基于速度参量的共面激励月壤力学参数测量模组校准技术

祁 旗[1]，张彬彬[2]，范锦彪[1]，姜生元[3]，张伟伟[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：针对在月壤原位探测任务中，力学模组为适应侵彻高冲击环境采用树脂进行灌封，引起了传感器响应的非线性，影响加速度信号测量准确度的问题，提出基于速度参量的“共面激励”动态校准方法。将被校模组与标准加速度计对称布置于冲击放大器可动台面，当激励脉冲宽度大于0.5 ms时，二者获得相同的加速度与速度，此脉冲可认为是共面激励；基于速度不变原理，通过最小二乘法拟合求解被校模组灵敏度，进而构建基于“子空间辨识–状态空间法”（Subspace Identification-State Space Model，SI-SSM）的动态校正模型，在不依赖灌封材料力学参数的条件下，通过离散状态方程自适应捕获传感器响应的非线性特性，实现加速度输出的校正。校正后力学模组测量值的扩展不确定度为4.16%，满足月壤原位探测的技术指标要求。

关键词：加速度校准；共面激励法；子空间辨识–状态空间法；力学参数测量模组

中图分类号：V19；TH823 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-9287(2026)04-0373-08

DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2026.20250113

引用格式：祁旗，张彬彬，范锦彪，等. 基于速度参量的共面激励月壤力学参数测量模组校准技术[J]. 深空探测学报（中英文），2026，13（4）：373-380.

Reference format: Qi Q，Zhang B B，Fan J B，et al. Calibration for a lunar soil mechanical parameter measurement module based on velocity parameters and coplanar excitation[J]. Journal of Deep Space Exploration，2026，13（4）：373-380.

引 言

在深空探测领域，对天体表面力学特性的精准感知与解析是揭示其地质演化、资源分布及潜在着陆安全性的关键所在[1-5]。力学参数，不仅包含速度、位移、角度、加速度等直接可测的物理量，近年来还进一步延伸至月壤密度、横波速度、可压缩系数及内摩擦角等间接反演参数，这些参数共同构成了理解天体表面力学行为的基础语言[6-9]。1996年，俄罗斯“火星96”探测器（Mars-96）[10]首次尝试对火星表面环境进行力学探测以来，世界各航天机构陆续开展了包括日本月球-A（LUNAR-A）[11]月壤侵彻器、英国月球轻量内部及电信试验（Moon Lightweight Interior and Telecoms Experiment，MoonLITE）[12]月壤侵彻器、美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）发射的“深空2号”（Deep Space-2）[13]火星探测器及欧洲航天局（Europeap Space Agency，ESA）地表及地下多用途科学传感器（Multi Purpose Sensors for Surface and Subsurface Science，MUPUS）[14]彗星探测器在内的多项深空探测任务。这些探索极大地丰富了人类对天体表面力学特性的认识。

许杰等[15]发现侵彻加速度曲线起始段的斜率与月壤密度存在显著的关联，据此构建了融合该斜率与弹体信息的密度反演模型。梁赫等[16]进一步通过联合分析加速度幅值、响应时间及温度数据，指出峰值越高月壤相对密度越大，从而建立了相对密度反演模型。李瑞林等[17-18]指出，侵彻加速度信号与颗粒形状、粒径分布、密度、内聚力及内摩擦角等多种力学参数密切相关，是构建反演模型的关键输入。这些研究共同说明，月壤力学参数反演不仅依赖过载信号的幅值，也高度依赖其动态特性如峰值响应时间、曲线斜率等。因此，提高侵彻过程中加速度信号的测量精度，对提高反演准确性具有重要的意义。

收稿日期：2025-09-11 修回日期：2025-12-01

基金项目：碎片云团撞击致损定量表征及结构剩余防护能力预测方法研究（12572430）

针对月壤原位探测中力学参数测量模组因灌封引起的非线性问题，进行校准技术研究。鉴于模组结构的特殊性，现有的校准方法无法直接采用，本文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参数测量模组对称布置于冲击放大器可动台面，在平面碰撞条件下实现等效同步加载。在数据处理方面，采取多点标定进行最小二乘法拟合得到力学模组单点灵敏度；为进一步解决灌封引入的非线性问题，本文在单点灵敏度基础上引入子空间辨识–状态空间法（Subspace Identification-State Space Model，SI-SSM）构建校正模型，该模型无需预设非线性函数形式，通过子空间辨识自适应提取系统的状态空间模型，可精准捕获传感器响应的非线性特性；基于离散状态方程实现微秒级响应速度，可在侵彻冲击过程中实时跟踪信号的变化；其建模方式无需依赖灌封材料力学参数，仅通过冲击试验数据即可建立映射关系，有效克服了传统单点灵敏度校准无法应对宽频冲击非线性响应的局限性，实现了对灌封材料引入的非线性问题进行校准。

