

陀螺经纬仪在大型航天产品精测中的应用

任春珍, 季宇, 孙刚

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 陀螺经纬仪通常是做某一方向与当地大地北向的方位角关系测量用。文章针对“天宫一号”目标飞行器精测中遇到的问题, 即高空不同平台间两台设备需要姿态关系测量的需求, 通过对陀螺经纬仪测量原理的研究, 借助大地坐标系作为中间传递坐标系, 解决了经纬仪测量因互瞄被遮挡无法建立基准镜坐标系间关系的问题。测量误差分析结果验证了这种新方法的可行性, 该方法可用于大型航天产品设备安装精度的测量。

关键词: 大型航天器; 陀螺经纬仪; 对准; 安装误差

中图分类号: TH761.1

文献标识码: B

文章编号: 1673-1379(2011)06-0632-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2011.06.026

0 引言

航天器的设备安装精测^[1], 通常是用经纬仪通过对设备上的基准立方镜(下简称“基准镜”)来准直建立坐标系^[2], 利用固定位置不变的经纬仪与其他多台经纬仪互瞄来实现基准转移, 最终得到两设备之间的安装姿态关系。而在“天宫一号”大型航天器整器对接状态, 需要在 9~11 m 不同高度、不同层次的总装平台内更换设备时, 对设备间的安装姿态进行精测。为确保测量的精度, 必须借助平台实现人机分开, 这样就导致经纬仪在测量过程中无法实现在不同平台间的互瞄而完成设备间的姿态测量。为了解决这类问题, 本文进行了陀螺经纬仪测量原理的研究, 巧妙地借助于大地坐标系作为中间传递坐标系, 使常规经纬仪测试因互瞄被遮挡无法建立基准镜坐标系间关系的问题得以解决。

1 陀螺经纬仪的应用

1.1 陀螺经纬仪的测量原理

陀螺经纬仪由陀螺仪与经纬仪有机结合构成, 是一种自主式定向测量仪器。它利用陀螺仪的定轴性和进动性敏感地球自转, 从而测算出地球自转的法线方向, 俗称真北方向。它不需外界任何信息,

均可在南北 75°范围内测出真北方向, 从而得到所需要的方位。大地坐标系可以由真北方向和大地水平面来定义, 根据真北方向在经纬仪水平旋转面内码盘的读数确定大地坐标系与经纬仪绝对坐标系的关系。

1.2 陀螺经纬仪的测量算法

陀螺经纬仪与经纬仪联合建系是一种新的方法, 其原理是通过陀螺经纬仪寻北, 确定真北基准。利用经纬仪测量出被测基准镜的两个互相垂直的水平反射端面的法线俯仰角和法线水平投影线的方位角。利用球面和立体三角函数关系, 计算出基准镜各个端面法线与大地坐标系 3 个坐标轴的夹角。

在同一坐标系下对基准镜进行姿态测量后, 可以通过计算的方法得到任意两个基准镜之间的姿态, 也就是基准镜间姿态关系。

具体算法为: 利用经纬仪和陀螺经纬仪分别对两个任意放置的基准镜进行准直测量, 准直后进行仪器间互瞄。如图 1 所示, 设陀螺经纬仪对于立方镜准直有观测量 T_1 (水平角)、 V_1 (俯仰角), α_1 (方位角), 经纬仪对于基准镜准直有观测量 T_4 、 V_2 和经传递后的方位角 α_2 , 陀螺经纬仪与经纬仪互瞄观测量为 T_2 、 T_3 。

收稿日期: 2011-10-17; 修回日期: 2011-12-05

基金项目: 国家重大科技专项工程

作者简介: 任春珍(1966—), 女, 高级工程师, 主要从事航天器总装精测技术研究。联系电话: (010) 68746006。

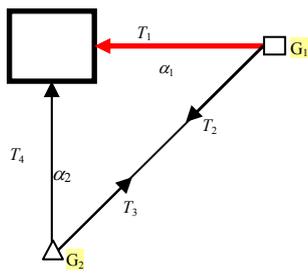


图 1 基准镜方位传递图

Fig. 1 Schematic diagram of orientation transfer for two random-placed datum mirrors

经互瞄传递后的经纬仪准直的方位角可由下式得到

$$\alpha_2 = \alpha_1 + (T_1 - T_2) + (T_3 - T_4) \pm n \cdot 180^\circ \quad (1)$$

