小卫星精测系统分析

温 凯,梁小峰,沙 伟 (航天东方红卫星有限公司,北京 100094)

摘要:文章简要分析了精度检测工作中空间测量坐标系的建立过程,以及准直测量、点测量等测量方法, 并对坐标变换进行了说明,最后简要叙述了小卫星精度检测工作的一般流程。

关键词:精测;经纬仪;坐标系;坐标变换 中图分类号:TH761.1 文献标识

中图分类号: TH761.1 文献标识码: A **DOI:** 10.3969/j.issn.1673-1379.2011.01.016

文章编号: 1673-1379(2011)01-0083-04

0 引言

小卫星精测工作主要任务是测量、调整卫星上 各个敏感器件相对卫星机械坐标系的安装精度,为 卫星控制、姿态测量提供基础数据。当前,精测工 作主要采用多台经纬仪组网组成大尺寸测量系统 实现,在精测工作过程中需要多次进行坐标变换及 矢量测量,将被测量转换到卫星本体坐标系中。

1 空间测量坐标系的建立

1.1 经纬仪空间测量坐标系

两台调平的经纬仪可建立一个空间测量坐标 系。经纬仪空间测量坐标系规定如下:以经纬仪 T1回转中心为坐标原点,以经纬仪T1、T2中心连 线在水平面内的投影为 *x* 轴,铅垂面内的投影为 *z* 轴,以右手定则确定 *y* 轴^[1-2]。

1.2 经纬仪定标

1.2.1 经纬仪定标原理

经纬仪系统的标定要在能构成测量组合的二 经纬仪间分别进行,如图1所示。沿四边形周边方 向二经纬仪的竖轴间距需要一一标定出;除此之 外,还需要额外标定出四边形的4个内角值*a*₁、*a*₂、 *a*₃、*a*₄及点*B*、*C*、*D*在总体坐标系(即支系I) 中的坐标值。通过使用二经纬仪测量一已知长度为 *L*₀的基准标尺反算出来。假设图1中所示的基准标 尺两个端点的空间坐标分别是*P*(*x_p*,*y_p*,*z_p*)和*Q*(*x_q*, *y_q*,*z_q*),则

$$L_{0} = \sqrt{\left(x_{p} - x_{q}\right)^{2} + \left(y_{p} - y_{q}\right)^{2} + \left(z_{p} - z_{q}\right)^{2}} \quad ; \quad (1)$$

进一步可求出

$$\left|AB'\right| = L_1 = L_0 / \sqrt{\left(\Delta\Gamma\right)^2 + \left(\Delta\Phi\right)^2 + \left(\Delta\Psi\right)^2} , \quad (2)$$

式中: $\Delta\Gamma$ 、 $\Delta\Phi$ 、 $\Delta\Psi$ 是二经纬仪水平角 α 和竖 直角 β 输出值的三角运算中间结果,均为已知值。 其中:

$$\Delta \Gamma = \sin \alpha_{bp} \cdot \cos \alpha_{ap} / \sin \left(\alpha_{ap} + \alpha_{bp} \right) - \sin \alpha_{bq} \cdot \cos \alpha_{aq} / \sin \left(\alpha_{aq} + \alpha_{bq} \right) ; \quad (3)$$

$$\Delta \Phi = \sin \alpha_{bp} \cdot \sin \alpha_{ap} / \sin \left(\alpha_{ap} + \alpha_{bp} \right) - \\ \sin \alpha_{bq} \cdot \sin \alpha_{aq} / \sin \left(\alpha_{aq} + \alpha_{bq} \right) ; \quad (4)$$

$$\Delta \Psi = \sin \alpha_{bp} \cdot \tan \beta_{ap} / \sin \left(\alpha_{ap} + \alpha_{bp} \right) - \sin \alpha_{bq} \cdot \tan \beta_{aq} / \sin \left(\alpha_{aq} + \alpha_{bq} \right) \circ$$
(5)



收稿日期: 2010-05-26; 修回日期: 2010-07-02

作者简介:温凯(1977-),男,主要从事小卫星精度检测工作。E-mail: wkzl919@sohu.com。

仪的坐标,以便4台经纬仪组网测量。

1.2.2 经纬仪定标方法

经纬仪定标的目的是确定经纬仪水平投影中 心矩 *L*,定标方法如下:

 在两经纬仪前适当位置架设一根长度为已 知的基准尺;

2) 两经纬仪正、反两面互瞄,使两经纬仪视 准轴成为一直线;

3) 两经纬仪同时瞄准基准尺的一端点;

4) 两经纬仪同时瞄准基准尺的另一端点;

5) 记录 2)、3)、4)项的经纬仪数据,由式(2)~(5)计算经纬仪水平投影中心矩 L_i;

