【20190302】光电校靶精度实验报告

2019-03-02

易思维（天津）科技有限公司

# 概述

## 1.1实验目的

根据光电校靶技术指标规格书，设计相应的实验测试陀螺仪单轴精度、三轴合成精度、时间漂移大小、相机测角精度，并通过对比实验分析对光电校靶精度影响较大的环节。

## 1.2实验组织

测试人员： 张楠楠 李志宇

测试时间： 20190215-20190226

报告整理人：李志宇

# 实验概要

测试环境：天津大学一楼实验室。

测试配置：精密三轴转台，光电校靶仪器，固定托座，计算机，反光镜

# 实验数据与分析

1. **单轴和三轴精度测试**
2. **单轴精度测试**
3. **测试一和测试二**

测试形式：转台三框初始化位置为(0°,-180°,0°)，是标定Yaw轴的姿态，激光方向朝前，使用外框测试yaw轴，中框测试Pitch轴。测试一为正转陀螺仪实验，测试二反转陀螺仪实验。具体实验过程见附件“光电校靶精度验证实验设计.doc”测试一和测试二。

数据处理表格如下：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 操作框 | 转台输入角度 （外，中，内） | 三轴测量角度理论 (y,p,r) | 误差(测试Yaw，Pitch)/秒 | | |
| 正转外框 |  |  | y | p | r |
| (90,-180,0) | (90,0,0) | 2 | 3 | 5 |
| (180,-180,0) | (180,0,0) | 0 | 1 | 2 |
| (270,-180,0) | (270,0,0) | 4 | 3 | -1 |
| (360,-180,0) | (360,0,0) | 0 | 0 | -1 |
| 正转中框 | (0,-165,0) | (0,15,0) | 2 | 0 | 2 |
| (0,-150,0) | (0,30,0) | 6 | 2 | 1 |
| (0,-135,0) | (0,45,0) | 9 | 5 | 1 |
| (0,-120,0) | (0,60,0) | 13 | 8 | 0 |
| 平均值 | | 旋转外框 | 1.5 | 1.75 | 1.25 |
| 旋转中框 | 7.5 | 3.75 | 1 |

表3-1 正转外框测试yaw轴，中框测试Pitch轴

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 操作框 | 转台输入角度 （外，中，内） | 三轴测量角度理论 (y,p,r) | 误差(测试Yaw，Pitch)/秒 | | |
| 反转外框 |  |  | y | p | r |
| (-90,-180,0) | (-90,0,0) | -2 | 2 | 0 |
| (-180,-180,0) | (-180,0,0) | 3 | 6 | 4 |
| (-270,-180,0) | (-270,0,0) | -2 | -5 | -9 |
| (-360,-180,0) | (-360,0,0) | -3 | -1 | -2 |
| 反转中框 | (0,-195,0) | (0,-15,0) | -3 | 1 | -1 |
| (0,-210,0) | (0,-30,0) | -9 | 0 | -6 |
| (0,-225,0) | (0,-45,0) | -15 | 2 | -11 |
| (0,-240,0) | (0,-60,0) | -29 | 4 | -25 |
| 平均值 | | 旋转外框 | -1 | 0.5 | -1.75 |
| 旋转中框 | -14 | 1.75 | -10.75 |

表3-2 反转外框测试yaw轴，中框测试Pitch轴

图3-1 标定姿态测试Yaw

图3-2 非标定姿态测试Pitch

从测试结果可以看出，只旋转外框保持中框和内框不动，测试Yaw轴精度，Yaw轴的测角误差最大4’’,正转误差平均值为1.5’’,反转误差平均值为-1’’,而对应的Pitch和Roll的测角误差最大6’’和 -9’’；相应的只旋转中框保持外框和内框测试Pitch轴精度，Pitch轴的测角误差最大8’’, 正转误差平均值为3.75’’,反转误差平均值为1.75’’,而对应的Yaw和Roll的测角误差最大-29’’和-25’’。

