

〔制造技术研究〕

“嫦娥”着陆器悬停、避障、缓降试验中的姿态和位置测量

刘建新 阮国伟

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)



摘要: 针对“嫦娥”着陆器悬停、缓降、避障试验过程中的姿态和位置测量需求, 提出了全站仪、经纬仪及陀螺经纬仪三种测量方案。分别给出了测量计算数学模型, 分析了测量系统误差, 并对每一测量方案优劣性进行了评估, 确定了最佳测量方案。

关键词: 姿态测量; 全站仪; 经纬仪; 陀螺经纬仪

Comparative Analyses of the Measurement Schemes for the Test of Hang-Staying, Slow Landing and Obstacle-Shunning of “CE” Landing Module

Liu Jianxin Ruan Guowei

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094)

Abstract: In this paper, aimed at measure requirement of hang-staying, slow landing and obstacle-shunning, three kinds of measurement schemes, which are total station, electronic-theodolite and gyro-theodolite, are put forward. For each scheme, the calculating model is educed, the system error of the measurement is analysed, the advantage or disadvantage are evaluated. The best scheme is selected at last.

Key words: attitude measurement; total station; theodolite; gyro-theodolite

1 引言



图1 “嫦娥”着陆器悬停、避障、缓降试验

在“嫦娥”着陆器悬停、避障、缓降试验过程中(图1), 需要对其姿态和位置进行控制, 着陆器在行进过程中的姿态、位置测量和控制是通过器上控制系统来实现的, 但是器上控制系统无法直接获得其初始姿态和位置, 必须以另外的技术手段在地面测量出来, 并作为初始参数输入到器上控制系统软件中。本文提出了对着陆器初始姿态和位置测量的几种方法, 并对测量精度进行了分析比较。

2 着陆器器体初始姿态和位置的表示

着陆器器体初始姿态和位置的表示是指器体相

作者简介: 刘建新(1970-), 高级工程师, 机械电子工程专业; 研究方向: 航天器总装测试试验。

收稿日期: 2012-11-13

对大地地理坐标而言,通过器体机械坐标系和试验场大地坐标系之间的关系来描述,一般采用欧拉角表征姿态角,坐标原点值表征位置量,以矩阵方式表示,记为 M_x 。为表征测量结果,引入三个坐标系:器体机械坐标系,试验场大地坐标系,测量辅助坐标系。器体机械坐标系通过着陆器本体结构象限及质心位置来定义,是整器结构设计基准。为了进行实体化测量,在着陆器总装期间,安装一个基准立方镜并进行了基准转换。试验场大地坐标系:在试验场建设期间,设置了大地测量点,并由大地测绘测出其大地坐标值,由此可确定大地坐标系。辅助坐标系:在着陆器表面设置了三个辅助测量点 $A、B、C$,三点可构成一个坐标系,是为了测量器体机械坐标系相对试验场大地坐标系姿态和位置关系的过渡坐标系。着陆器测量基准位置见图 2。

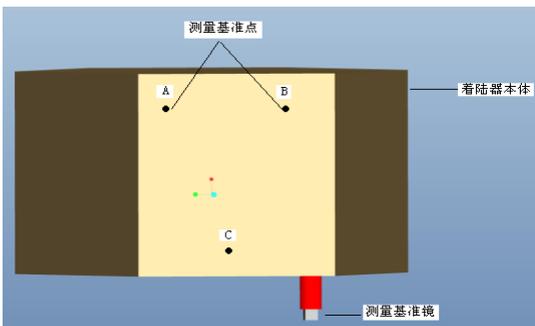


图 2 着陆器测量基准位置示意图

3 测量方法

经过对试验场实地勘察、分析、比较,提出了三种测量方案:全站仪测量法、电子经纬仪测量法、陀螺经纬仪测量法。仪器设备实物图分别见图 3、图 4、图 5。



图 3 全站仪



图 4 电子经纬仪



图 5 陀螺经纬仪

3.1 全站仪测量方案

3.1.1 测量方法及原理

测量前,先将全站仪在试验场固定位置放置,要求进行水平调节并对准大地中心点固定。

三个测量点 $A、B、C$ 布设在能够被全站仪接受光信号的反射片上,而后粘贴在着陆器器体上。当全站仪对准 $A、B、C$ 中的任意一点时,全站仪上的激光测距仪可测出被测点相对全站仪中心的距离,测角编码器可以测出被测点相对全站仪中心的水平偏角和垂直偏角。

