curve of the mechanical perception module

由图8可知,频率500 Hz以上的信号被放大,1 kHz的信号幅值对应2.2 dB,放大约1.29倍;1.5 kHz的信号幅值对应5.7 dB,放大约1.93倍;6.6 kHz的信号幅值对应14.2 dB,放大约5.13倍。力学感知模组的频域动态性能指标:幅值误差为±5%的工作频带为 $\omega_{g_1} = 0.546$ kHz,幅值误差为±10%的工作频带为 $\omega_{g_2} = 0.665$ kHz。而在地面模拟试验中,侵彻过载信号的滤波截至频率为1.5 kHz,通过弹载记录仪实测信号频率为8.6 kHz^[29]左右。说明力学感知模组的无失真工作频带无法覆盖星壤侵彻式探测的多工况测试需求,因此需要对其动态特性进行补偿。

3 星壤力学感知模组的动态模型辨识及补偿

3.1 力学感知模组动态模型的阶次估计与参数辨识

基于共面激励的基本要求,可认为标准传感器1#的测量值作为力学感知模组的输入,即将标准传感器输出值做为系统输入观测量,力学感知模组输出值做为输出观测量。

使用order函数辨识模型的阶次,避免人为设定阶次导致的过拟合或欠拟合。用NLS-Wolfe线搜索方法辨识出传递函数的参数,这种方法不仅提高了参数估计的精度和优化的稳定性,还通过自动选择线搜索提高了算法的适应性和鲁棒性,为传感器的动态响应函数求解提供了更高效和准确的手段。

order函数主要通过数据驱动的阶次估计(基于Hankel矩阵和奇异值分解(SVD)),帮助确定模型的最优阶次,基本步骤如下。

1)对于连续时间系统的采样数据,构建Hankel矩阵 H 。

$$H = \begin{bmatrix} h(1) & h(2) & \cdots & h(N) \\ h(2) & h(3) & \cdots & h(N+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h(M) & h(M+1) & \cdots & h(M+N-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $h(k)$ 是系统的脉冲响应; M 和 N 是定义的时域窗口大小。

2)对Hankel矩阵进行SVD。

$$H = U\Sigma V^T \quad (8)$$

式中: U 和 V 是正交矩阵, Σ 是对角矩阵。

$$\Sigma = \text{diga}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \cdots, \sigma_n) \quad (9)$$

式中: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \cdots \geq \sigma_n \geq 0$ 为奇异值;

3)采用拐点法选择最优阶次,绘制奇异值曲线,奇异值衰减的拐点为可能的最佳阶次 n_0 。

$$n = \operatorname{argmax}_k \left(\frac{\log \sigma_k - \log \sigma_{k+1}}{\log \sigma_{k-1} - \log \sigma_k} \right) \quad (10)$$

选择最小的 n 使得累积能量占比达到阈值 A 。

$$n = \operatorname{argmin}_k \left\{ \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sum_{i=10}^{\tau} \sigma_i^2} \geq A \right\} \quad (11)$$

不同阶次下的奇异值曲线与能量占比如图9、10所示。

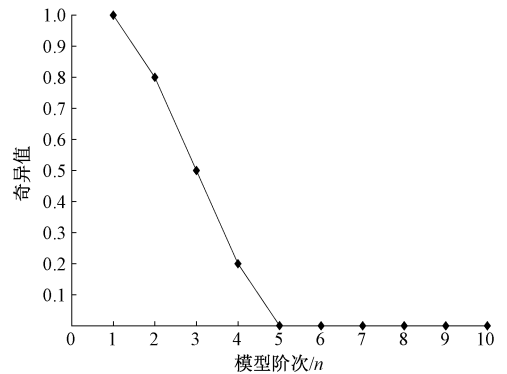


图9 奇异值
Fig. 9 Singular value

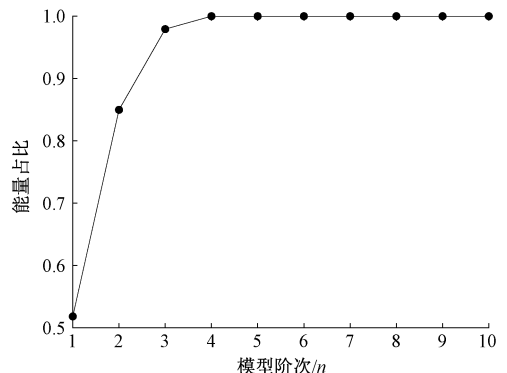


图10 能量占比
Fig. 10 Energy proportion

由图 9 可知, 奇异值衰减的拐点为 $n=5$, 根据图 10 可取 $n \geq 4$, 综合评判标准得出模组最佳阶次为五阶模型。确定模型阶次后, 使用 NLS-Wolfe 线搜索方法, 进行参数辨识。