6)两经纬仪再次分别瞄准基准尺的两个端 点,验算定标结果的正确性。

1.3 建立经纬仪空间测量坐标系

经纬仪定标完成后,就建立起了经纬仪空间 测量坐标系。在随后的测量过程中,两经纬仪必 须保持不动;一旦发生移动和触碰,则需要重新 定标。

2 经纬仪准直原理

经纬仪作为光电测量仪器,拥有独特的光学准 直功能。

光学准直这个特点对于星上设备的测量大有 裨益,同时空间坐标系传递的原理也是基于经纬仪 的准直性质设计出来的。

如图 2、图 3 所示,直角坐标系的 z 轴竖直向 上, x、y 轴在水平面内; x 轴由经纬仪 T1 的回转 中心向经纬仪 T2 的竖轴引垂矢得到,由两经纬仪 的互瞄和单一经纬仪的瞄准可以获得水平角 α 和 竖直角β的值。



图 2 矢量方向计算原理示意图(正方向) Fig. 2 Vector calculation (postive direction)



图 3 矢量方向计算原理示意图(负方向) Fig. 3 Vector calculation (negative direction)

3 空间点测量原理

经纬仪空间测量坐标系建立后,当两台经纬 仪同时瞄准空间某一点 *P*(*x*, *y*, *z*)时,如图 4 所示, 按式(6)~(8)求得空间点 *P*(*x*, *y*, *z*)的坐标。



图 4 经纬仪系统测量点坐标原理图 Fig. 4 Basic coordinates for theodolite system measurement

$$x = \frac{L\sin\alpha_b\cos\alpha_a}{\sin(\alpha_a + \alpha_b)} \tag{6}$$

$$y = \frac{L\sin\alpha_b \sin\alpha_a}{\sin(\alpha_a + \alpha_b)}$$
(7)

$$z = \frac{1}{2} \left[\frac{L(\sin \alpha_b \tan \beta_a + \sin \alpha_a \tan \beta_b)}{\sin(\alpha_a + \alpha_b)} + h \right] \quad (8)$$

式(6)~(8)中: *L* 为两电子经纬仪间的水平距离, *h* 为两电子经纬仪之高差。

4 空间矢量夹角测量原理

两空间矢量 *L*₁、*L*₂的夹角通过用两经纬仪 T1、 T2 同时准直的方法测量得到,如图 5 所示。



Fig. 5 The angle measurement system

设L1的方向角为(A1, A2, A3), L2的方向角为 (B1, B2, B3),则L1按公式(9)计算,L2按公式(10) 计算。

$$A_1 = \cos \alpha_1 \cos \beta_1, A_2 = \sin \alpha_1 \cos \beta_1, A_3 = \sin \beta_1 \quad (9)$$

$$B_1 = -\cos\alpha_2 \cos\beta_2, B_2 = \sin\alpha_2 \cos\beta_2, B_3 = \sin\beta_2 \quad (10)$$

两空间矢量夹角 φ 按公式(11)计算。

$$\cos\phi = \frac{A_1B_1 + A_2B_2 + A_3B_3}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}\sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}} \quad (11)$$

5 小卫星精度测量

5.1 坐标系转换原理

完整的坐标转换包括坐标系的平移和旋转,根

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & -\sin\beta\\ -\cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \cos\alpha\cos\gamma + \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\alpha\cos\beta\\ \sin\alpha\sin\gamma + \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma & -\sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix}$$
(13)

经纬仪测量系统一般采用同一类型的传感器, 因此,两传感器的测量精度大致相当,可认为所测 水平角、垂直角为等权观测。在交会角变化较大时, 视交会图形情况,给观测量以适当的权值。转换后 的点位坐标精度,其误差来源主要由两部分组成, 一是计算坐标转换参数时带来的误差,二是坐标测 量误差^[3]。

5.2 精度检测工艺步骤

5.2.1 建立卫星机械基准

1)利用水平仪调节精测过渡法兰上表面至水 平;

2)利用高精度经纬仪和靶标确定精测过渡法 兰上 x 轴销孔中心连线 (过圆心), 作为主基准的 相应 x 轴:

3) 测量精测过渡法兰上表面销孔,通过计算 确定水平面的法线为主基准的 z 轴,并利用右手法 则确定主基准的另一轴 y 轴,设定销孔所在分度圆 圆心为坐标系原点。

5.2.2 建立卫星光学基准

1)在精测过渡法兰下方合适位置粘贴立方镜, 利用经纬仪的自准直方法测量立方镜的镜面法线, 通过计算建立立方镜坐标系和卫星主基准的相对

据对仪器设备测量的不同要求,可采用不同的坐标 转换参数,考虑六参数情形,直接写出从坐标系 $O_1 - x_1 y_1 z_1$ 转换到坐标系 $O_2 - x_2 y_2 z_2$ 的计算公式:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \boldsymbol{M} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \circ$$
(12)