以此基准镜各面准直线的方位角和垂直角, 得到各准直方向的方向余弦为:

$$\begin{aligned} i_t &= \cos V_t \cos \alpha_t; \\ j_t &= \cos V_t \sin \alpha_t; \\ k_t &= \sin V_t. \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中 α_t 为准直方向的方位角, $t = 1, 2, 3, 4$ 。可由各准直向量作叉乘^[3]分别得到基准镜 1 相对于大地坐标系的旋转矩阵 R_1 和基准镜 2 相对于大地坐标系的旋转矩阵 R_2 。利用方向余弦坐标转换法^[4]可以方便地得到立方镜 1 相对于基准镜 2 的旋转矩阵为 $R_{12} = R_2^{-1} \cdot R_1$, 由此得到两个基准镜间的姿态关系。

1.3 陀螺经纬仪测量基准镜北方位精度误差分析

这里主要包括两项: 一是陀螺的寻北定向综合误差; 二是经纬仪的误差, 即经纬仪互瞄误差、经纬仪准直误差、陀螺经纬仪准直的误差。立方镜间姿态标定过程相当于两个单次基准镜的准直和互瞄测量。将每次互瞄和准直均视为经纬仪的照准, 则互瞄传递基准镜后得到的方位角由式(1)计算。

由于 T_1, T_2, T_3, T_4 可以认为相互独立观测, 利用误差传播定律^[5], 可以得到传递后基准镜法线方位误差为

$$m_{\alpha_2}^2 = m_{\alpha_1}^2 + m_{T_1}^2 + m_{T_2}^2 + m_{T_3}^2 + m_{T_4}^2 \quad (3)$$

2 陀螺经纬仪与经纬仪联合测试应用实例

“天宫一号”整器对接, 需要测试 A 设备基准镜与 B 设备基准镜间的空间姿态关系。A 设备基准镜位于 9.7m 高的平台内, B 设备位于 10.5m 高的平台内, 两个平台之间有操作平隔板遮挡。

2.1 方案设计

要测量 A 设备基准镜与 B 设备基准镜间的姿态关系, 为了确保高空测量精度, 只能利用升降车和总装平台自身的隔板, 通过经纬仪与测试人员分离将测量仪器架设在总装平台的隔板上, 测试人员在升降车上, 通过对升降车的操作来实现同平台上基准镜建立坐标系的测量; 但无法实现隔层设备基准镜之间的测量, 即无法实现用普通 4 台经纬仪对基准镜相邻两个镜面分别进行准直, 通过一台固定位置不变经纬仪分别与其他经纬仪进行互瞄, 进行坐标系间姿态传递。因此必须引入 A 设备与 B 设备公共中间坐标系进行方位传递, 以满足测量的需求。通过对陀螺经纬仪的研究, 将陀螺经纬仪与经纬仪相结合使用, 通过经纬仪、陀螺经纬仪对设备基准镜的准直和互瞄及陀螺经纬仪的陀螺定向寻北, 计算得到设备基准镜坐标系与大地坐标系的关系, 将大地坐标系作为两层设备间关系传递的中间数据, 最终得到 A 设备基准镜与 B 设备基准镜之间的姿态关系。测量方案如图 2 所示。

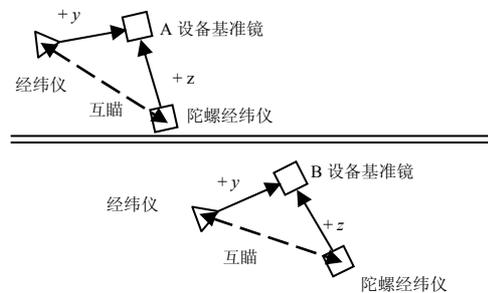


图 2 A 设备基准镜与 B 设备基准镜间姿态关系测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram for measuring the relative attitude between the datum mirrors A and B

2.2 陀螺经纬仪与经纬仪联合测试的实施过程

2.2.1 测量设备及测试环境

陀螺经纬仪为 Gyromat 2000 型。电子经纬仪为 Leica TM5100 型。测试环境为洁净度 10 万级; 温度 20.3℃; 相对湿度 45.8%。