1 力学参数测量模组

在月壤力学参数探测的进展中，本文所述的力学模组以加速度计为基础，侵彻过程中加速度的信号具有直接可测性，采用真空灌封工艺将其与壳体封装为一体，如图1所示，在力传递的路径上，灌封材料实际上起缓冲的作用[19]。

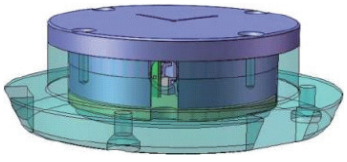


图 1 力学模组模型结构图

Fig. 1 Mechanical module model structure diagram

X、Y、Z轴的敏感组件均为双备份设计，整个模组结构的最大尺寸 $\Phi 50 \times 15$ mm，内部尺寸 $\Phi 37 \times 10$ mm。敏感组件为定制的国产微机电系统（Micro-Electro-Mechanical System，MEMS）双量程加速度芯片，量程为 ± 6 000 g，抗过载能力20 000 g，横向灵敏度≤3%。

由于力学模组结构设计的特殊性，两个标准提供的校准方法无法直接使用，本文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的基座与可调节台的对撞产生一高幅值的面冲击脉冲作为力学模组校准的激励信号源，如图2所示。其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，脉冲的宽度由可调节台与基座之间的毡垫进行调整。

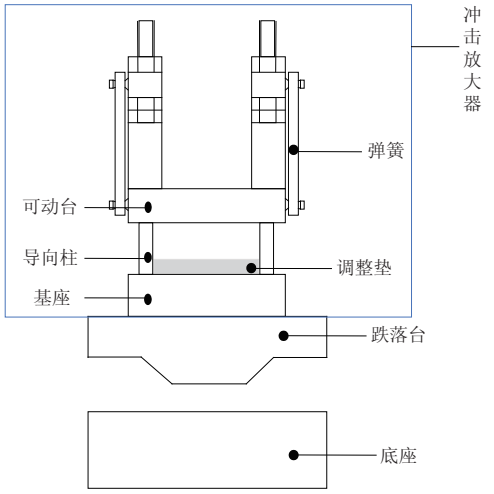


图 2 冲击放大器装置

Fig. 2 Shock amplifier device

与传统落锤相比，该冲击放大器通过独特的二次碰撞设计，提高了冲击加速度的幅值，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，假设跌落台+基座质量M_1，可动台质量M_2：①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）；②可动台因惯性继续向下运动，速度$v_2 = \sqrt{2g(h_1+\Delta h)}$，$\Delta h$为可动台与基座之间的距离，由于$\Delta h$很小，在忽略弹簧阻尼时，则$v_2 = \sqrt{2gh_1}$；③理想情况下，可动台相对于基座碰撞速度$v_2' = v_1 + v_2$。

但在实际工程应用中，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，碰撞速度通常会降低。

2 力学参数测量模组校准

2.1 校准系统

为确保“共面激励法”中标准传感器与力学模组感受的激励信号相同，校准前需按照如图3所示的安装方法进行验证。

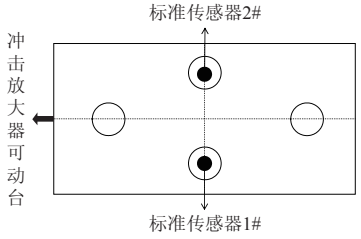


图 3 标传传感器安装示意图

Fig. 3 Installation diagram of standard sensors

传感器1#和传感器2#选用ENDEVCO 2270量程值传递级标准加速度传感器，通过M6连接螺纹沿着冲击台轴线对称安装在台面。两标准传感器的信号经放大器后由高精度采集卡同步采集，确保数据在时域维度零点相同。

激励脉冲的幅值和持续时间可通过改变图2中调整垫的材料及厚度来实现。在满量程范围内，得到的测试结果如表1所示，其中一组的测试数据曲线如图4所示。

表 1　标准传感器1#、2#实测数据表

Table 1　Measured data of standard sensors #1 and #2

序号	标传1# 幅值/g	标传1# 脉宽/ms	标传2# 幅值/g	标传2# 脉宽/ms	幅值 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

