

基于 MEMS 传感器的月震计安装水平和定向方案的研究

胡星星, 滕云田, 周鹤鸣, 朱 荣, 刘高川

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要 中国月震计宜于采用 MEMS 加速度计作为拾震传感器, 以满足对重量、体积、功耗和可靠性等方面的要求. 在无人登月探测中, 为免使月震计的投放装置过于复杂, 也为减小月震计系统的重量、体积和功耗, 以及增加系统工作的稳定性和可靠性, 不给月震计增加机械的水平 and 定向调节装置, 本文根据机器人理论, 通过旋转变换, 论证了可以从倾斜、非定向安装的月震计观测到的月震波得到以月球北极为参考方向的水平坐标系的观测, 并从实验上作了部分验证, 从而为这一难题的解决找到一条可行的探索途径.

关键词 坐标变换, 月震计, 月震波, 水平和定向方案

中图分类号 P68, P184

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)05-1487-07

A study of the horizontal and directional installation scheme for the moon seismometer based on MEMS sensors

HU Xing-xing, TENG Yun-tian, ZHOU He-ming, ZHU Rong, LIU Gao-chuan

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract It is difficult to insure that the moon seismometer placed by a robot is horizontal, and it is also difficult to add a mechanical horizontal and directional controller for the moon seismometer because of the restrictions of its weight, size and so on. To resolve this problem, according to the robotic theory, the paper suggests to get the moonquake waves in the horizontal plane coordinate in which the reference direction is the north pole of the moon by coordinate rotation transforming from the moonquake wave measured in the oblique coordinate.

Keywords coordinate transform, moon seismometer, moon quake waves, horizontal and directional scheme

0 引言

中国计划于 2012 年发射月球软着陆器和月面巡视器(月球车), 进行不载人月球探测^[5]. 月震观测是其中的重要内容, 人类对月球内部结构的认识是通过月震波在月球内部传播的速度变化推导得到的^[6,7], 迄今, 人类关于月球的知识 90% 来自“阿波罗”的贡献^[5]. 尽管目前基于机械重锤拾震结构的地震计(“摆式”地震计)技术已相当成熟, 但由于在重量、体积、功耗、抗震性能及投放安装技术等诸多方面的制约, 中国月震仪传感器宜于采用 MEMS 加速度计作为拾震器^[4]. MEMS 是微电子机械系统(Micro Electro Mechanical Systems)的缩写. 微电子机械系统(MEMS)技术是建立在微米/纳米技术(mi-

cro/nanotechnology)基础上的 21 世纪前沿技术, 是指对微米/纳米材料进行设计、加工、制造、测量和控制的技术. 它可将机械构件、光学系统、驱动部件、电控系统集成成为一个整体单元的微型系统^[3]. 以集成电路工艺和微机械加工工艺为基础制作的微机械加速度计作为月震传感器, 不但能适应月震计体积小、重量轻、功耗小、抗冲击等要求, 而且还具有频带宽、过载能力强, 可在任意倾角下工作, 工作前不需精确的水平调整. 随着制造技术的不断进步, MEMS 加速度计的分辨率等性能也得以迅速提高, 在欧洲的火星探测器中, 就将部分使用高精度的 MEMS 加速度计作为拾震传感器, 其分辨率达 $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 相当于 $10^{-8} g$ (g 为地球重力加速度).

在月震观测中, 希望得到的观测结果是以月球

北极为参考方向和以月平面为坐标平面的水平直角坐标系中的观测. 而在中国的无人月球探测中, 由机械手投放的月震计不可避免要产生一定的倾斜, 投放方向也难以得到保证. 在以往的阿波罗登月探测中, 月震计由宇航员在登月舱外人工架设安置(图 1). 欧洲计划的火星探测器, 因其任务较为单一而设计有复杂的水平和定向调节装置(图 2), 不适宜中国月震计的采用. 为尽量减小中国月震计的重量、体积和功耗, 以及增强其稳定可靠性, 不给月震计增加机械的水平和定向调节装置, 根据机器人理论, 本文通过坐标变换的方法, 找到从无定向、倾斜月震计测出的月震波得到以月球北极为参考方向的水平直角坐标系中的观测的一条可行的探索思路.