在标定Yaw轴的姿态下，使用外框测试Yaw轴陀螺仪的精度，测角误差较小，同时对Pitch轴和Roll轴的影响较小；在该姿态下，使用中框测试Pitch轴陀螺仪精度，测角误差较大，对Yaw轴和Pitch轴的影响较大。

外框正反转测试Yaw时，误差基本对称分布；中框正反转测试Pitch轴时，误差非对称分布，并且反转中框时，引起的Yaw轴和Roll轴的误差变大。

1. **测试三和测试四**

测试形式：转台三框初始化位置为(0°,-180°,90°)，是标定Yaw轴的姿态基础上内框旋转90°，测量Yaw和Roll，也就是使用外框测试Yaw轴，中框测试Roll轴。测试三为正转陀螺仪，测试四反转陀螺仪实验。具体实验过程见附件“光电校靶精度验证实验设计.doc”测试三和测试四。

数据处理表格如下：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 操作框 | 转台输入角度 （外，中，内） | 三轴测量角度理论 (y,p,r) | 误差(测试yaw，Roll)/秒 | | |
| 正转外框 |  |  | y | p | r |
| (90,-180,90) | (90,0,0) | 3 | -22 | 2 |
| (180,-180,90) | (180,0,0) | 1 | -16 | 23 |
| (270,-180,90) | (270,0,0) | 5 | 0 | 17 |
| (360,-180,90) | (360,0,0) | 0 | -1 | -2 |
| 正转中框 | (0,-165,90) | (0,0,15) | 4 | 0 | 1 |
| (0,-150,90) | (0,0,30) | 6 | 1 | -1 |
| (0,-135,90) | (0,0,45) | 9 | 5 | 0 |
| (0,-120,90) | (0,0,60) | 11 | 9 | 0 |
| 平均值 | | 旋转外框 | 2.25 | -9.75 | 10 |
| 旋转中框 | 7.5 | 3.75 | 0 |

表3-3正转外框测试yaw轴，中框测试Roll轴

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 操作框 | 转台输入角度 （外，中，内） | 三轴测量角度理论 (y,p,r) | 误差(测试yaw，Roll)/秒 | | |
| 反转外框 |  |  | y | p | r |
| (-90,-180,90) | (-90,0,0) | -3 | 1 | 20 |
| (-180,-180,90) | (-180,0,0) | 0 | -20 | 14 |
| (-270,-180,90) | (-270,0,0) | -1 | -14 | -6 |
| (-360,-180,90) | (-360,0,0) | 1 | 0 | -2 |
| 反转中框 | (0,-195,90) | (0,0,-15) | -3 | 0 | 0 |
| (0,-210,90) | (0,0,-30) | -7 | 3 | 0 |
| (0,-225,90) | (0,0,-45) | -9 | 6 | 0 |
| (0,-240,90) | (0,0,-60) | -11 | 9 | 1 |
| 平均值 | | 旋转外框 | -0.75 | -8.25 | 6.5 |
| 旋转中框 | -7.5 | 4.5 | 0.25 |

表3-4反转外框测试yaw轴，中框测试Roll轴

图3-3 非标定姿态测试Yaw

图3-4 非标定姿态测试Roll

从测试结果可以看出，只旋转外框保持中框和内框不动，测试Yaw轴精度，Yaw轴的测角误差最大5’’,正转误差平均值为2.25’’,反转误差平均值为-0.75’’,而对应的Pitch和Roll的测角误差最大-22’’和23’’；相应的只旋转中框保持外框和内框不动，测试Roll轴精度，Roll轴的测角误差最大-1’’, 正转误差平均值为0’’,反转误差平均值为0.25’’,而对应的Yaw和Pitch的测角误差最大11’’和9’’。

在标定Yaw轴的姿态基础上内框旋转90°，使用外框测试Yaw轴陀螺仪的精度，测角误差较小，对Pitch轴和Roll轴的影响较大；在该姿态下，使用中框测试Pitch轴陀螺仪精度，测角误差较大，对Yaw轴和Pitch轴的影响较小。