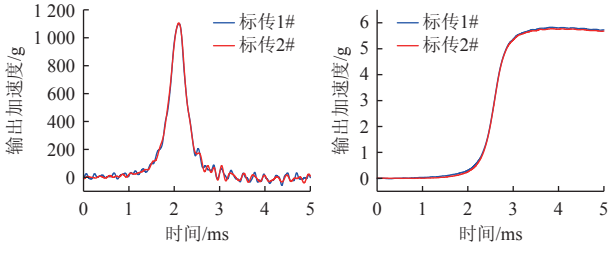


图 4　标准传1#、2#传感器测试对比曲线

Fig. 4　Comparison curves of test results for standard sensors #1 and #2

由图4可知，当可动台与基座的碰撞作用时间大于0.5 ms时，在台面安装两标准传感器位置处的幅值误差小于1%，即可实现共面激励的基本要求。

替换图3的标传2#为力学模组。将力学模组通过专用夹具固定在浮动台面。夹具构型依据模组的几何外形与安装接口特征设计，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的振动模态，安装结果如图5所示。

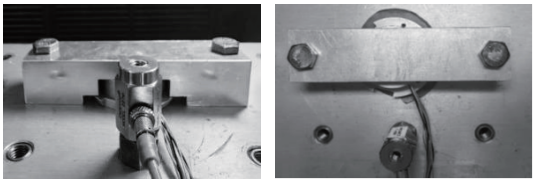


图 5　共面激励法安装图

Fig. 5　Co-planar excitation method installation diagram

测试环境温度维持在（25±5）℃，湿度控制范围：25%～55% RH，共面激励法原理框图如图6所示。在图5安装的基础上，采用落体式冲击台+冲击放大器产生激励加速度脉冲$x(g)$，分别利用标准加速度传感器和力学模组测量该激励信号，信号经放大后由数据采集器存储。

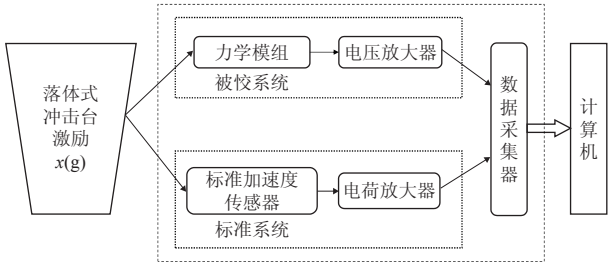


图 6　共面激励法原理框图

Fig. 6　Schematic diagram of co-planar excitation method principle

2.2　校准数据处理

在6 000 g量程范围内，对力学模组进行6次冲击校准，校准数据如表2所示。

表 2　力学模组校准数据表

Table 2　Mechanical module calibration data

标传1# 幅值/g	标传1# 脉宽/ms	模组 幅值/μV	模组 脉宽/ms	峰值灵敏度/ （μV·g^{-1}）
829.6	2.672	147 914	3.251	178.296
1 294.9	2.236	214 751	2.794	165.844
2 136.1	1.403	313 547	2.121	146.785
2 705.1	1.207	373 441	2.109	138.051
3 555.8	0.958	389 779	1.402	109.618
4 852.5	0.805	468 843	1.400	96.619

从表2的数据可以看出，随着激励加速度幅值的增大，脉宽随之减小，由峰值得到的加速度灵敏度在逐渐减小。说明该力学模组的灵敏度随激励信号的脉宽改变而改变。对表2数据进行最小二乘拟合，求得模组的拟合灵敏度，拟合曲线如图7所示。

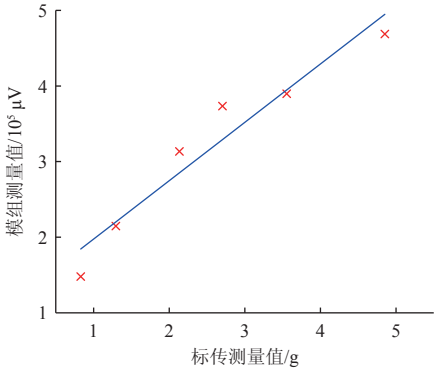


图 7　峰值灵敏度最小二乘法拟合曲线

Fig. 7　Peak sensitivity least squares fitting curve

图6所示曲线所采用的拟合公式为

$$y_1 = 77.169x_1 + 1.203\times10^5 \tag{1}$$

由式（1）可知模组的拟合灵敏度77.169 μV/g，且表2中每个测点的相对误差为

$$\varepsilon_1=\frac{|y_{1i}-77.169x_{1i}|}{y_{1i}}\times 100\%=\begin{bmatrix}56.718\\53.469\\47.427\\44.101\\29.601\\20.130\end{bmatrix}\% \tag{2}$$