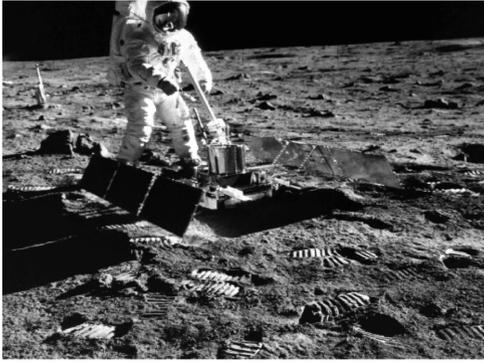


图 1 美国 Apollo 宇航员安置月震仪
Fig. 1 Moon seismometer placed by Apllo astronaut



图 2 欧洲火星探测传感器
Fig. 2 Mars sensor of Europe

1 月震波水平坐标变换的数学原理

如图 3 所示, 设月震计两水平分量所在直线 OA'' 、 OB'' 与水平面的夹角分别为 α 、 β , 斜面 $OA''C''B''$ 为两分量所在平面. 取 O 为坐标原点, 以 OA'' 为 X'' 轴, OB'' 为 Y'' 轴, 建立空间直角坐标系 III. 然后斜面 $OA''C''B''$ 以 OY'' (OB'') 为轴右旋, 设旋转 θ 角度

($-180^\circ < \theta < 180^\circ$) 后直线 OA'' 落入水平面的位置为 OA' , 斜面 $OA''C''B''$ 经旋转变为 $OA'C'B'$. 这时以 OA' 为 X' 轴、 OB' 为 Y' 轴建立空间直角坐标系 II, 其中 OB' 与 OB'' 重合, OY' 轴与 OY'' 轴重合, 如图 4 所示. 平面 $OA'C'B'$ 再以 OX' (OA') 为旋转轴左旋 β 角 ($-180^\circ < \beta < 180^\circ$) 后平面 $OA'C'B'$ 便全部落入水平面内的位置 $OACB$, 以 OA 为 X 轴、 OB 为 Y 轴建立空间直角坐标系 I, 如图 5 所示. 其中 OA 与 OA' 重合, OX 轴与 OX' 轴重合. 显然, OY 轴就是 OY'' 轴在水平面上的投影.

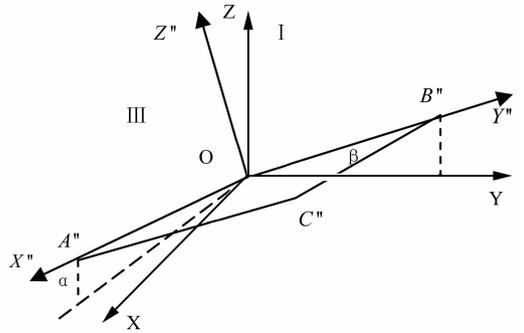


图 3 倾斜月震计的坐标平面
Fig. 3 Coordinate of tilted moon seismometer

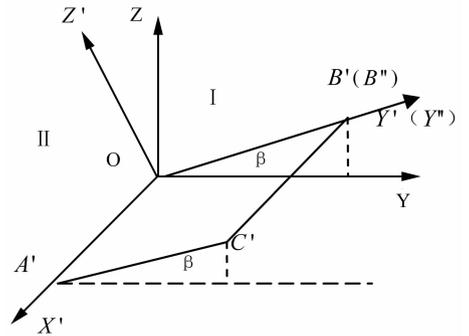


图 4 绕 Y'' 轴旋转 θ 角后的月震计平面
Fig. 4 Plane of moon seismometer apter rotation by angly θ about Y'' axis

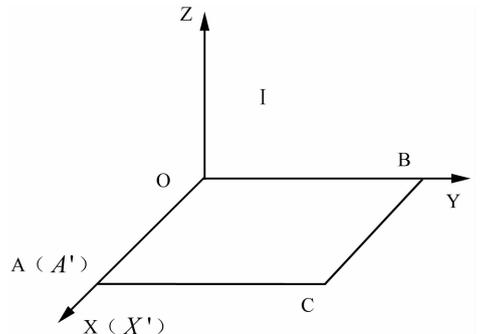


图 5 再绕 X' 轴旋转 β 角后月震计平面与水平面重合
Fig. 5 Plane of moon seismometer coincident eith horizontal after another rotation of angle β about X' axis