2.2.2 测试的实施过程

实施过程: 陀螺经纬仪测量采取 4 个测回观测, 经纬仪准直测量采取 2 个测回单面读数, 陀螺经纬仪与经纬仪互瞄, 十字丝法双面观测 1 个测回。

具体测量流程如图3所示。

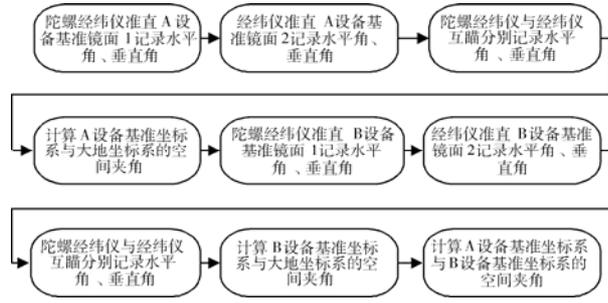


图3 陀螺经纬仪与经纬仪联合测试流程图

Fig. 3 Flow chart of combined measurement using gyrotheodolite and theodolite

3 测量结果及误差分析

3.1 测量数据结果

陀螺经纬仪测量 A 设备与 B 设备时, 共观测 4 个测回, 数据较为稳定, 没有发生漂移现象。陀螺经纬仪测量设备基准镜及与大地北向的方位角测量数据见表 1; 经纬仪准直设备基准镜数据见表 2; 测量设备基准镜陀螺经纬仪与经纬仪互瞄数据见表 3。通过计算, 得到 A 设备基准镜和 B 设备基准镜最终姿态关系见表 4。

表 1 陀螺经纬仪测量设备基准镜及与大地北向的方位角测量数据

Table 1 Measured azimuth angle of the datum mirrors of the gyrotheodolite relative to the North

被测设备	序号		陀螺经纬仪测角		
			准直水平角	准直垂直角	与大地北向的方位角
A 设备基准镜	测回 1	I 面数据	99°36'49"	89°35'17"	100°39'24"
		II 面数据	279°36'40"	270°24'46"	
	测回 2	I 面数据	99°38'18"	89°35'19"	100°39'24"
		II 面数据	279°38'14"	270°24'43"	
	测回 3	I 面数据	99°45'18"	89°35'14"	100°39'19"
		II 面数据	279°45'15"	270°24'44"	
	测回 4	I 面数据	99°36'14"	89°35'17"	100°39'25"
		II 面数据	279°36'12"	270°24'43"	
B 设备基准镜	测回 1	I 面数据	126°19'15"	88°41'14"	127°14'41"
		II 面数据	306°18'51"	271°18'48"	
	测回 2	I 面数据	126°13'35"	88°41'18"	127°14'48"
		II 面数据	306°13'18"	271°18'47"	
	测回 3	I 面数据	126°19'00"	88°41'16"	127°15'03"
		II 面数据	306°18'56"	271°18'48"	
	测回 4	I 面数据	126°20'53"	88°41'16"	127°14'40"
		II 面数据	306°20'39"	271°18'48"	

表 2 经纬仪准直设备基准镜数据

Table 2 Measured data of the datum mirrors of the theodolite's alignment device

被测设备	测回序号	经纬仪测角	
		水平方向/(°)	垂直方向/(°)
A 设备基准镜	测回 1	159.290 1	88.467 0
	测回 2	159.290 0	88.466 6
B 设备基准镜	测回 1	101.038 2	88.563 3
	测回 2	101.037 9	88.563 7

表 3 测量设备基准镜陀螺经纬仪与经纬仪互瞄数据

Table 3 The measured data of datum mirrors from inter-alignment between gyrotheodolite and theodolite

被测设备	陀螺经纬仪互瞄数据		经纬仪互瞄数据	
	I 面	II 面	I 面/(°)	II 面/(°)
A 设备基准镜	54°38'18"	234°37'54"	204.313 8	24.293 1
B 设备基准镜	64°10'20"	244°26'10"	128.821 0	309.095 9

表 4 A 设备基准镜和 B 设备基准镜最终姿态关系 (坐标轴夹角)

Table 4 The relative attitude of datum mirrors of two separate devices (coordinate angle)

B 设备基准镜坐标系	A 设备基准镜坐标系/(°)		
	x 轴	y 轴	z 轴
x1 轴	0.359 567	90.249 831	90.258 596
y1 轴	89.660 820	26.603 272	63.399 235
z1 轴	89.880 649	116.601 912	26.602 223