设被测点在试验场大地坐标系的位置坐标为 $P(x_i, y_i, z_i)(i=A, B, C)$, 则坐标值 (x_i, y_i, z_i) 可由公式 (1) 计算得出:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_i \sin \beta_i \\ -L_i \cos \beta_i \cos \alpha_i \\ -L_i \cos \beta_i \sin \alpha_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: L_i ——被测点相对全站仪中心的距离; α ——被测点相对全站仪中心的水平偏角; β ——被测点相对全站仪中心的垂直偏角; (x_0, y_0, z_0) 是全站仪中心点在试验场大地坐标系的坐标值,已通过大地测绘得到。

测量出星上三个辅助点的坐标值后,即可构建星上辅助坐标系相对试验场大地坐标系的关系矩阵 $M_i = (n_1, n_2, n_3, b_0)^T$, 其中 $n_1、n_2、n_3$ 表示三个坐标轴姿态矢量, b_0 表示坐标原点,可选 $A、B、C$ 三点的任意一点作为坐标原点。三个坐标轴的确立方法如下:

$A、B、C$ 三点可确立一个平面,设平面方程为 $ax + by + cz + 1 = 0$, 则 $n_1 = (a, b, c)^T$, 本案中,虽可直接将 $A、B、C$ 三点坐标代入平面方程求出 n_1 , 但更为严格科学的方法是利用最小二乘法原理确定;由于法向量垂直平面内的任意直线,可作 $B、C$ 连线确定 n_2 , 即 $n_2 = (x_B - x_C, y_B - y_C, z_B - z_C)^e$;

由右手法则通过矢量叉乘可求得 n_3 , 即 $n_3 = (n_1 \times n_2)^T$ 。

同理，如果确定了 A、B、C 三点在器体机械坐标系下的坐标值，即可构建辅助坐标系相对器体机械坐标系的关系矩阵 M_2 。（A、B、C 三点在器体机械坐标系下的坐标值是在着陆器试验前的总装工作期间测量完成的）。

器体机械坐标系相对试验场大地坐标系之间的关系矩阵为：

$$M_x = (M_1 \times M_2^{-1})^T \quad (2)$$

3.1.2 全站仪测量精度分析

$$m_x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \beta}\right)^2 \sigma_\beta^2} = \sqrt{(\sin \beta)^2 \sigma_L^2 + (L \cos \beta)^2 \sigma_\beta^2} \quad (4)$$

$$m_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \beta}\right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right)^2 \sigma_\alpha^2} \\ = \sqrt{(\cos \alpha \cos \beta)^2 \sigma_L^2 + (L \sin \beta \cos \alpha)^2 \sigma_\beta^2 + (L \sin \alpha \cos \beta)^2 \sigma_\alpha^2} \quad (5)$$

$$m_z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \beta}\right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right)^2 \sigma_\alpha^2} \\ = \sqrt{(\cos \beta \sin \alpha)^2 \sigma_L^2 + (L \sin \alpha \sin \beta)^2 \sigma_\beta^2 + (L \cos \beta \cos \alpha)^2 \sigma_\alpha^2} \quad (6)$$