由高等数学知识不难得到,倾斜面 $OA''C''B''$ 在水平面直角坐标系 I (坐标系 $OXYZ$) 中的法向量 $\mathbf{n}_{OA''C''B''}$ 为(取“向上”方向为正方向)^[4]

$$\mathbf{n}_{OA''C''B''} = -\sin\alpha \sec^2\beta \mathbf{i} - \tan\beta \sqrt{1 - \sin^2\alpha - \sin^2\alpha \tan^2\beta} \mathbf{j} +$$

$$+ \sqrt{1 - \sin^2\alpha - \sin^2\alpha \tan^2\beta} \mathbf{k}, \quad (1)$$

而斜面 $OA'C'B'$ 在直角坐标系 I 中的法向量 $\mathbf{n}_{OA'C'B'}$ 为

$$\mathbf{n}_{OA'C'B'} = -\tan\beta \mathbf{j} + \mathbf{k}, \quad (2)$$

平面 $OA''C''B''$ 至 $OA'C'B'$ 的旋转角 θ 即这两平面的夹角,等于这两平面法向量的夹角,所以有

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \frac{\mathbf{n}_{OA'C'B'} \cdot \mathbf{n}_{OA''C''B''}}{|\mathbf{n}_{OA'C'B'}| |\mathbf{n}_{OA''C''B''}|} \\ &= \frac{(-\sin\alpha \sec^2\beta \mathbf{i} - \tan\beta \sqrt{1 - \sin^2\alpha - \sin^2\alpha \tan^2\beta} \mathbf{j} + \sqrt{1 - \sin^2\alpha - \sin^2\alpha \tan^2\beta} \mathbf{k}) \cdot (-\tan\beta \mathbf{j} + \mathbf{k})}{\sqrt{\sin^2\alpha \sec^4\beta + \tan^2\beta(1 - \sin^2\alpha - \sin^2\alpha \tan^2\beta)} + (1 - \sin^2\alpha - \sin^2\alpha \tan^2\beta) \sqrt{1 + \tan^2\beta}} \\ &= \frac{(1 + \tan^2\beta) \sqrt{1 - \sin^2\alpha - \sin^2\alpha \tan^2\beta}}{\sqrt{\sin^2\alpha \sec^4\beta + (1 + \tan^2\beta)(1 - \sin^2\alpha - \sin^2\alpha \tan^2\beta)} \sqrt{1 + \tan^2\beta}} \\ &= \frac{\sqrt{1 + \tan^2\beta} \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sec^2\beta}}{\sqrt{\sin^2\alpha \sec^4\beta + \sec^2\beta(1 - \sin^2\alpha \sec^2\beta)}} = \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sec^2\beta}, \end{aligned} \quad (3)$$

而

$$\sin\theta = \sqrt{1 - \cos^2\theta} = \sin\alpha \sec\beta, \quad (4)$$

被观测量 \mathbf{p} 在坐标系 I 中的描述 ${}^1\mathbf{p}$ (水平直角坐标系中的观测) 可由坐标系 III 中的描述 ${}^3\mathbf{p}$ (坐标系 III 的观测值,即实际月震计的观测值) 经两次旋转坐标变换求得,即有

$${}^1\mathbf{p} = {}^1_2\mathbf{R} \cdot {}^2_3\mathbf{R} \cdot {}^3\mathbf{p}, \quad (5)$$

其中旋转矩阵 ${}^1_2\mathbf{R}$ 是坐标系 II 相对于坐标系 I 的方位矩

阵, ${}^2_3\mathbf{R}$ 是坐标系 III 相对于坐标系 II 的方位矩阵。

由图 4 可见,坐标系 I 绕 X 轴右旋 β 角得坐标系 II,其旋转矩阵 ${}^1_2\mathbf{R}$ 为^[1]

$${}^1_2\mathbf{R} = \mathbf{R}(x, \beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\beta & -s\beta \\ 0 & s\beta & c\beta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

再由图 3 可知,坐标系 III 可由坐标系 II 绕 Y' 轴右旋 $(2\pi - \theta)$ 角而得,其旋转矩阵 ${}^2_3\mathbf{R}$ 为

$$\begin{aligned} {}^2_3\mathbf{R} = \mathbf{R}(y, 2\pi - \theta) &= \begin{bmatrix} c(2\pi - \theta) & 0 & s(2\pi - \theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -s(2\pi - \theta) & 0 & c(2\pi - \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sec^2\beta} & 0 & -\sin\alpha \sec\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha \sec\beta & 0 & \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sec^2\beta} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (7)$$