其中：y_{1i}为标准加速度的值（i对应序号1、2、3、4、5、6）；x_{1i}为力学模组输出电压值；ε_1为相对误差。

由式（2）可以看出，依据拟合灵敏度得到的测量值相对误差最大，达到了56.718%。

根据图4给出的曲线，发现标传1#与力学模组两位置的积分速度是一样的，对标准系统的输出加速度和力学模组的输出电压进行一次积分，即

$$\begin{cases}A=\int a(t)\mathrm{d}t\\U=\int u(t)\mathrm{d}t\end{cases} \tag{3}$$

利用最小二乘法，对表2的数据拟合，求得拟合曲线方程为

$$a(t)=ku(t)+b \tag{4}$$

其中：k为斜率；b为截距。在拟合直线式（4）中，斜率k即为力学模组加速度灵敏度，灵敏度数据见表3。

表 3　力学模组灵敏度数据表

Table 3　Mechanical module sensitivity data

序号	标传1#积分速度/（m·s⁻¹）	模组电压积分/（μV·s）	灵敏度/（μV·g⁻¹）
1	5.253	1 130.6	215.229
2	6.238	1 292.3	207.166
3	7.169	1 519.8	211.996
4	7.709	1 633.7	211.921
5	6.809	1 439.1	211.353
6	7.603	1 616.1	212.561

对表3数据进行最小二乘法拟合，拟合曲线如图8所示，曲线拟合公式为

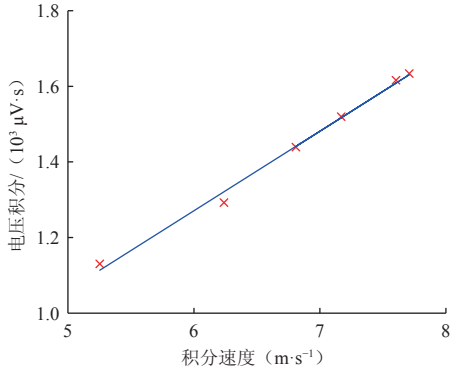


图 8　灵敏度最小二乘拟合曲线

Fig. 8　Sensitivity of least squares fitting curve

$$y=210.489x+7.936 \tag{5}$$

由式（5）可知，力学模组的灵敏度210.489 μV/g，且表3中每个测点的相对误差为

$$\varepsilon_2=\frac{|y_{2i}-210.489\cdot x_{2i}|}{y_{2i}}\times 100\%=\begin{bmatrix}2.202\\1.605\\0.711\\0.675\\0.408\\0.974\end{bmatrix}\% \tag{6}$$

其中：y_{2i}为标准传感器1#积分速度值（i对应序号1~6）；x_{2i}为力学模组积分值；ε_2为相对误差。

由式（6）可得6个测点中的最大相对误差为2.202%。参考速度不变法求得的灵敏度，离散化误差明显降低。根据此灵敏度求得的测量g值结果如表4所示。

表 4　力学模组测量g值表

Table 4　Measured g-values of mechanical module

序号	标传1#幅值/g	模组幅值/μV	模组幅值/g
1	829.6	147 914	702.7
2	1 294.9	214 751	1 020.2
3	2 136.1	313 547	1 489.6
4	2 705.1	373 441	1 774.2
5	3 555.8	389 779	1 851.8
6	4 852.5	468 843	2 227.4

由表4可知，由速度不变法得到的加速度灵敏度可有效确保速度测量的准确度，为加速度测量的准确校正提供了基础。

3　力学参数测量模组校正

3.1　校正模型

将力学模组的测量值作为输入，标准传感器1#的测量值作为输出，采用“子空间辨识–状态空间方法”建立力学模组的加速度校正模型。

1）数据矩阵构造

（1）将实测加速度序列$u(k)\in R^m$与真值加速度序列$y(k)\in R^p$按行块方式堆叠成Hankel矩阵，行数$2i$（通常取$i>n$，n为系统阶次），列数$j=N-2i+1$，

$$\boldsymbol{U}_{0|2i-1}=\begin{bmatrix}u_0&u_1&\cdots&u_{j-1}\\u_1&u_2&\cdots&u_j\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\u_{2i-1}&u_{2i}&\cdots&u_{2i+j-2}\end{bmatrix}\in\boldsymbol{R}^{2im\times j} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{Y}_{0|2i-1}=\begin{bmatrix}y_0&y_1&\cdots&y_{j-1}\\y_1&y_2&\cdots&y_j\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\y_{2i-1}&y_{2i}&\cdots&y_{2i+j-2}\end{bmatrix}\in\boldsymbol{R}^{2ip\times j} \tag{8}$$