外框正反转测试Yaw时，Yaw轴误差基本对称分布；中框正反转测试Roll轴时，Roll轴误差对称分布。

1. **测试五**

测试形式：转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，是标定Roll轴的姿态，测量Roll轴精度，也就是使用外框测试Roll轴，分为正转和反转两部分。具体实验过程见附件“光电校靶精度验证实验设计.doc”测试五。

数据处理表格如下：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 转台输入角度 （外，中，内） | 三轴测量角度理论 (y,p,r) | 误差(测试Roll轴)/秒 | | |
|  |  | y | p | r |
| (15,-90,0) | (0,0,15) | 0 | -3 | -2 |
| (30,-90,0) | (0,0,30) | 0 | 0 | -1 |
| (45,-90,0) | (0,0,45) | -1 | 0 | -2 |
| (60,-90,0) | (0,0,60) | -2 | 0 | -1 |
| (90,-90,0) | (0,0,90) | 0 | -1 | 1 |
| (180,-90,0) | (0,0,180) | 0 | -3 | -1 |
| (270,-90,0) | (0,0,270) | 3 | -1 | 1 |
| (360,-90,0) | (0,0,360) | 1 | 0 | -2 |
| (-15,-90,0) | (0,0,-15) | 0 | -1 | 1 |
| (-30,-90,0) | (0,0,-30) | 0 | 0 | 1 |
| (-45,-90,0) | (0,0,-45) | 0 | 0 | -1 |
| (-60,-90,0) | (0,0,-60) | 0 | 0 | 0 |
| (-90,-90,0) | (0,0,-90) | 0 | 0 | -2 |
| (-180,-90,0) | (0,0,-180) | 2 | -1 | -4 |
| (-270,-90,0) | (0,0,-270) | 0 | -2 | -3 |
| (-360,-90,0) | (0,0,-360) | 2 | -2 | 2 |
| 平均值 | 正转外框 | 0.125 | -1 | -0.875 |
| 反转外框 | 0.5 | -0.75 | -0.75 |

表3-5 外框测Roll

图3-5 标定姿态测试Roll

从测试结果可以看出，只旋转外框保持中框和内框测试Roll轴精度，Roll轴的测角误差最大4’’,正转误差平均值为0.125’’,反转误差平均值为0.5’’,而对应的Pitch和Roll的测角误差最大为3’’和3’’，平均误差正转时为-1’’和-0.875’’反转时为-0.75’’,-0.75’’。

在标定Roll轴的姿态下，整个仪器相对于底座垂直向上，整个外框旋转过程中重心位置基本保持不变。可以看出，该姿态下只进行外框旋转，测角误差极小。

1. **测试六**

测试形式：转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，是标定Roll轴的姿态，使用中框测量Pitch轴精度，分为正转和反转两部分。具体实验过程见附件“光电校靶精度验证实验设计.doc”测试六。

数据处理表格如下：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 转台输入角度（外中，内） | 三轴测量角度理论 (y,p,r) | 误差(测试Pitch)/秒 | | |
|  |  | y | p | r |
| (0,-75,0) | (0,15,0) | 4 | 2 | 0 |
| (0,-60,0) | (0,30,0) | 6 | 8 | 1 |
| (0,-45,0) | (0,45,0) | 9 | 11 | 1 |
| (0,-30,0) | (0,60,0) | 14 | 15 | 0 |
| (0,-105,0) | (0,-15,0) | -3 | -3 | -1 |
| (0,-120,0) | (0,-30,0) | -8 | -8 | -4 |
| (0,-135,0) | (0,-45,0) | -15 | -11 | -10 |
| (0,-150,0) | (0,-60,0) | -26 | -15 | -23 |
| 平均值 | 正转中框 | 8.25 | 9 | 0.5 |
| 反转中框 | -13 | -9.25 | -9.5 |

表3-6 中框测Pitch

图3-6 非标定姿态测试Pitch

从测试结果可以看出，只旋转中框框保持外框和内框不变，测试Pitch轴精度，Pitch轴的测角误差最大15’’,正转误差平均值为9’’, 反转误差平均值为-9.25’’，而对应的Yaw和Roll的测角误差最大为-26’’和-23’’，正转时平均误差为8.25’’和0.5’’，反转时平均误差为-13’’和-9.5’’。