因此有

$$\begin{aligned} {}^1\mathbf{p} = {}^1_2\mathbf{R} \cdot {}^2_3\mathbf{R} \cdot {}^3\mathbf{p} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\beta & -s\beta \\ 0 & s\beta & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sec^2\beta} & 0 & -\sin\alpha \sec\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha \sec\beta & 0 & \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sec^2\beta} \end{bmatrix} {}^3\mathbf{p} \\ &= \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sec^2\beta} & 0 & -\sin\alpha \sec\beta \\ -\sin\alpha \tan\beta & \cos\beta & -\tan\beta \sqrt{\cos^2\beta - \sin^2\alpha} \\ \sin\alpha & \sin\beta & \sqrt{\cos^2\beta - \sin^2\alpha} \end{bmatrix} {}^3\mathbf{p}, \end{aligned} \quad (8)$$

即

$$\begin{bmatrix} {}^1x \\ {}^1y \\ {}^1z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sec^2\beta} & 0 & -\sin\alpha \sec\beta \\ -\sin\alpha \tan\beta & \cos\beta & -\tan\beta \sqrt{\cos^2\beta - \sin^2\alpha} \\ \sin\alpha & \sin\beta & \sqrt{\cos^2\beta - \sin^2\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^3x \\ {}^3y \\ {}^3z \end{bmatrix}, \quad (9)$$

写成分量式为

$$\begin{cases} {}^1x = \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sec^2\beta} \cdot {}^3x - \sin\alpha \sec\beta \cdot {}^3z \\ {}^1y = -\sin\alpha \tan\beta \cdot {}^3x + \cos\beta \cdot {}^3y - \tan\beta \sqrt{\cos^2\beta - \sin^2\alpha} \cdot {}^3z \\ {}^1z = \sin\alpha \cdot {}^3x + \sin\beta \cdot {}^3y + \sqrt{\cos^2\beta - \sin^2\alpha} \cdot {}^3z \end{cases} \quad (10)$$

经过以上的旋转坐标变换,可以把倾斜月震计所测出的月震波变换为以月水平面坐标系观测的月震波,当倾斜角 α, β 在开区间 $(-90^\circ, 90^\circ)$ 范围内时均可用上式计算. 上面的变换是使变换后的 y 轴方向跟变换前月震计 y 轴在水平面的投影指向一致. 或者也可以使变换后的 x 轴方向跟变换前月震计 x 轴在水平面的水平投影指向一致,这样,只要能够知道月震计 y 轴或 x 轴的水平指向,就可以再通过一次以竖直 z 轴为旋转轴的旋转变换,得到以任意水平坐标系观测到的月震波.

2 月震计的倾角解算

月震计的两个倾角可以由倾斜仪测量得出,也可以由加速度计的输解算出:

如图6所示, OX', OY', OZ' 是MEMS传感器的三个坐标轴, O 在水平面上, OA, OB, OC 是传感器测量的重力加速度的三分量向量, OG 是合成的总场强向量, A', B' 分别是 A, B 在水平面上的投影. 以

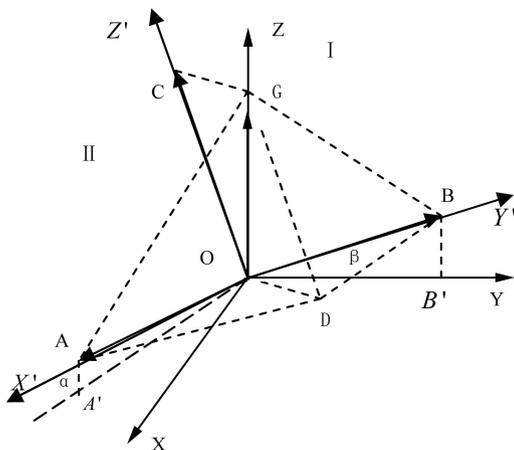


图6 计算月震计倾角的示意图

Fig. 6 Sketch of calculated dip angles of moon seismometer

OB' 为 y 轴、 OG (竖直方向)为 z 轴建立右手直角坐标系 XYZ , $\angle AOA', \angle BOB'$ 就是所要求的 OX' 轴和 OY' 轴的倾角. 由图6不难求出^[4]:

$$\begin{cases} \angle\alpha = \begin{cases} 0, \text{当 } \mathbf{OA} = 0 \text{ 时} \\ \angle AOA' = \frac{|\mathbf{OA}|}{|\mathbf{OA}|} \left(\frac{\pi}{2} - \angle GOA \right) = \frac{|\mathbf{OA}|}{|\mathbf{OA}|} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{|\mathbf{OA}|}{|\mathbf{OG}|} \right) \text{ 当 } \mathbf{OA} \neq 0 \text{ 时} \end{cases} \\ \angle\beta = \begin{cases} 0, \text{当 } \mathbf{OB} = 0 \text{ 时} \\ \angle BOB' = \frac{|\mathbf{OB}|}{|\mathbf{OB}|} \left(\frac{\pi}{2} - \angle GOB \right) = \frac{|\mathbf{OB}|}{|\mathbf{OB}|} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{|\mathbf{OB}|}{|\mathbf{OG}|} \right) \text{ 当 } \mathbf{OB} \neq 0 \text{ 时} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $|\mathbf{OG}| = \sqrt{|\mathbf{OA}|^2 + |\mathbf{OB}|^2 + |\mathbf{OC}|^2}$, $\frac{|\mathbf{OA}|}{|\mathbf{OA}|}$ 和 $\frac{|\mathbf{OB}|}{|\mathbf{OB}|}$ 用以确定 $\angle\alpha$ 和 $\angle\beta$ 的正负符号.

3 对水平变换结果的验证讨论

3.1 对变换结果的理论验证

设重力场中的月震计任意倾斜放置(z 轴向上), x', y', z' 分别为加速度计所测量的重力加速度 \mathbf{g} 的三个分量,设 x', y' 均不为零,由(11)式可得月震计 x, y 坐标轴与水平面的夹角分别为

$$\begin{cases} \angle\alpha = \frac{x'}{|x'|} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{|x'|}{\sqrt{|x'|^2 + |y'|^2 + |z'|^2}} \right) \\ \angle\beta = \frac{y'}{|y'|} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{|y'|}{\sqrt{|x'|^2 + |y'|^2 + |z'|^2}} \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\sqrt{|x'|^2 + |y'|^2 + |z'|^2} = |\mathbf{g}|$, 于是

$$\begin{cases} \sin\alpha = \frac{x'}{\sqrt{|x'|^2 + |y'|^2 + |z'|^2}} \\ \sin\beta = \frac{y'}{\sqrt{|x'|^2 + |y'|^2 + |z'|^2}} \end{cases}, \quad (13)$$

代入(10)式得

$$\begin{cases} x = \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sec^2\beta} \cdot x' - \sin\alpha \sec\beta \cdot z' \\ y = -\sin\alpha \tan\beta \cdot x' + \cos\beta \cdot y' \\ \quad - \tan\beta \sqrt{\cos^2\beta - \sin^2\alpha} \cdot z' \\ z = \sin\alpha \cdot x' + \sin\beta \cdot y' + \sqrt{\cos^2\beta - \sin^2\alpha} \cdot z' \end{cases}, \quad (14)$$

可得水平面参照系观测的重力场为

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \\ z = \mathbf{g} \end{cases}, \quad (15)$$

3.2 对变换结果的实验验证

把加速度计放在水平平台上,测量它在不同倾角姿态下的 x 、 y 坐标轴的倾角(通过用刻度尺量出

倾角正弦值,再计算出倾角)及相应姿态下的输出三分量加速度值(直流电压,用数字万用表测量),取竖直向上方向为 Z 轴正向,记录测量结果表 1 所示^[4].

表 1 实验测量结果

Table 1 Measurements of experiments

实验次数	X 轴倾角测量值(°)	Y 轴倾角测量值(°)	X 轴分量输出(g)	Y 轴分量输出(g)	Z 轴分量输出(g)
1	0	0	0.006	-0.002	1.302
2	180	0	-0.009	0.008	-1.145
3	0	180	-0.001	0.007	-1.145
4	90	0	1.181	-0.007	0.092
5	0	90	0.016	1.266	0.125
6	-90	0	-1.186	0.013	0.110
7	0	33.905	0.014	0.723	1.097
8	0	-34.093	0	-0.711	1.083
9	29.240	0	0.584	-0.004	1.146
10	-27.756	0	-0.545	0.005	1.168