1) 参数的最小二乘估计, 选择一组参数的初始估计值 X_0 , 作为迭代运算的初值。使用初始参数估计值 X_0 , 计算模型的残差向量 $r(X_0)$ 。

$$r(X_0) = y - f(u; X_0) \quad (12)$$

式中: y 是实际观测值; $f(u; X_0)$ 是模型预测值。

2) 进行迭代优化, 在当前参数估计值 X_k 处计算雅可比矩阵 $J(X_k)$ 。

$$J(X_k) = \frac{\partial f(u; X_k)}{\partial X} \quad (13)$$

$$H_3(s) = \frac{8.653 \times 10^{-3} s^5 + 32.1 \times 10^4 s^4 + 4.311 \times 10^7 s^3 + 3.677 \times 10^{10} s^2 + 3.616 \times 10^{15} s + 2.457 \times 10^{17}}{s^5 + 3.929 \times 10^4 s^4 + 3.456 \times 10^8 s^3 + 3.411 \times 10^{12} s^2 + 2.028 \times 10^{16} s + 1.152 \times 10^{18}} \quad (18)$$

3.2 力学感知模组的动态补偿

动态补偿原理如图 11 所示。由于力学感知模组的固有谐振频率和阻尼比的限制, 在动态测试时, 输出响应不理想, 不能精确地反映输入量。如果在力学感知模组后串联一个补偿网络使之与标准传感器一起构成理想的动态测试系统, 那么就实现了力学感知模组的动态性能补偿^[30-31]。

$$H_4(s) = \frac{s^5 + 3.929 \times 10^4 s^4 + 3.456 \times 10^8 s^3 + 3.411 \times 10^{12} s^2 + 2.028 \times 10^{16} s + 1.152 \times 10^{18}}{8.653 \times 10^{-3} s^5 + 32.1 \times 10^4 s^4 + 4.311 \times 10^7 s^3 + 3.677 \times 10^{10} s^2 + 3.616 \times 10^{15} s + 2.457 \times 10^{17}} \quad (19)$$

经动态补偿后的力学感知模组幅频特性如图 12 所示。

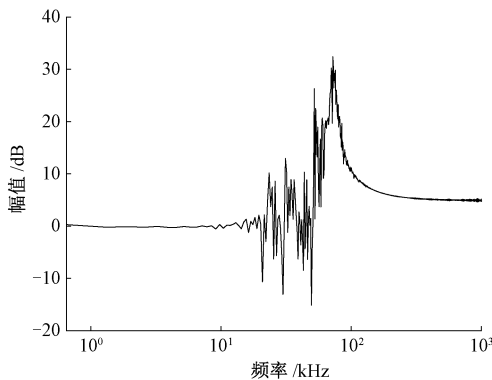


图 12 动态补偿后力学感知模组频率特性曲线

Fig. 12 Frequency response curve of the mechanical perception module after dynamic compensation

由图 12 可知, 经补偿后力学感知模组的频域动态性能指标: 幅值误差为 $\pm 5\%$ 的工作频带为 $\omega' g_1 = 12.356 \text{ kHz}$, 幅值误差为 $\pm 10\%$ 的工作频带为 $\omega' g_2 = 14.958 \text{ kHz}$ 。 $\omega' g_1 / \omega g_1 = 22.63$, 即幅值误差为 $\pm 5\%$ 的工

3) 使用高斯-牛顿法确定搜索方向 h_k 。

$$h_k = - (J(X_k)^T J(X_k))^{-1} J(X_k)^T r(X_k) \quad (14)$$

4) 使用线搜索方法确定步长 α_k , 使得目标函数值最小化。

$$\alpha_k = \underset{\alpha \geq 0}{\operatorname{argmin}} F(X_k + \alpha h_k) \quad (15)$$