在标定Roll轴的姿态下，整个仪器相对于底座垂直向上，中框过程中重心位置发生了变化。可以看出，该姿态下进行中框旋转，Pitch轴测角误差较大。

1. **测试七**

测试形式：Pitch朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,-90°)，是标定Pitch轴的姿态，测量Pitch轴精度，也就是使用外框测试Pitch轴，分为正转和反转两部分。具体实验过程见附件“光电校靶精度验证实验设计.doc”测试七。

数据处理表格如下：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 转台输入角度 （外，中，内） | 三轴测量角度理论 (y,p,r) | 误差(测试Pitch轴)/秒 | | |
|  |  | y | p | r |
| (15,-90,-90) | (0,15,0) | 0 | -2 | 0 |
| (30,-90,-90) | (0,30,0) | 0 | 0 | 0 |
| (45,-90,-90) | (0,45,0) | 0 | 1 | 0 |
| (60,-90,-90) | (0,60,0) | 14 | 2 | 0 |
| (-15,-90,-90) | (0,-15,0) | 0 | 0 | 0 |
| (-30,-90,-90) | (0,-30,0) | 0 | -2 | 0 |
| (-45,-90,-90) | (0,-45,0) | -1 | -2 | 0 |
| (-60,-90,-90) | (0,-60,0) | -2 | -3 | -2 |
| 平均值 | 正转外框 | 3.5 | 0.25 | 0 |
| 反转外框 | -0.75 | -1.75 | -0.5 |

表3-7 外框旋转Pitch轴

图3-7 标定姿态测试Pitch

从测试结果可以看出，只旋转外框框保持中框和内框不动，测试Pitch轴精度，Pitch轴的测角误差最大-3’’,正转时误差平均值为0.25’’, 反转时误差平均值为-1.75’’而对应的Yaw和Roll的测角误差最大为14’’和-4’’，正转时平均误差为3.5’’,0’’，反转时平均误差为-0.75’’,-0.5’’。

在标定Pitch轴的姿态下，使用外框测试Pitch轴精度，测角误差极小。

1. **测试八**

测试形式：Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，是标定Roll轴的姿态，使用内框测量Yaw轴精度，分为正转和反转两部分。具体实验过程见附件“光电校靶精度验证实验设计.doc”测试八。

数据处理表格如下：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 转台输入角度 （外,中,内） | 三轴测量角度理论 (y,p,r) | 误差(测试yaw轴)/秒 | | |
|  |  | y | p | r |
| (0,-90,-15) | (15,0,0) | 1 | 0 | 1 |
| (0,-90,-30) | (30,0,0) | 4 | 0 | 0 |
| (0,-90,-45) | (45,0,0) | 5 | 0 | 1 |
| (0,-90,-60) | (60,0,0) | 5 | 0 | 0 |
| (0,-90,-90) | (90,0,0) | 10 | 4 | 1 |
| (0,-90,-180) | (180,0,0) | -3 | 6 | -2 |
| (0,-90,-270) | (270,0,0) | -6 | -1 | -2 |
| (0,-90,-360) | (360,0,0) | -4 | -2 | 2 |
| (0,-90,15) | (-15,0,0) | -1 | 0 | 0 |
| (0,-90,30) | (-30,0,0) | -2 | 0 | 0 |
| (0,-90,45) | (-45,0,0) | -3 | -1 | -1 |
| (0,-90,60) | (-60,0,0) | -6 | 0 | -1 |
| (0,-90,90) | (-90,0,0) | -8 | 1 | -1 |
| (0,-90,180) | (-180,0,0) | 4 | 5 | 1 |
| (0,-90,270) | (-270,0,0) | 7 | 0 | 2 |
| (0,-90,360) | (-360,0,0) | 7 | 0 | -1 |
| 平均值 | 正转内框 | 1.5 | 0.875 | 0.125 |
| 反转内框 | -0.25 | 0.625 | -0.125 |