（2）将式（7）和（8）的矩阵划分为“过去”和

“未来”两部分。

过去块式（9），包含从时刻0到$i-1$的全部输入/输出信息，代表“已观测历史”。

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{P}}=\boldsymbol{U}_{0|i-1}\in\boldsymbol{R}^{im\times j},\ \boldsymbol{Y}_{\mathrm{P}}=\boldsymbol{Y}_{0|i-1}\in\boldsymbol{R}^{ip\times j} \tag{9}$$

未来模块式（10），包含时刻i到$2i-1$的全部输入/输出信息，代表“未来响应”。

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{U}_{i|2i-1}\in\boldsymbol{R}^{im\times j},\ \boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{Y}_{i|2i-1}\in\boldsymbol{R}^{ip\times j} \tag{10}$$

（3）构造过去输入/输出的联合矩阵

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_{\mathrm{P}}\\ \boldsymbol{Y}_{\mathrm{P}}\end{bmatrix}\in\boldsymbol{R}^{2i\times j} \tag{11}$$

（4）对未来输出$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}}$进行正交投影，分离输入相关和状态相关部为

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}}/\boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}=\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}}-\boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}^{\dagger}\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}} \tag{12}$$

其中：$\boldsymbol{W}_{\mathrm{P}}^{\dagger}$为$\boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}$的伪逆。

2）子空间分解

（1）构造过去数据的投影矩阵为

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{p}}=\boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{W}_{P}^{\dagger} \tag{13}$$

（2）计算未来输出的投影残差为

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}}-\boldsymbol{L}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{Y}_{\mathrm{f}} \tag{14}$$

（3）对$\boldsymbol{R}_{\mathrm{f}}$或者$\boldsymbol{L}$进行SVD分解为

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{S}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

其中：$\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U}=\boldsymbol{I}$，$\boldsymbol{U}$为正交向量（左奇异向量）；$\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}=\boldsymbol{I}$，$\boldsymbol{V}$为正交向量（右奇异向量）。

$$\boldsymbol{S}_n=\mathrm{diag}(\sigma_1,\cdots,\sigma_n) \tag{16}$$

其中：$\boldsymbol{S}$为对角阵，非负奇异值按降序排列。

系统阶次n由贝叶斯信息准则（Bayesian Information Criterion，BIC）自动确定，即

$$n=\arg\min_{k}\left\{(2pi-k)\ln j+j\sum_{\ell=k+1}^{r}\ln\sigma_{\ell}^{2}\right\} \tag{17}$$

其中：$2ip$为输出维度；j为样本数，取使 BIC 最小的k作为最终阶次，再按此n截断$\boldsymbol{S}_n$、$\boldsymbol{U}_n$并继续状态序列提取。

（4）提取状态序列

定义扩展可观测性矩阵$\boldsymbol{\Gamma}_r=\boldsymbol{U}_{\mathrm{n}}\boldsymbol{S}_n^{1/2}$，则时刻$i$的状态序列估计为

$$\hat{\boldsymbol{X}}_i=\boldsymbol{S}_n^{1/2}\boldsymbol{U}_n\in\boldsymbol{R}^{n\times j} \tag{18}$$

3）系统矩阵（$\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}$，$\boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{D}$）的最小二乘估计为

$$\begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{X}}_{i+1}\\ \boldsymbol{Y}_{i|i}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}&\boldsymbol{C}\\ \boldsymbol{B}&\boldsymbol{0}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{X}}_{i}\\ \boldsymbol{U}_{i|i}\end{bmatrix} \tag{19}$$

其中：强制$\boldsymbol{D}=\boldsymbol{0}$以避免直接反馈。通过拟合得出系统矩阵（$\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}$，$\boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{D}$）后离散状态空间模型为

$$\begin{cases}x(k+1)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k})+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{k})\\ y(k)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k})\end{cases} \tag{20}$$

其中：$\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k})$为状态向量。

经上述步骤，得出校正模型最优阶数为5，并估计出离散状态空间模型参数，采样频率1 MHz。该校正模型的等价离散传递函数为

$$G(z)=\frac{-14\,737.75z^{-1}+1.071\,6\times10^{9}z^{-2}-3.481\,8\times10^{14}z^{-3}+1.740\,7\times10^{19}z^{-4}+1.401\,1\times10^{23}z^{-5}}{1+31\,759.09z^{-1}+5.556\,7\times10^{9}z^{-2}+1.321\,9\times10^{14}z^{-3}+5.982\,9\times10^{19}z^{-4}+1.396\,6\times10^{23}z^{-5}} \tag{21}$$