根据具体的全站仪距离和角度信息以及其系统精度技术指标，可估算出其点位测量精度约为 2mm。

由于器体相对试验场大地姿态角度信息由矩阵 M_x 表征，由 3.1.1 节可知，姿态角是通过测量点拟合计算而得，由于计算环节较多，如果用误差合成原理推导测量系统误差则过于复杂繁琐，因此，可采取测量标准不确定度的 A 类评定方法，即统计分析一系列实测数据，求出其标准差来评定角度测量不确定度。实际测量中，分两次测量了 30 组测量数据，用贝赛尔公式估算出其角度标准偏差为 2.2'，即为姿态角的测量误差。

从以上分析结果可以看出，对于着陆器的姿态测量精度要求而言，全站仪的测量精度不甚理想。

3.2 电子经纬仪测量方案

3.2.1 测量方案及原理

电子经纬仪测量法不同于全站仪之处在于电子经纬仪没有激光测距功能，一台电子经纬仪不能直接测出点位坐标，需要用两台经纬仪定标后通过角度解算出被测点的坐标值，且测量范围只有十几米，远小于全站仪；但电子经纬仪具有准直测角功能，不需要通过辅助点即可测量着陆器的姿态角，测量精度远优于全站仪。通过对试验场实地考察，确定满足电子经纬仪测量条件，测量方法及步骤如下：

a. 在试验场合合适位置架设固定两台经纬仪 T1、

试验中采用的是 TCA2003 型全站仪，其精度技术指标为：测量范围 60~180m；测距标准差 $0.8\text{mm} + 1 \times 10^{-6}D$ （D 为全站仪到被测点的距离）；角度编码器测角精度为 0.5"。

全站仪点位测量精度分析：根据误差合成原理，全站仪的点位精度 m_p 可表示为：

$$m_p = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} \quad (3)$$

根据公式 (1) 可推断：

T2，要求两台经纬仪能较好地同时观测到大地测量点以及器体基准镜的中心点，其中经纬仪 T1 还要能够与器体基准镜进行准直测量。

b. 在器体基准镜的另一垂直方向架设经纬仪 T3，要求能够与器体基准镜进行准直测量。经纬仪 T1、T3 分别准直测量器体基准镜并进行精确对瞄，在提取各个步骤的经纬仪水平角 α 和垂直角 β 之后，经过简单数学运算可建立器体机械坐标系相对经纬仪测量坐标系的矢量矩阵 M_t 。

c. 用一根已知长度的基准尺对经纬仪 T1、T2 进行定标，建立经纬仪点位测量坐标系。

d. 经纬仪 T1、T2 分别同时观测大地测量点以及器体基准镜的中心点，由公式 (7) 可得到大地测量点以及器体基准镜的中心点在经纬仪坐标系下的坐标值。

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{L \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\ y &= \frac{L \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\ z &= \frac{L}{2} \left(\frac{\sin \alpha_2 \cdot \tan \beta_1 + \sin \alpha_1 \cdot \tan \beta_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} + \frac{\tan \beta_1 + \tan \beta_2}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 分别是经纬仪 T1 和经纬仪 T2 的水平角和竖直角， L 是通过定标求得的经纬仪基线距离。

设器体基准镜中心在经纬仪坐标系下的坐标值为 x_i 、 y_i 、 z_i ，试验场大地点在经纬仪坐标系下的坐标值为 x_i 、 y_i 、 z_i ，则试验场大地点在器体机械坐标系下的坐标值为 x_j 、 y_j 、 z_j ，可以表示为：

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = M_t^{-1} \begin{bmatrix} x_i - x_t \\ y_i - y_t \\ z_i - z_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： x_0 、 y_0 、 z_0 为基准镜中心点在器体机械坐标系下的坐标值，为器体总装期间测得数据。

测得试验场大地坐标点在器体机械坐标系下的坐标值后（要求至少测 2 个点），即可构建坐标系：大地铅垂线确定 x 轴，两点连线在水平面的投影确定 y 轴，右手法则确定 z 轴。

