

采用经纬仪测量航天相机视轴的方法分析

杨再华, 孙刚, 刘建新

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 在卫星地面总装时, 需要测量航天相机视轴之间以及相机视轴与其他敏感仪器或整星坐标系坐标轴之间的角度关系。文章以某线阵 CCD 相机的安装测量为例, 介绍了使用经纬仪系统确定航天相机视轴的方法以及相机与相机之间、相机与整星坐标系坐标轴之间角度关系的测量。分析中对相机的光学系统进行了简化, 重点介绍了测量方法的数学模型, 并通过误差传递公式分析了测量精度, 最后针对该测量方法的不足提出了改进措施。

关键词: CCD 相机; 卫星总装; 光学校直; 经纬仪

中图分类号: V465

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2010)01-0092-03

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.01.019

1 前言

航天相机视轴的指向精度直接关系到相机观测地面地理位置的精度以及摄影测量的精度。因此在卫星地面总装时, 需要测量航天相机视轴之间以及相机视轴与整星坐标系坐标轴的夹角^[1], 其测量数据的精度直接影响到相机的成像功能。

2 测量原理

相机的安装测量过程如图 1 所示。先将相机安装到模板或支架上, 分别测出相机视轴与支架或模板坐标系(传递坐标系)坐标轴的角度关系, 然后再根据传递坐标系与整星坐标系的转换关系计算出相机视轴与整星坐标系坐标轴的空间角度。在测量过程中, 整星坐标系与传递坐标系一般由光学立方镜确定, 即用光学立方镜上 3 个正交的镜面法线分别代表坐标系的坐标轴。

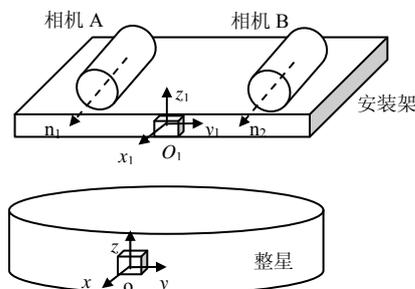


图 1 相机安装示意图

Fig. 1 Assembly of space camera

2.1 CCD相机视轴的确定

CCD 相机的视轴可以用焦平面上 CCD 中心与相机光学系统孔径光阑中心的连线表示, 如图 2 中连线 \overline{CO} 所示, 视轴 \overline{CO} 垂直于 CCD 的焦平面。设 A、B 为 CCD 两端点, 则视轴 \overline{CO} 平分连线 \overline{AOF} 与连线 \overline{BOD} 的夹角。

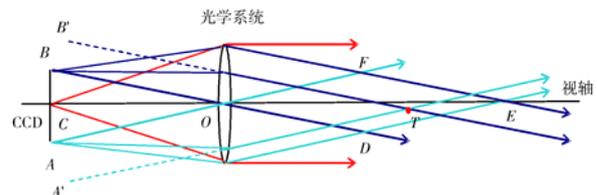


图 2 相机视轴

Fig. 2 The optical axis of space camera

由几何光学原理可知, 焦平面上任一点发出的光经光学系统后都变成了平行光, 且平行于发射点与光学系统中心 O 的连线^[2]。在实际测量中, CCD 中心 C 与光学系统中心 O 并无实际标志, 无法实际观测。因此可以在 $OFED$ 区域内任一点如 T 点观测 CCD 两端点 A、B 在无穷远处的像点 A' 、 B' , 则视轴方向与连线 $\overline{A'T}$ 和连线 $\overline{B'T}$ 的角平分线平行。

在 $OFED$ 区域内任一点架设经纬仪, 设当观测 A' 点时得到经纬仪水平角和俯仰角分别为 α_1 、 β_1 , 观测 B' 点时得到的角度为 α_2 、 β_2 , 则视

收稿日期: 2009-03-02; 修回日期: 2010-01-19

作者简介: 杨再华 (1980-), 男, 硕士学位, 从事航天器总装精度测量工作。E-mail: 13466501817@139.com。

轴方向与经纬仪水平码盘的 0 刻度及水平面夹角分别为 α_3 、 β_3 ，其中 $\alpha_3 = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$ ， $\beta_3 = (\beta_1 + \beta_2)/2$ 。