由上表可以看出,各通道的灵敏度均不相同,且零重力场并不对应零的输出电压,因此要作线性修正.方法是:以 x 轴为例,使 x 轴竖直向上时对应的输出电压代表正向的重力场强 g ,使负 x 轴竖直向上时对应的输出电压代表负向的重力场强 $-g$,然后按下式算出各通道输出电压与重力场强的对应关系:

$$g_{\text{out}} = \frac{V_{\text{实测}} - \Delta V_{\text{偏移}}}{V_{\text{灵敏度}}}$$

式中 $V_{\text{实测}}$ 是上表中测出的各电压值, $V_{\text{灵敏度}}$ 是各通道的电压灵敏度,计算方法是用 x 轴竖直向上时的输出电压减去 x 轴竖直向下时的输出电压再

除以 $2g$,单位是 V/g .由上表数据可求出各分量的灵敏度为: X 轴为 $1.1835 V/g$, Y 轴为 $1.2660 V/g$ (未作线性修正), Z 轴为 $1.2235 V/g$. $\Delta V_{\text{偏移}}$ 是电压与重力场强的线性比例修正因子,其值等于坐标轴竖直向上的输出电压与坐标轴竖直向下时的输出电压的代数和再除以 2. g_{out} 是实测电压 $V_{\text{实测}}$ 时所代表的重力场强.因此表 1 可以记为表 2 的形式.

利用前面的推导结果,由加速度计的输出求出各次实验中重力加速度在水平直角坐标系中的观测如表 3 所示.

表 2 各倾角姿态下测量的各分量场强和总场强

Table 2 Field intensities measured for every dipping attitude

实验次数	X 轴倾角测量值(°)	Y 轴倾角测量值(°)	X 轴分量输出(g)	Y 轴分量输出(g)	Z 轴分量输出(g)	合成总场强(g)
1	0	0	0.0072	-0.0016	1.0000	1.0000
2	180	0	-0.0055	0.0063	-1.0000	1.0000
3	0	180	0.0013	0.0055	-1.0000	1.0000
4	90	0	1.0000	-0.0055	0.0110	1.0001
5	0	90	0.0156	1.0000	0.0380	1.0008
6	-90	0	-1.0000	0.0103	0.0257	1.0004
7	0	33.905	0.0139	0.5711	0.8324	1.0096
8	0	-34.093	0.0021	-0.5616	0.8210	0.9947
9	29.240	0	0.4956	-0.0032	0.8725	1.0034
10	-27.756	0	-0.4584	0.0039	0.8905	1.0015

表 3 由加速度计的输出求得的倾角及重力加速度在水平坐标系中的观测

Table 3 Dips from accelerator output and gravitational accelerations in the horizontal coordinates

实验次数	X 轴倾角(°)		Y 轴倾角(°)		计算出的水平 X 轴分量(g)	计算出的水平 Y 轴分量(g)	计算出的竖直 Z 轴分量(g)
	计算值	测量值	计算值	测量值			
1	0.4125	0	-0.0917	0	-0.0000	0.0000	1.0000
2	—	180	—	0	—	—	—
3	—	0	—	180	—	—	—
4	—	90	—	0	—	—	—
5	—	0	—	90	—	—	—
6	—	-90	—	0	—	—	—
7	0.7888	0	32.4105	33.905	0.0003	0.0359	1.0089
8	0.1210	0	-32.3488	-34.093	0.0000	-0.0351	0.9941
9	28.2996	29.240	-0.1827	0	0.0227	-0.0000	1.0032
10	-26.2251	-27.756	0.2231	0	-0.0177	0.0000	1.0014

在上述实验中,误差来源于实验平台并非完全水平、刻度尺测量倾角时的测量误差和读数误差、数据处理误差、电压表的精度误差以及由于实验条件所限 y 轴没有作线性修正、加速度计本身的非线性和横向效应带来的误差等,但实验结果还是令人相当满意的。

4 月震计安装的非机械定向方案研究

月球几乎不存在磁场(月球周围的磁场强度不及地球磁场强度的 1/1000)^[2],在月球上罗盘毫无用处.但月球有自转,因此可以用陀螺仪确定月震计的投放方向,即得到月震计 x 或 y 轴的水平投影跟月球子午线的夹角,然后以前述相似的坐标变换方法,从非定向坐标系的观测得到有参考方向的水平坐标系观测的月震波.设月震计 y 轴的水平投影方向与月球子午线(月球北极)的夹角为 θ,如图 7 所示,则无定向月震计的观测量¹P 与以月球北极为参考方向(以月球北极为 y 轴方向)的水平坐标系的观测量⁰P 之间关系为