力学模组测试加速度校正后结果如表5所示。校正后，与标准传感器1#相比，幅值最大误差1.64%，脉宽最大误差3.40%。

表 5　加速度校正结果

Table 5　Acceleration correction results

标传1#幅值/g	标传1#脉宽/ms	校正后模组幅值/g	校正后模组脉宽/ms	幅值误差/%	脉宽误差/%
829.6	2.672	829.0	2.675	0.07	0.11
1 294.9	2.236	1 273.7	2.312	1.64	3.40
2 136.1	1.403	2 153.0	1.412	0.79	0.64
2 705.1	1.207	2 714.8	1.201	0.36	0.50
3 555.8	0.958	3 565.3	0.971	0.27	1.36
4 852.5	0.805	4 849.8	0.803	0.06	0.25

3.2　模型验证

采用同样的方法进行验证，由图9可知，在加速度脉冲作用下，力学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（21）的模型对图9的曲线进行校正，校正后的数据见表6。

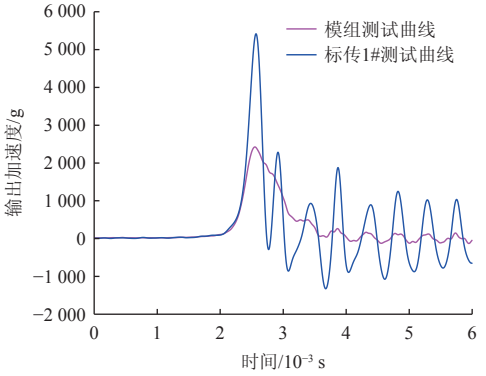


图 9　校正前对比曲线

Fig. 9　Comparison curve before correction

表 6 力学模组验证试验数据表

Table 6 Mechanical module verification experimental data

标传1#幅值/g	标传1#脉宽/ms	校正前模组幅值/g	校正前模组脉宽/ms	校正后模组幅值/g	校正后模组脉宽/ms
5 407.3	0.766	2 414.1	1.682	5 426.5	0.772

校正后的数据与标准传输曲线对比如图10所示。校正后的力学模组的输出与标准传感器1#的输出主脉冲的相关系数为99.77%。

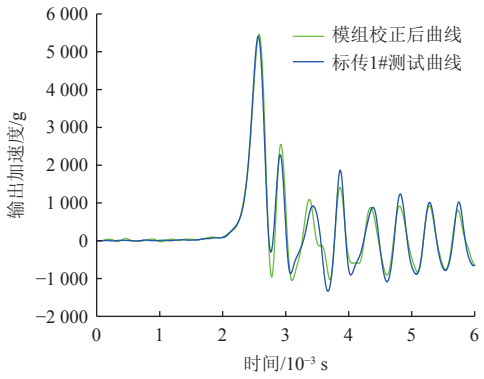


图 10 标传1#与校正后对比曲线

Fig. 10 Comparison curves of standard sensor #1 before and after correction

4 不确定度分析

4.1 灵敏度校准不确定度分析

根据GJB 2749A—2020[20]、ISO/IEC GUIDE 98-3 2008[21]对力学参数测量模组冲击灵敏度的校准不确定度评定。

1）相对标准不确定度

分析校准方法，影响力学参数测量模组灵敏度测量不确定度的主要因素有最小二乘法引起的不确定度u_1、标准传感器引起的不确定度u_2、电荷放大器引起的不确定度u_3、数据采集器引起的不确定度u_4。

（1）最小二乘法引起的不确定度u_1

参考速度不变法得出的灵敏度210.489 μV/g，结合表3数据，根据最小二乘法理论，则电压测量标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i)^2}{n-t}} = 15.45\ \mu\text{V} \tag{22}$$

最小二乘法拟合时不定乘数矩阵为

$$D = (A^{\mathrm{T}}A)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.022\,8 & -0.132\,7 \\ -0.132\,7 & 0.915\,8 \end{bmatrix} \tag{23}$$

于是灵敏度系数标准差为

$$\sigma_1 = \sigma\sqrt{d_{11}} = 15.45 \times \sqrt{0.022\,8} = 2.33 \tag{24}$$