表3-8 内框旋转Yaw轴

图3-8 非标定姿态测试Yaw

从测试结果可以得出，只旋转内框框保持外框和中框不动，测试Yaw轴精度，Yaw轴的测角误差最大 10’’,正转时误差平均值为1.5’’, 反转时误差平均值为-0.25’’。而对应的Pitch和Roll的测角误差最大为6’’和2’’，正转时平均误差为0.875’’,0.125’’，反转时平均误差为0.625’’,-0.125’’。

可以看出，该姿态下只进行内框旋转测量Yaw轴，测角误差较大。

1. **单轴精度实验总结**

单轴精度要求<0.2’，也就是<12’’。在使用外框旋转相应轴的实验数据中，包括实验一、二、三、四外框测试yaw轴，测试五外框测试Roll轴，测试七外框测试Pitch轴，所得到的测角误差最大为5’’,符合要求；在使用中框和内框旋转相应轴的实验中，测角误差最大可达29’’,存在精度达不到指标的情况。

实验一和二为标定Yaw轴的姿态，实验五为标定Roll轴姿态，实验七为标定Pitch轴姿态，这三个测试中验证相对应的标定轴的精度，最大误差为4’’，精度较高。

使用外框测量相应的轴，猜测光电校靶因重力产生的相对于转台的位移在旋转过程中不会改变，所以使用外框测试相应轴，精度较高；而使用中框和内框测量相应轴，在旋转过程中光电校靶因重力产生的相对于转台的位移在旋转过程中会发生改变，精度会下降。

1. **三轴精度测试**

Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，三轴同时转，测量三轴精度，共选择了15组数据。具体实验过程见附件“光电校靶精度验证实验设计.doc”测试九。

数据处理表格如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 转台输入角度 （外，中，内） | 相对初始位置 (y,p,r) | 测角误差/秒 |
| (-45,-135,10) | (-10,-45,-45) | 27.9066857 |
| (-15,-135,10) | (-10,-45,-15) | 41.7127975 |
| (-45,-105,40) | (-40,-15,-45) | 5.13108318 |
| (30,-70,60) | (-60,20,30) | 12.71342 |
| (45,-110,60) | (-60,-20,45) | 48.7023761 |
| (45,-120,-10) | (10,-30,45) | 6.23413688 |
| (10,-100,-60) | (60,-10,10) | 16.8659488 |
| (-4,-88,-20) | (20,2,-4) | 2.22730819 |
| (1,-89,90) | (-90,1,1) | 9.21779607 |
| (30,-105,-35) | (35,-15,30) | 5.63434264 |
| (-2,-91,-65) | (65,-1,-2) | 1.96790113 |
| (10,-100,-30) | (30,-10,10) | 6.5360234 |
| (-40,-70,45) | (-45,20,-40) | 2.7654342 |
| (1,-88,4) | (-4,2,1) | 0.94919554 |
| (45,-45,45) | (-45,45,45) | 8.21228587 |
| 平均值 | | 13.118449 |

表3-9 三轴精度数据

图3-9 三轴合成精度

测角误差使用是在理论测角坐标系下的入射光线(1.8°,1.8°)，转换到实际测角坐标下，计算两个向量之间的夹角。

三轴合成精度误差要<0.35’,即<21’,在测试的15个位置下除了第一、二、五，其他位置下的测角均符合要求，该误差还包含了仪器重力带来的潜在误差。将一、二、五的数据列出来：

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 转台输入角度 （外，中，内） | 相对初始位置 (y,p,r) | 理论测角(y,p,r)/度 | | | 实际测角(y,p,r)/度 | | | 误差/秒 |
| (-45,  -135,  10) | (-10,  -45,  -45) | -41.4583333 | -21.6916667 | -57.445 | -41.463333 | -21.691666 | -57.45 | 27.9066 |
| (-15,  -135,  10) | (-10,  -45,  -15) | -26.5505556 | -38.88 | -28.6708333 | -26.556666 | -38.881666 | -28.676666 | 41.7127 |
| (45,  -110,  60) | (-60,  -20,  45) | -46.2872222 | -47.1630556 | 12.23666667 | -46.295833 | -47.165833 | 12.2302777 | 48.7023 |