式中: $F(x)$ 是残差平方和。

$$F(x) = \sum_{i=1}^N (y_i - f(u_i; x))^2 \quad (16)$$

5) 使用步长 α_k 和搜索方向 h_k 更新参数估计值。

$$X_{k+1} = X_k + \alpha_k h_k \quad (17)$$

6) 检查参数估计值是否收敛或达到最大迭代次数。如果满足收敛条件, 则停止迭代; 否则, 回到步骤 2) 继续迭代。

经过上述方法, 得出力学感知模组传递函数为:

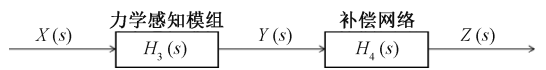


图 11 动态特性补偿原理

Fig. 11 Schematic diagram of dynamic characteristic compensation principle

通过模型分析, 结合动态补偿原理, 求得力学感知模组的补偿函数为:

作频带展宽 22.63 倍; $\omega' g_2 / \omega g_2 = 22.49$, 即幅值误差为 $\pm 10\%$ 的工作频带展宽 22.49 倍。经补偿后的力学感知模组工作频带得到了有效的拓宽。

4 数据验证与实践

4.1 数据验证

采取同样的方法进行验证实验, 测试数据如表 3 所示。

表 3 力学感知模组验证实验数据表

Table 3 Mechanical sensing module verification test data sheet

序号	标传 1#幅值/g	标传 1#脉宽/ms	模组幅值/g	模组脉宽/ms
1	715.06	1.995	462.35	2.525
2	1 004.67	1.570	653.31	2.020
3	2 215.60	0.845	1 375.49	1.290
4	3 040.00	0.420	1 927.49	0.620
5	5 680.00	0.290	3 687.81	0.580

图 13 是表 3 中第 5 组实验数据。

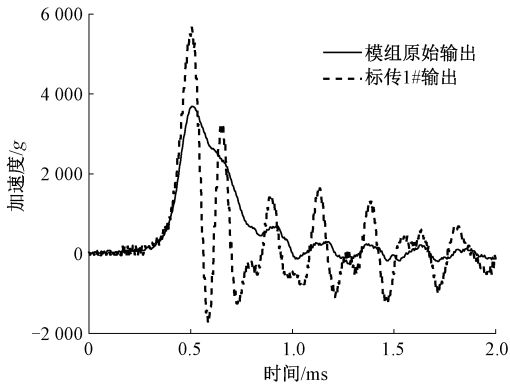


图 13 验证实验原始数据曲线

Fig. 13 Original data curve of the verification test

由图 13 可知,在加速度脉冲作用下,力学感知模组的响应与标准传感器的数据相比,测量结果存在明显偏差。利用式(19)的补偿函数对表 3 的数据曲线进行补偿,补偿后的数据如表 4 所示。

表 4 力学感知模组补偿后数据

Table 4 Post-compensation data sheet for mechanical sensing module

序号	标传 1# 幅值/g	模组幅值/g		标传 1# 脉宽/ms	模组脉宽/ms	
		补偿前	补偿后		补偿前	补偿后
1	715.06	462.35	724.38	1.995	2.525	2.045
2	1 004.67	653.31	1 006.13	1.570	2.020	1.580
3	2 215.60	1 375.49	2 175.34	0.845	1.290	0.840
4	3 040.00	1 927.49	2 956.49	0.420	0.620	0.430
5	5 680.00	3 687.81	5 758.09	0.290	0.580	0.300

图 14 为表 4 中的第 5 组数据。补偿后的力学感知模组的输出与标准传感器 1# 的输出主脉冲的相关系数为 97.69%。补偿后力学感知模组误差分析如表 5 所示。

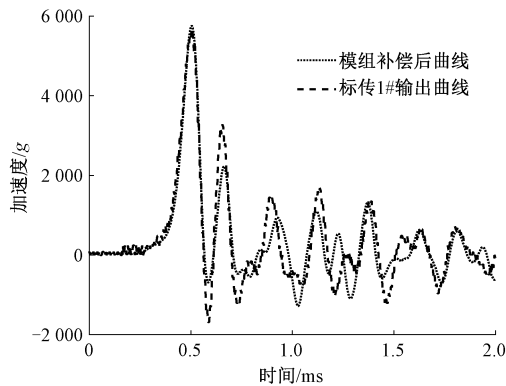


图 14 动态补偿后比对数据曲线

Fig. 14 Comparison of dynamic compensation curves

4.2 实际应用

地面模拟月壤侵彻实验是在哈尔滨工业大学的空间碎片高速撞击研究中心的小型气体炮上进行,图 15 为试验装置示意图。试验装置中主要包括用于发射弹体的气体炮、高速摄影机和靶仓等。