对于 6 个坐标转换参数,稀疏矩阵 M 并非线 性,无法用线性化方法计算坐标转换参数。为进行 计算必须将非线性误差方程线性化。与此同时,为 提高转换的可靠性,一般进行多余观测,通过迭代 解算坐标转换参数。在公式(12)中,不同的转换矩 阵, M 的表达式不尽一致, 若采用欧拉旋转, 则 *M*矩阵的具体表达式为

$$\begin{array}{cccc}
\cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & -\sin\beta\\
\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \cos\alpha\cos\gamma + \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\alpha\cos\beta\\
\sin\gamma + \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma & -\sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\beta
\end{array}$$
(13)

关系:

2) 通过坐标变换, 建立星体立方镜坐标系和 卫星主基准的相对关系,并以星体立方镜坐标系为 基准对星上矢量和坐标点进行测量。

5.3 精度检测工作流程

一般在卫星总装期间及各次大型试验及运输 前后都要进行精度检测工作,具体的精度检测流程 如图6所示。



图6 精度检测工作流程 Fig. 6 The flowchart of alignment

其中 M3、M4 是在卫星空载状态下对有精度 安装要求的仪器进行调整,因为此状态下最接近卫 星在轨失重状态,在这个状态下需要将仪器安装精 度调整到设计要求值。力学试验前所有仪器都已经 安装,此时卫星处于满载状态,仪器安装精度比空 载状态有所变化,但一般不会超出设计要求范围。 通过力学试验前后仪器安装精度值比对可以看出 振动试验对卫星结构的影响,从另一方面验证卫星 结构静力强度是否满足要求。出厂前和发射场精度 检测工作(M8 和 M9)的目的是通过这两次数据 的比对揭示长途运输对仪器安装精度的影响,并监 测仪器安装精度是否超出设计要求范围。

6 结束语

本文介绍了精度检测工作中坐标系的建立过程,并简要说明了小卫星精度检测工作一般工作流程。采用经纬仪作为测量传感器并运用空间交会的方法建立空间测量系统已成功应用于小卫星精测工作中,其测量精度满足小卫星精度控制要求。对于一些精度要求较高的有效载荷器件,为减小传递误差,可适当减少测量环节,即直接测量有效载荷器件与卫星控制系统敏感器件的相对关系,提高测量精度^[4]。

参考文献 (References)

- 黄桂平,叶声华,李广云,等. 经纬仪非接触大尺寸三 坐标测量系统的开发及其在航天器检测中的应用[J]. 上海计量测试, 2002, 29(3)
 Huang Guiping, Ye Shenghua, Li Guangyun, et al. Development on non-contacting 3D measurement system of theodolite and its application in aerospace[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2002, 29(3)
- [2] 王晋疆,金素昆,邸旭,等. 经纬仪测量系统在工业测量中的应用[J].光电工程,2003,30(1)
 Wang Jinjiang, Jin Sukun, Di Xu, et al. Application of theodolite measurement system in industrial measurement[J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(1)
- [3] 于来法,段定乾.实时经纬仪工业测量系统[M].北京: 测绘出版社,1999
- [4] 张满,李涛,刘建新. 某卫星不同受力环境下精度测 试方法的新思路[J]. 航天器环境工程,2006,23(3)
 Zhang Man, Li Tao, Liu Jianxin. A new approach for precision measurement for a satellite under different pressure conditions[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(3)

A theodolite-based coordinate system and its application in small satellite alignment

Wen Kai, Liang Xiaofeng, Sha Wei (DFH Satellite Co, Ltd, Beijing 100094, China)

Abstract: The paper proposes a coordinates system based on theodolite pairs, and analyzes the methods of system orientation, alignment, point measurement, and coordinates transformation. The general working flowchart of the small satellite alignment is given .

Key words: alignment; theodolite; coordinates; coordinate transformation

航天投訊

NASA 首次将太阳帆航天器送入太空

据英国《每日邮报》网站1月28日报道,美国航天局(NASA)已将第一个太阳帆航天器"纳米帆-D" 卫星成功送入近地轨道。这是NASA首次在这一轨道安装太阳帆。

太阳帆利用太阳光产生的辐射压力推动高速飞行的航天器。"纳米帆-D"卫星于1月20日展开了100ft² (9.3m²)聚合物太阳帆,正在按计划工作。据估计,它将视大气情况,在低地球轨道停留70~120d,旨 在验证小型太阳帆高新技术的应用。这项研究型的验证可能促进替代性太阳帆推进技术的进步以及对新 的离轨技术的重要需求。

(摘自 2011-01-31《参考消息》报)