3.2 测量误差分析

根据测量结果, 对 3 个方面的误差进行分析。

3.2.1 传递后的北方位精度估算

根据传递后基准镜法线方位误差公式(3)可得 Gyromat 2000 型陀螺经纬仪的定向精度^[6]为

$$m_{\alpha_1} = \pm 3.2''。$$

进一步考虑到经纬仪的调焦误差、轴系误差、照准

误差等,则 $m_{T_1} = m_{T_2} = \pm 3.0''$, $m_{T_3} = m_{T_4} = \pm 1.5''$ 。

将上述关系带入式(3)可以得到

$$m_{\alpha_2} = \pm 5.7''。$$

3.2.2 两垂面法线夹角与 90° 差值误差

利用基准镜建立坐标系的前提是两个垂面的法线空间正交:方位角经过传递后,得到的两个基准镜垂直法线的空间夹角应该为 90° 。但由于下列误差的存在,两个平面镜法线夹角与 90° 存在差值:

- 1) 陀螺经纬仪直接定向误差,按照 $\pm 3.2''$ 计算;
- 2) 传递后的定向误差,按照 $\pm 5.7''$ 计算;
- 3) 基准镜自身的不垂直度,按照 $\pm 3.0''$ 计算;
- 4) 陀螺经纬仪准直的垂直角测量误差,按照 $\pm 3.0''$ 计算;
- 5) 经纬仪准直的垂直角测量误差,按照 $\pm 1.5''$ 计算;

则将上述五项误差进行合成后,可以得到两个垂面法线夹角与 90° 的误差为 $m_{\Delta} = \pm 8.0''$ 。

3.2.3 两个基准镜之间 9 个夹角的不确定度

两个基准镜之间的夹角计算公式为非线性方程,其误差估算的公式非常复杂。综合考虑各种影响,两立方镜之间的夹角误差可认为 $m = \sqrt{3}m_{\Delta} = \pm 13.9''$ 。

4 结束语

通过对测量误差的分析,得出采用上述测量设备和测量方法,A设备与B设备两个基准镜之间的姿态角度测量误差为 $\pm 13.9''$,结果满足小于 $\pm 15''$ 的设计要求。

根据陀螺经纬仪测量原理,借助大地坐标系作为中间传递坐标系,解决了经纬仪因互瞄被遮挡无法建立基准镜坐标系间的问题,并通过“天宫一号”大型航天产品的精测,实现了陀螺经纬仪新测量方法的验证,也为航天产品安装设备精测开辟了新的路径。

参考文献 (References)

- [1] 刘建新. 飞船精度测量技术方案及评定[J]. 航天器工程, 2007(3): 106-113
Liu Jianxin. Measuring scheme of a certain spacecraft module and its evaluation[J]. Spacecraft Engineering, 2007(3): 106-113
- [2] 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
Shen Zhaoxin, Chen Xiaohui. A Technology to get coordinate-system of cube-prism in electron-theodolite surveying system[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2006, 26(4): 73-75
- [3] 杨再华, 孙刚, 郭洁瑛. 空间实验室的精度测量新方法[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(5): 452-454
Yang Zaihua, Sun Gang, Guo Jieying. A new precision measurement method used in space lab assembling[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(5): 452-454
- [4] 任春珍, 杨再华, 孙刚, 等. 太空环境飞行器交会对接设备精测工艺方法研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(6): 768-771
Ren Chunzhen, Yang Zaihua, Sun Gang, et al. Ground-based alignment of rendezvous and docking device used for objective space vehicle[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(6): 768-771
- [5] 武汉测绘科技大学测量平差教研室. 测量平差基础[M]. 北京: 测绘出版社, 1994: 32-47
- [6] DMT Institute. Gyromat 2000 operator's guide

Application of gyrotheodolite for alignment in large spacecraft installation process

Ren Chunzhen, Ji Yu, Sun Gang

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The gyrotheodolite is a kind of orientation instrument commonly used for determining the azimuth angle relative to the local North. In the AIT process of Tiangong-I target spacecraft, it is required to determine the attitude of two devices at operation platforms of different heights. On that condition, two theodolites may be blocked due to alignment between each other, thus it is unable to set up the relationship between the datum cube mirrors. To solve that problem, the geodetic coordinates are used as a transfer coordinate system to obtain the angle relationships. This new method for gyrotheodolite measurement is shown to be feasible with a satisfactory error analysis result, which can be used for similar precision measurements of large spacecraft.

Key words: large spacecraft; gyrotheodolite; alignment; installation error