表 5 误差分析

Table 5 Error analysis (%)

序号	幅值误差	脉宽误差
1	1.30	2.51
2	0.15	0.64
3	1.82	0.59
4	2.75	2.38
5	1.37	3.45
平均误差	1.48	1.91

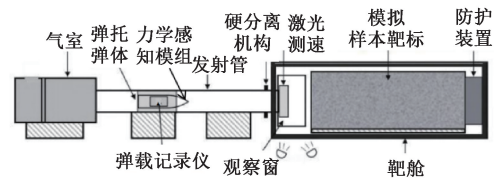


图 15 试验装置示意图

Fig. 15 Test setup schematic diagram

实验过程中,力学感知模组记录了侵彻过程中的实时加速度信号,用补偿函数对实测数据进行处理,得到了补偿后的数据。经补偿后的时域曲线如图 16 所示,频域曲线如图 17 所示。

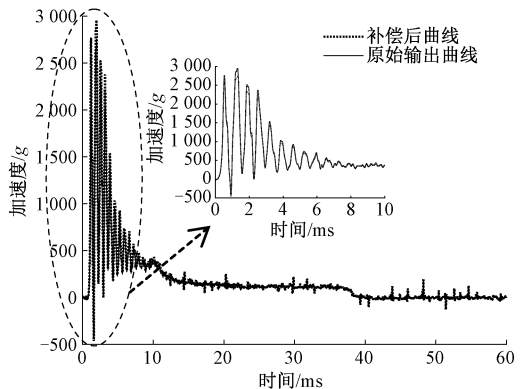


图 16 力学感知模组动态补偿前后加速度曲线

Fig. 16 Dynamic compensation comparison of acceleration curves in mechanics sensing module

由图 17 可知,模拟星壤侵彻信号中,频率分量 700 Hz 以上的信号被有效补偿。在 1.5 kHz 的频率点,经补偿后的频谱幅值从 103 722 降低为 71 141。结合图 16 可知,侵彻的第 1 峰值加速度的测量精度提高了 7.88%。根据梁赫^[14]给出的反演模型,第 1 峰值加速度

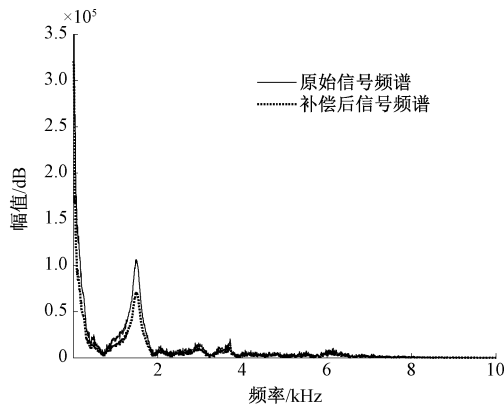


图 17 力学感知模组动态补偿前后频谱曲线

Fig. 17 Frequency spectrum curves before and after dynamic compensation of the mechanical sensing module

测量精度提高 7.88% 时,模拟月壤相对密度的反演精度可提升约 3.59%。

5 结 论

本文针对星壤原位探测中力学感知模组因灌封材料引发的幅频响应非线性问题开展了研究。首先,采用“共面激励法”对星壤力学感知模组进行了校准,基于校准数据,采用“阶次自适应辨识+NLS-Wolfe 线搜索”方法,得出力学感知模组传递函数。基于动态补偿原理,构建逆传递函数模型,求出力学感知模组的补偿函数。结果表明,经过补偿后力学模组 $\pm 5\%$ 的工作频带由 0.546 kHz 拓展到 12.356 kHz,展宽了 22.63 倍,主脉冲的相关性达到 97.69%,有效地提高了侵入过程加速度测量值的真实性。补偿函数在地面模拟月壤侵入实验中得到了应用,补偿后的曲线更能真实反应模拟月壤侵入过载。建立的补偿函数为准确获取星壤侵入过程中的过载信号提供了可靠的技术保障,对深空探测中的星壤力学参数反演具有重要应用价值。