从而可按照 3.1.1 节中的计算方法得到器体机械坐标系相对试验场大地坐标系的关系矩阵 M_x 。

3.2.2 经纬仪测量精度分析

从经纬仪测量步骤看出，经纬仪测量法有以下几个特点：

a. 测量工作采用 Leica TM5100 型经纬仪，其测角编码器的精度可达 $0.5''$ ，仪器本身测角精度等同于全站仪；

b. 通过经纬仪准直测量法建立坐标系，相对于全站仪点位测量法进行拟合计算而言，减少了误差环节；

c. 不需要设置星上辅助测量点，通过直接测量器体基准镜与大地测量点的关系，得到试验场大地坐标点在器体机械坐标系下的坐标值，从而减少了误差环节。

通过实测试验及分析，用经纬仪测量器体相对试验场的姿态及位置关系，姿态角度的精度可达 $30''$ 左右，点位精度可达 0.1mm 左右，相较于全站仪测量法，测量精度有了较大提高。

3.3 陀螺经纬仪测量法

3.3.1 陀螺经纬仪寻北定向原理

陀螺经纬仪实际上是一台联接了陀螺仪的经纬仪，陀螺仪的主要工作原理是基于陀螺本身的两个基本特性：定轴性和进动性。定轴性即匀速自转的陀螺在无外力矩作用时，在本身转动惯量的维持下，其自

转轴将指向惯性空间。进动性是指当陀螺受外力矩作用时，陀螺的自转轴将向外加力矩的方向运动。陀螺经纬仪即是利用陀螺仪本身的这两个物理特性和构造上的特点，在地球自转的影响下，自动寻找真北方向和测定任意目标方位角，从而实现定向。

陀螺北与地理真北在理论上是一致的，但实际上由于仪器制造加工、装配等原因使陀螺北与真北不能重合，它们之间存在一个差值，即仪器常数，测出仪器常数就可求出真北地理方向值。

3.3.2 陀螺经纬仪结合经纬仪测量方法

利用陀螺经纬仪寻北定向特点，结合经纬仪就可以直接测量出器体相对大地坐标的姿态角，既不需要测量星上辅助点，也不需要测量大地辅助测量点，具体方法步骤同 3.2 节电子经纬仪测量方法。

当测得器体机械坐标系相对陀螺经纬仪测量坐标系的矢量矩阵 M_t 后，陀螺仪开机，稳定后测量陀螺经纬仪相对大地坐标的方位角 θ 。

器体机械坐标系相对大地坐标系的关系矩阵 M_x 可以公式 (9) 表示：

$$M'_3 = M_t^{-1} \cdot R(\theta) = M_t^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (9)$$

从上述公式可以看出，用陀螺经纬仪只能测量器体姿态角，对于器体初始位置的测量，还需要用经纬仪或全站仪测量试验场大地点。

3.3.3 陀螺经纬仪测量精度分析

测量工作采用 HGK-10 型陀螺经纬仪，其仪器系统误差源有：

- a. 陀螺经纬仪测定方向值误差 m_a ，约 $6''$ ；
- b. 陀螺仪与经纬仪的连接误差 m_b ，约 $2''$ ；
- c. 悬挂带零位变动误差 m_c ，约 $5''$ ；
- d. 灵敏部摆动位置的变动误差， m_d 约 $7''$ 。

陀螺方位角一次测定中误差 m_n 可表示为：

$$m_n = \sqrt{m_a^2 + m_b^2 + m_c^2 + m_d^2} \approx 10.6'' \quad (10)$$

陀螺经纬仪准直器体基准镜的测量系统误差 m_j $\approx 5''$ ，故用陀螺经纬仪测量着陆器姿态角的精度为：

$m_l = \sqrt{m_n^2 + m_j^2} \approx 11.5''$ 。着陆器的位置点测量只能采用电子经纬仪定标测点法，测量精度约 0.1mm 。

3.4 测量方案的选择

(下转第 41 页)