将该经纬仪固定不动，设其编号为 T0。同时架设经纬仪 T1、T2 分别准直传递立方镜的两个反射面，设准直方向分别为 x_1 、 y_1 方向，如图 3 所示。

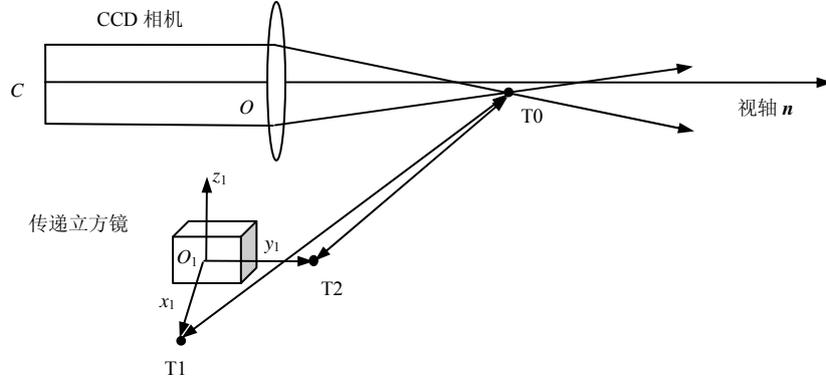


图 3 相机视轴测量
Fig. 3 The measurement of space camera axis

设经纬仪 T1 准直后其水平角与俯仰角为 (α_4, β_4) 。为了求视轴与 y_1 方向的夹角，需两台经纬仪 T0 与 T1 互瞄^[3]。设两经纬仪的互瞄角分别为 $(\alpha_{0,1}, \beta_{0,1})$ ， $(\alpha_{1,0}, \beta_{1,0})$ ，则视轴与 y_1 方向的夹角为

$$\alpha_{n,y_1} = f(\Delta\alpha, \beta_3, \beta_4), \quad (1)$$

其中 $\Delta\alpha = (\alpha_3 - \alpha_{0,1}) + (\alpha_{1,0} - \alpha_4) - 180$ 。 (2)

同理可以测得视轴与 x_1 方向的夹角 α_{n,x_1} 。由几何关系可计算出视轴与 z_1 方向的夹角为

$$\alpha_{n,z_1} = \arccos\left\{\left[1 - \cos^2(\alpha_{n,x_1}) - \cos^2(\alpha_{n,y_1})\right]^{1/2}\right\}. \quad (3)$$

2.2 两相机视轴夹角

设相机 A 的视轴在传递坐标系下的单位矢量 \mathbf{n}_1 的坐标为 $(\cos \alpha_{n,x_1}, \cos \alpha_{n,y_1}, \cos \alpha_{n,z_1})$ ，相机 B 的视轴单位矢量 \mathbf{n}_2 的坐标为 $(\cos \alpha_{n,x_2}, \cos \alpha_{n,y_2}, \cos \alpha_{n,z_2})$ 。则两视轴的夹角为

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2}{|\mathbf{n}_1| |\mathbf{n}_2|}\right). \quad (4)$$

2.3 相机视轴与整星坐标系的关系

传递坐标系 $O-x_1y_1z_1$ 与整星坐标系 $O-xyz$ 的关系可以通过经纬仪布站测得。设由传递坐标系到整星坐标系的旋转矩阵为 \mathbf{A} ，相机视轴在传递坐标系下的矢量为 \mathbf{n}_c ，则视轴在整星坐标系下的单位矢量^[4]

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_c \cdot \mathbf{A}. \quad (5)$$

3 精度分析

根据公式(1)、(2)以及误差传递公式^[5]可知， α_{n,y_1} 的误差 $d_{\alpha_{n,y_1}}$ 可由

$$d_{\alpha_{n,y_1}} = \sqrt{(f'_1 \times d_{\Delta\alpha})^2 + (f'_2 \times d_{\beta_3})^2 + (f'_3 \times d_{\beta_4})^2} \quad (6)$$