参考文献

- [1] 宋祥文. 基于热惯量的火星壤力学参数反演研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
SONG X W. Research on inversion of mechanical parameters of Martian regolith based on thermal inertia[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [2] 李云丽, 吴文平, 吴昊天, 等. 模拟月壤的力学性能与本构模型研究进展[J]. 中国粉体技术, 2025, 31(4): 75-92.
LI Y L, WU W P, WU H T, et al. Research progress on mechanical properties and constitutive models of

simulated lunar regolith[J]. Chinese Powder Science and Technology, 2025, 31(4): 75-92.

- [3] ROBIN C Q, DUCHENE A, MURDOCH N, et al. Mechanical properties of rubble pile asteroids (Dimorphos, Itokawa, Ryugu, and Bennu) through surface boulder morphological analysis [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 6203.
- [4] YIN C, SCHIAVONE P, QUAN Q, et al. Normal force on the asteroid regolith generated by the impact of lander footpad[J]. Acta Astronautica, 2023, 202: 229-251.
- [5] BRISSET J, SÁNCHEZ P, COX C, et al. Asteroid regolith strength: Role of grain size and surface properties [J]. Planetary and Space Science, 2022, 220: 105533.
- [6] VAN BELLE G T, CIARDI D, HILLSBERRY D, et al. MoonLITE: A CLPS-delivered NASA Astrophysics Pioneers lunar optical interferometer for sensitive, milliarcsecond observing [C]. Space Telescopes and Instrumentation 2024: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. SPIE, 2024, 13092: 1038-1050.
- [7] ZHOU J, FENG J, LIU J, et al. Review on research and development of planetary penetrator[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(5): 1570-1595.
- [8] 姜生元, 张伟伟, 杨宇彬, 等. 动能侵入式星壤物性原位触探技术研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(2): 114-122.
JIANG SH Y, ZHANG W W, YANG Y B, et al. Research progress of kinetic energy penetration-based in situ probing technology for planetary regolith properties[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 114-122.
- [9] ATKINSON J, PRASAD M, ABBUD-MADRID A, et al. Penetration and relaxation behavior of dry lunar regolith simulants[J]. Icarus, 2019, 328: 82-92.
- [10] SLUMBA K, SCOTT B, JAKSA M, et al. Dynamic cone penetration in lunar regolith simulant[J]. 2024.
- [11] AREVALO R, NI Z, DANELL R M. Mass spectrometry and planetary exploration: A brief review and future projection [J]. Journal of Mass Spectrometry, 2020, 55(1): e4454.
- [12] LI R, CHEN J, ZHANG J, et al. Cone penetration resistance of CUMT-1 lunar regolith simulant under magnetic-similitude lunar gravity condition [J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(12): 6725-6744.
- [13] JIANG M, XI B, LEI H. Investigation of gravity effect on penetration resistance in Tongji-1 lunar regolith simulant by centrifuge tests [J]. Advances in Space