表3-10 测角误差较大的位置

从图中可以看出，这三个位置的pitch轴的角度都很大，在实际的工作中Pitch轴不会有这么大的范围。

在小角度测量范围内，三轴合成精度符合指标。

1. **时间漂移**

Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，三轴同时转，测量时间漂移。具体实验过程见附件“光电校靶精度验证实验设计.doc”测试十。

数据处理表格如下：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 转台输入角度 （外，中，内） | 相对初始位置 (y,p,r) | 误差/秒 | | |
|  |  | 立刻  测量 | 10min后测量 | 差值 |
| (10,-100, -60) | (60,-10,10) | 7.69489 | 11.06856 | 10.87724 |
| (-40,-70,45) | (-45,20,-40) | 13.57964 | 17.08644 | 5.019096 |
| (-15,-135,10) | (-10,-45,-15) | 38.88217 | 36.53941 | 7.266027 |
| (1,-88,4) | (-4,2,1) | 11.38116 | 17.44532 | 6.90227 |
| (30,-105, -35) | (35,-15,30) | 10.08178 | 21.95769 | 12.77217 |
| 平均值 | | 16.32393 | 20.81949 | 4.495558 |

表3-11 时间漂移测角误差

图3-10 时间漂移测角误差

时间漂移要<0.4’/10min,即<24’’/10min,消除本身的测角误差后，时间漂移符合要求。从图中可以看出立刻测量的角度误差与10min后的测角误差相差不大。

1. **模仿实际工作**

光电校靶在实际测量过程中是由工作人员手持的，在测量前角度是一直处于变化状态的，因此模仿该状态，令三轴转台在10min时间内姿态不停地变化，测试10min后传感器三轴测量精度(包括了三轴测角误差和时间漂移引起的误差)。具体实验过程见附件“光电校靶精度验证实验设计.doc”测试十一。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 转台输入角度 （外，中，内） | 相对初始位置 (y,p,r) | 误差/秒 |
| (10,-100, -60) | (60,-10,10) | 16.41387 |
| (-40,-70,45) | (-45,20,-40) | 45.32836 |
| (-15,-135,10) | (-10,-45,-15) | 55.36073 |
| (1,-88,4) | (-4,2,1) | 23.94274 |
| (30,-105, -35) | (35,-15,30) | 48.75618 |
| 平均值 | | 37.96038 |
|  | |  |

表3-12 模仿实际工作测角误差

图3-11 模仿实际工作测角误差

实际工作误差在10min后<0.8’,即<48’’，五个位置中存在两个位置精度不符合要求，但并没有超过指标过多。

1. **相机精度测试**

在相机标定完成后，结合测角插值原理分析，现阶段直接测得的角度存在理论误差，误差分析时分别计算上位机直接测得的数据的误差和经过补偿后的数据的误差。在分析精度是否符合指标<0.2’的同时，验证补偿模型的合理性。

测试一： 单角度测试

Alpha角度测试数据表格如下：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 转台输入角度(中，内) | 相对于初始位置转过的角度 | | 误差/角秒 | |
|
|  | α | β | 未补偿 | 补偿后 |
| (-90,-1.7) | 1.7 | 0 | 25.63983 | 14.73178 |
| (-90,-1.4) | 1.4 | 0 | 19.51392 | 10.26225 |
| (-90,-1.1) | 1.1 | 0 | 16.2743 | 9.337196 |
| (-90,-0.8) | 0.8 | 0 | 8.35648 | 3.075951 |
| (-90,-0.5) | 0.5 | 0 | 4.400517 | 1.443329 |
| (-90,-0.2) | 0.2 | 0 | 1.034507 | 1.894867 |
| (-90,0.1) | -0.1 | 0 | 4.651357 | 3.666618 |
| (-90,0.4) | -0.4 | 0 | 12.92624 | 10.27821 |
| (-90,0.7) | -0.7 | 0 | 17.21966 | 12.24697 |
| (-90,1) | -1 | 0 | 22.64849 | 16.02661 |
| (-90,1.3) | -1.3 | 0 | 25.49587 | 16.53786 |
| (-90,1.6) | -1.6 | 0 | 33.45192 | 22.83675 |
| (-90,1.9) | -1.9 | 0 | 41.73954 | 28.77507 |
| 平均误差 | | | 17.9502 | 11.62411 |