得到， $d_{\Delta\alpha} = \sqrt{d_{\alpha_3}^2 + d_{\alpha_{1,0}}^2 + d_{\alpha_{0,1}}^2 + d_{\alpha_4}^2}$ 。 (7)

f'_1, f'_2, f'_3 为公式(1)中 f 对 $\Delta\alpha, \beta_3, \beta_4$ 的求导系数。目前测量精度较高的经纬仪为 LEICA 公司的 TM5100A，在参考条件下其精度可以达到 0.5"。但由于被测靶标的线宽和人眼视觉的差异，往往造成经纬仪准直和瞄准的误差较大，同时由于一般现场测量条件与仪器出厂检定的参考条件如温度、场地振动、照明等的差异，由环境引起的测量误差也会比较大。根据测量实验统计，在现场测量时瞄准不确定度 3σ 约为 5"，准直不确定度 3σ 约为 3"。将其带入公式(6)和(7)，可以得到 $d_{\alpha_{n,y_1}}$ 在 12"左右。同理 α_{n,x_1} 、 α_{n,z_1} 的角度不确定度也大约为 12"。对于两个相机视轴之间的角度不确定度，以及相机视轴与整星坐标系坐标轴之间的角度不确定度则会进一步累积误差。

4 提高测量精度措施

根据上面所述方法，可以通过以下几种途径进行改进：

(1) 改善测量环境, 提高仪器精度

对于精度要求较高的测量项目, 可以建立专业的测量场地。测量时要保持温度恒定、避免日光照射, 同时通过加强地基、设置防震沟将测量场地与四周隔离, 避免人员走动或其他原因导致测量设备的振动。通过实验发现在较好的测量环境中, 经纬仪的准直精度可以达到 $1''$ 。

(2) 减少传递环节

测量相机视轴夹角, 或测量相机视轴与整星坐标系坐标轴夹角时, 可以直接建立两个被测方向之间的角度关系, 省去传递坐标系, 从而提高系统精度。如图 4 所示, 首先架设经纬仪 T1、T2, 分别测量出相机 A 和相机 B 的视轴与经纬仪坐标系坐标轴的夹角。然后通过两经纬仪互瞄, 建立角度关系, 直接测量出两相机视轴 n_1 、 n_2 之间的夹角。与前面介绍的方法相比, 该方法省略了中间传递环节, 累积误差会降低。

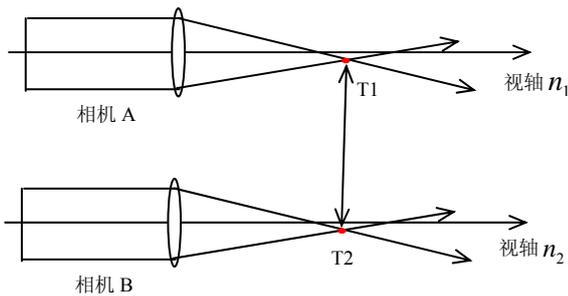


图 4 直接测量方法

Fig. 4 Direct measurement mode

(3) 采用光电准直仪和精密转台

CCD 光电准直仪可以通过图像处理的方法避免人眼观测的视觉误差, 其准直精度可以达到 $0.01''$ 。但大口径的准直仪费用非常昂贵, 小口径的准直仪又无法将两个方向建立联系。因此可以借助高精度转台与光电准直仪相结合对特殊的角度关系进行测量^[6]。

5 结束语

本文介绍了在卫星地面总装时采用经纬仪测量航天相机视轴的原理和方法, 分析了在目前的总装现场测量条件下, 使用该方法可以达到的测量精度。最后给出了提高测量精度的措施, 如改善测量环境、减少中间传递环节或采用 CCD 光电准直仪等。

参考文献 (References)

- [1] 徐福祥. 卫星工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2002
- [2] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999
- [3] 沈兆欣, 陈晓辉. 电子经纬仪测量系统中立方镜坐标系建立技术探讨[J]. 宇航计测技术, 2006, 26(4): 73-75
- [4] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [5] 杨再华. 航天器总装精度测量方法分析[J]. 航天器环境工程, 2007(6): 691-694
- [6] 吴国栋, 宋丹. 测绘相机坐标系与立方镜转换矩阵的标定[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1727-1730

航天快讯

“北斗”导航 AIT 厂房检漏大厅投入使用

随着“北斗”导航卫星系统的工作进展, 设立在北京卫星环境工程研究所的北斗导航新厂房检漏大厅已建成。在一系列的测试中, 大厅内的温度、湿度、1 万级的洁净度都已达到要求。气源等相关资源、充放气控制台也都经过严格的测试。该检漏大厅可以同时实现 2 颗卫星的总漏率并行测试以及 3 颗卫星的单点检漏, 从而大大提高了检漏的效率, 保证了“北斗”导航卫星在整星漏率检测中能可靠使用。

(窦 威 供稿)