- Research, 2018, 62(5): 945-956.
- [14] 梁赫. 基于侵彻热的模拟月壤相对密度及导热系数反演仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
LIANG H. Inversion and simulation research of relative density and thermal conductivity of simulated lunar regolith based on penetration heat[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [15] 许杰. 基于侵彻式探测的月壤密度反演研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.
XU J. Research on inversion of lunar regolith density based on penetration detection[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [16] 孔令旺, 张旭东, 党选发, 等. 基于正交多项式的称重仪表非线性校正算法[J]. 微型机与应用, 2014, 33(16): 71-74.
KONG L W, ZHANG X D, DANG X F, et al. Nonlinear calibration algorithm for weighing instruments based on orthogonal polynomials[J]. Microcomputer & Its Applications, 2014, 33(16): 71-74.
- [17] 樊润洁, 朱亚男. 基于神经网络的传感器非线性误差校正方法[J]. 电子设计工程, 2014, 22(23): 56-59.
FAN R J, ZHU Y N. Sensor nonlinear error correction method based on neural networks[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(23): 56-59.
- [18] SHAN P, BI Y, LI Z, et al. Unsupervised model adaptation for multivariate calibration by domain adaptation-regularization based kernel partial least square[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2023, 292: 122418.
- [19] 张宇, 许高斌, 尹盛华, 等. 多梁凹槽高 g 值加速度的设计与分析[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 grooved high- g accelerometer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 90-97.
- [20] 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. Study on the influence of high and low temperature environments on the sensitivity variation of triaxial high- g accelerometers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 240-248.
- [21] 关存贺, 许高斌, 王焕章, 等. 复杂应力条件下 MEMS 加速度传感器可靠性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 17-25.
GUAN C H, XU G B, WANG H ZH, et al. Reliability analysis of MEMS accelerometer under complex stress conditions[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7): 17-25.
- [22] 程祥利, 赵慧, 焦敏, 等. 高冲击载荷作用下弹载记录仪防护系统动力学响应特性[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(12): 117-125.
CHENG X L, ZHAO H, JIAO M, et al. Dynamic response characteristics of the protective system for projectile-borne recorder under high-impact load[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(12): 117-125.
- [23] LUO G, WU C, XU K, et al. Development of dynamic constitutive model of epoxy resin considering temperature and strain rate effects using experimental methods[J]. Mechanics of Materials, 2021, 159: 103887.
- [24] SHITIKOVA M V. Fractional operator viscoelastic models in dynamic problems of mechanics of solids; A review[J]. Mechanics of Solids, 2022, 57(1): 1-33.
- [25] FENG J, GUO Z. Temperature-frequency-dependent mechanical properties model of epoxy resin and its composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 85: 161-169.
- [26] 国家标准化管理委员会. GB/T 20485. 13-2007 振动与冲击传感器的校准方法 第 13 部分: 激光干涉法冲击绝对校准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Standardization Administration of China. GB/T 20485. 13-2007 Calibration methods for vibration and shock sensors—Part 13: Laser interferometry for shock absolute calibration[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [27] 国家标准化管理委员会. GB/T 20485. 22-2008 振动与冲击传感器的校准方法 第 22 部分: 冲击比较校准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of China. GB/T 20485. 22-2008 Calibration methods for vibration and shock sensors—Part 22: Shock comparison calibration[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [28] 卿浩博, 徐汉林, 甘建超, 等. 弱信号条件下到达时间提取及脉宽测量方法[J]. 电子信息对抗技术, 2018, 33(4): 31-35.
QING H B, XU H L, GAN J CH, et al. Method for arrival time extraction and pulse width measurement under weak signal conditions[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2018, 33(4): 31-35.
- [29] 候文科. 基于系统辨识的侵彻器触壤过载预测方法研

究[D]. 太原:中北大学,2025.

HOU W K. Research on soil contact overload prediction method of penetrator based on system identification[D]. Taiyuan: North University of China, 2025.

- [30] 郝喆,于春战,张佳林,等. 基于 SSA-GB-ELM 的并联式六维加速度传感器非线性解耦[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(10):106-114.

HAO ZH, YU CH ZH, ZHANG J L, et al. Nonlinear decoupling of parallel six-dimensional accelerometer based on SSA-GB-ELM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (10): 106-114.

- [31] 张泽宇,李杰,胡陈君,等. 一种适用于高量程加速度计的标定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(12):45-51.

ZHANG Z Y, LI J, HU CH J, et al. Research on a calibration method suitable for high-range accelerometers[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12):45-51.

作者简介



祁旗,2022 年于周口师范学院获得学士学位,现为中北大学硕士研究生,主要研究方向为动态测试与校准。

E-Mail: 2924938667@qq.com

Qi Qi received her B. Sc. degree from Zhoukou Normal University in 2022. Now she is a M. Sc. candidate at North University of China. Her main research interests include dynamic testing and calibration.



范锦彪(通信作者),2010 年于中北大学获得博士学位,现为中北大学教授,主要研究方向有动态测试理论、智能测控技术、冲击测试与校准技术。

E-mail: fjb@nuc.edu.cn

Fan Jinbiao (Corresponding author) received his Ph. D. degree from North University of China in 2010. Now he is a professor at North University of China. His main research interests include dynamic testing theory, intelligent measurement and control technology, and impact testing and calibration technology.