则其不确定度u_1为

$$u_1 = \frac{2.33}{210.489} = 1.11\% \tag{25}$$

（2）标准传感器引起的不确定度u_2

根据标准加速度传感器的校准证书，其测量不确定度$u_{c1} = 1.5\%$，其标准不确定度按B类评定为

$$u_2 = u_{c1} = 1.5\% \tag{26}$$

（3）电荷放大器引起的不确u_3

电荷放大器的使用手册指出，在输入电荷≥100 pCFS时，其测量最大误差为±1%，取均匀分布，即

$$u_3 = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.58\% \tag{27}$$

（4）数据采集器引起的不确定度u_4

数据采集器引起的不确定度属于B类评定，使用的数据采集器带宽16 bit，标准不确定度为

$$u_4 = \frac{1/2}{2^{15}/\sqrt{3}} = 0.000\,88\% \tag{28}$$

2）相对合成不确定度

由于不确定度分量u_1、u_2、u_3、u_4相互独立，即相关系数为0，则合成不确定度为

$$u_{c1} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 1.95\% \tag{29}$$

4.2 校正模型不确定度分析

校准模型的不确定度源于多个输入量的不确定度的综合作用，其标准不确定度u_5为

$$u_5 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i}\right)^2}{n-1}} \times 100\% = 0.71\% \tag{30}$$

4.3 系统总不确定度分析

校准系统的合成不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_{c1}^2 + u_5^2} = 2.08\% \tag{31}$$

根据GB/T 20485.13（ISO 16063-13）的要求，取包含因子$k = 2$，则整个系统相对扩展不确定度为

$$U = ku_c = 4.16\% \tag{32}$$

5 结 论

本文针对月壤力学参数测量模组因灌封引发的非线性问题，开展了系统的校准技术研究。采用“共面激励法”将待测力学模组与标准加速度计对称布置于冲击

放大器的可动台面上，在共面激励脉冲的作用下，完成对力学模组的动态校准试验。采用传统校准方法对力学模组进行多点标定计算灵敏度，模组的拟合灵敏度77.169 μV/g，拟合灵敏度的相对误差最大达到了56.718%；参考速度不变法拟合得到灵敏度210.489 μV/g，拟合灵敏度的相对误差最大为2.202%，测量值相对误差明显降低。在采用传统校准方法对测量系统进行多点标定计算单点灵敏度的基础上，引入“子空间辨识–状态空间法”建立系统的离散状态空间模型，对力学模组测量加速度值进行校正。经模型校正后，与标准传感器相比幅值最大误差1.64%，脉宽最大误差3.40%，验证数据中主脉冲的相关系数达到了99.77%，有效抑制因灌封引发的动态特性非线性问题；力学模组测量值的相对扩展不确定度4.16%，满足月壤原位探测的技术指标要求。

参考文献

[1] 李茂登，张兴华，丁运来，等. 地外星表探测器着陆-巡视自主导航技术研究进展[J]. 深空探测学报(中英文)，2025，12(2)：110-123.
Li M D，Zhang X H，Ding Y L，et al. Research progress on autonomous navigation technology for extraterrestrial surface probe landing and patrol[J]. Journal of Deep Space Exploration，2025，12(2)：110-123.

[2] 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)：1-11.

[3] 黄翔宇，徐超，郭敏文. 地外天体软着陆自主导航与控制技术研究进展[J]. 深空探测学报(中英文)，2024，11(1)：3-15.
Huang X Y，Xu C，Guo M W. Research progress on autonomous navigation and control technology for extraterrestrial soft landing[J]. Journal of Deep Space Exploration，2024，11(1)：3-15.

[4] Yin C H，Schiavone P，Quan Q Q，et al. Normal force on the asteroid regolith generated by the impact of lander footpad[J]. Acta Astronautica，2023，202：229-251.

[5] 姜生元，张伟伟，杨宇彬，等. 动能侵彻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 S Y，Zhang W W，Yang Y B，et al. Research progress on kinetic-penetration-based in-situ probing technology for lunar regolith physical properties[J]. Journal of Deep Space Exploration，2022，9(2)：114-122.

[6] Brisset J，Sánchez P，Cox C，et al. Asteroid regolith strength：role of grain size and surface properties[J/OL]. Planetary and Space Science，2022，220：105533. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063322001192.

[7] 何成旦，李亚胜，温智，等. 月球极区冻结模拟月壤物理力学特性研究[J]. 冰川冻土，2021，43(6)：1773-1781.
He C D，Li Y S，Wen Z，et al. Study on physical and mechanical properties of frozen lunar polar regolith simulant[J]. Journal of Glaciology and Geocryology，2021，43(6)：1773-1781.

[8] Just G H，Smith K，Joy K H，et al. Parametric review of existing regolith excavation techniques for lunar In Situ Resource Utilisation (ISRU)and recommendations for future excavation experiments[J/OL]. Planetary and Space Science，2020，180：104746. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003206331930162X.