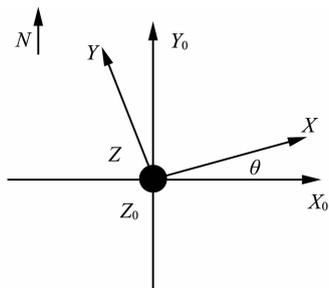


图 7 月震计坐标系的方位示意图

Fig. 7 Sketch of the coordinate direction of the moon seismometer

$${}^0\mathbf{P} = {}^0\mathbf{R}^1\mathbf{P} = \mathbf{R}(z, \theta) {}^1\mathbf{P} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{P}$$

对于月球,由于其自转周期约为 27 d,则其自转角速度是

$$\omega = \frac{\phi}{T} = \frac{360^\circ}{27\text{d} \times 24\text{h} \times 3600\text{s}} \approx 1.54 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{s}$$

而现代用于导航的光纤陀螺,其精度可达 0.002°/h,即 5.56×10⁻⁷°/s.

6 结论和讨论

采用坐标变换取代机械水平和定向调节装置,不但减小了月震计的重量、体积、功耗,而且简化了月震计的机械结构,给月震计系统增加了可靠性和工作稳定性.在实际应用中,利用月震计的输出计算倾角时,要用其直流分量,经滤波去除其噪声和交流月震信号,并要对月震计的输出进行灵敏度、线性和横向效应等的校正。

参 考 文 献 (References):

[1] 蔡自兴. 2000. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社:29~30.
Cai Z X. Robotics [M]. Beijing, Tsinghua university press, 2000,29~30.

[2] 程安云,王世杰,李雄耀,等. 月球南北两极研究进展与发展趋势[J]. 地球物理学进展,2007,22(4):1070~1074.
Cheng A Y, Wang S J, Li X Y, et al. Researches on Lunar Poles:Advances and Trends, Advance in Earth Sciences[J]. 2007,22(4):1070~1074.

[3] 董景新. 微惯性仪表-微机械加速度计[M]. 北京:清华大学出版社,2003,4~7.

- Dong J X. Micro inertial instruments and micromachined accelerometer[M]. Beijing, Tsinghua university press, :4~7.
- [4] 胡星星. 月震计关键技术预研[硕士学位论文]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2007.
- Hu X X. Advanced study of the key technology of the moon-quake prober. [Master's thesis]. Beijing, Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2007.
- [5] 欧阳自远. 空间探测进展和我国的月球探测[J]. 科学, 2007, 59(2): 1~6.
- Ouyang Z Y. The development of deep space exploring and China's explorations of the moon[J]. Science, 2007, 59(2): 1~6.
- [6] 占伟, 李斐. 月球内部构造研究综述[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 737~742.
- Zhan W, Li F. The inner structure of the moon, Advance in Earth Sciences[J]. 2007, 22(3): 737~742.
- [7] 鄢建国, 平劲松, 李斐, 等. 应用 LP165P 模型分析月球重力场特征及其对绕月卫星轨道的影响[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 408~414.
- Yan J G, Ping J S, Li F, *et al.* Character analysis of the lunar gravity field by the LP165P model and its effect on lunars satellite orbit[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2): 408~414.

查阅本刊网站获取详细信息
(<http://www.progeophys.cn>)

欢迎订阅《地球物理学进展》

2009年《地球物理学进展》为双月刊,每年6期,每期定价50元,全年定价为300元。

订刊联系方式

- (1) 本刊编辑部(邮局汇款与单位电汇均可)

汇款地址 100029 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部

电话传真 010-82998113, 010-82998105, 010-62369620

联系人 刘少华

电子邮件 shliu@cgs.org.cn, geophys@163.com

网 站 <http://www.progeophys.cn>

开户行 中国农业银行北京建德支行 账 号 190901040000456

收款单位 中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上:购《地球物理学进展》款,同时写上您的姓名和联系地址)

- (2) 天津全国非邮发联合证订服务部

邮编地址 300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

电话传真 022-23973378, 022-23962479

网 址 <http://www.LHZD.com>

E - mail LHZD@public.tpt.tj.cn