[9] Slyuta N E. Physical and mechanical properties of the lunar soil(a review)[J]. Solar System Research，2014，48(5)：330-353.

[10] Surkov Y A，Kremnev R S. Mars-96 mission：Mars exploration with the use of penetrators[J]. Planetary and Space Science，1998，46(11-12)：1689-1696.

[11] Shiraishi H，Tanaka S，Fujimura A，et al. The present status of the Japanese penetrator mission：LUNAR-A[J]. Advances in Space Research，2008，42(2)：386-393.

[12] Crawford I，Smith A. MoonLITE：a UK-led mission to the Moon[J]. Astronomy & Geophysics，2008，49(3)：311-314.

[13] Smrekar S，Catling D，Lorenz R，et al. Deep Space 2：the Mars microprobe mission[J]. Journal of Geophysical Research，1999，104(E11)：27013-27030.

[14] Spohn T，Knollenberg J，Ball A J，et al. Thermal and mechanical properties of the near-surface layers of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko[J/OL]. Science，2015，349(6247)：aab0464. https://www.science.org/doi/10.1126/science.aab0464.

[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 lunar regolith density inversion based on penetrative detection[D]. Taiyuan：North University of China，2024.

[16] 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. Simulation study on inversion of relative density and thermal conductivity of lunar regolith simulant based on penetration heat[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2023.

[17] Li R L，Chen J，Zhang J R，et al. Cone penetration resistance of CUMT-1 lunar regolith simulant under magnetic-similitude lunar gravity condition[J]. Acta Geotechnica，2023，18：6725-6744.

[18] Jiang M J，Xi B L，Lei H Y. Investigation of gravity effect on penetration resistance in Tongji-1 lunar regolith simulant by centrifuge tests[J]. Advances in Space Research，2018，61(6)：1234-1245.

[19] 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 missile-borne recorder protection system under high impact loading[J]. Explosion and Shock Waves，2019，39(12)：117-125.

[20] 国家质量监督检验检疫总局. 冲击试验机检定规程：GJB 2749A-2020[S]. 北京：国家军用标准出版部，2020.

[21] IX-ISO. ISO/IEC GUIDE 98-3：2008 uncertainty of measurement—part 3：guide to the expression of uncertainty in measurement(GUM)[S]. Geneva：ISO，2008.

作者简介：

祁旗(2000–)，女，硕士研究生，主要研究方向：动态测试与校准。
通信地址：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(030051)
E-mail：2924938667@qq.com

范锦彪(1974–)，男，教授，硕士生导师，主要研究方向：动态测试理论、智能测控技术、冲击测试与校准技术。**本文通信作者**。
通信地址：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(030051)
E-mail：fjb@nuc.edu.cn

Calibration for a Lunar Soil Mechanical Parameter Measurement Module Based on Velocity Parameters and Coplanar Excitation

Qi Qi[1]，Zhang Binbin[2]，Fan Jinbiao[1]，Jiang Shengyuan[3]，Zhang Weiwei[3]

（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：In lunar in-situ exploration missions，the resin potting used in mechanical modules to withstand high-impact penetration environments induces nonlinear sensor responses，compromising the accuracy of acceleration signal measurements. To address this issue，this paper proposes a ‘co-planar excitation’ dynamic calibration method based on velocity parameters was proposed. The calibrated module and a standard accelerometer were symmetrically mounted on the movable platform of a shock amplifier. When the excitation pulse width exceeded 0.5 ms，both devices experienced identical acceleration and velocity，constituting co-planar excitation. Based on the principle of velocity invariance，the sensitivity of the calibrated module was determined via least squares fitting. Subsequently，a dynamic correction model was established using the Subspace Identification-State Space Method（SI -SSM）. Without relying on the mechanical parameters of the potting material，this model adaptively captures the nonlinear characteristics of the sensor response through discrete state equations，thereby correcting the acceleration output. The expanded uncertainty of the corrected measurements from the mechanical module is 4.16%，meeting the technical requirements for lunar in-situ exploration.

Keywords：acceleration calibration；co-planar excitation method；subspace identification and state-space method；mechanical parameter measurement module

Highlights：

- ‘Co-planar excitation’ calibration method was proposed，establishing > 0.5 ms as the equivalent excitation pulse signal in an impact environment.
- Sensitivity calibration of the mechanical module was performed，based on the constant velocity method and least squares fitting.
- Combining subspace identification and state space methods（SI-SSM），a correction from sensitivity to nonlinear dynamic compensation was established.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：宋利辉]