表3-13 alpha单角度精度分析表

图3-12 alpha单角度精度折线图

分析上述表格和折线图中的数据：

1. 未进行数据补偿，平均误差为17.95’’，最大误差为41.74’’；进行数据补偿后，平均误差为11.62’’，最大误差为28.77’’。
2. 从折线图中可以看出，alpha角度越小，相机测角误差越小；
3. 结合表格和折线图可以看出，测量alpha角时进行数据补偿后，相机测角误差明显减小。

beta角度测试数据表格如下：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 转台输入角度(中，内) | 相对于初始位置转过的角度 | | 误差/角秒 | |
|  | α | β | 不补偿 | 补偿 |
| (-91.7,0) | 0 | -1.7 | 23.07448 | 2.508324 |
| (-91.4,0) | 0 | -1.4 | 30.99269 | 12.70966 |
| (-91.1,0) | 0 | -1.1 | 17.00989 | 4.678852 |
| (-90.8,0) | 0 | -0.8 | 12.74979 | 3.127249 |
| (-90.5,0) | 0 | -0.5 | 8.911075 | 4.421786 |
| (-90.2,0) | 0 | -0.2 | 6.994542 | 6.110794 |
| (-89.9,0) | 0 | 0.1 | 0.856284 | 0.6354 |
| (-89.6,0) | 0 | 0.4 | 5.138919 | 2.793715 |
| (-89.3,0) | 0 | 0.7 | 8.926965 | 4.255442 |
| (-89,0) | 0 | 1 | 12.56504 | 1.998724 |
| (-88.7,0) | 0 | 1.3 | 18.50499 | 4.694035 |
| (-88.4,0) | 0 | 1.6 | 20.25467 | 3.484196 |
| (-88.1,0) | 0 | 1.9 | 28.54242 | 3.373324 |
| 平均误差 | | | 14.96321 | 4.21473 |

表3-14 beta单角度精度分析表

图3-13 beta单角度精度分析表

分析上述表格和折线图中的数据：

1. 未进行数据补偿，平均误差为14.96’’，最大误差为30.99’’；进行数据补偿后，平均误差为4.21’’，最大误差为12.71’’。
2. 从折线图中可以看出，beta角度越小，相机测角误差越小；
3. 结合表格和折线图可以看出，测量beta角时进行数据补偿后，相机测角误差明显减小。

测试二： 双角度测试

图3-14 beta双角度精度分析表

分析上面折线图中的数据：

1. 未进行数据补偿，平均误差为27.76’’，最大误差为71.07’’；进行数据补偿后，平均误差为15.78’’，最大误差为56.53’’。
2. 折线图中间部分为角度较小的数据，两端为角度较大的数据区域，在测量小角度的绝对误差明显较小。
3. 测量双角度时进行数据补偿后，相机测角误差明显减小。

结合单角度和双角度数据分析可得：

1. 在整个测角范围内，相机测角精度未进行数据补偿，平均误差为27.76’’，；进行数据补偿后，平均误差为15.78’’，均没有达到指标要求<0.2’；但在小角度范围-1.1°-1.1°内，经过数据补偿后精度符合要求。
2. 在单角度和双角度测试中，数据补偿后精度显著提高，验证了补偿模型的合理性。

# 总结

1、对于单轴精度，在标定Yaw，Pitch，Roll轴的姿态下使用外框测试对应的轴，精度符合要求；在非标定姿态下测试单轴的精度，存在部分不符合精度的情况。

2、对于三轴合成精度，不考虑时间漂移的影响，在实验测试的15个姿态中，存在5组数据达不到要求，其中都是Pitch的角度较大的情况。猜测是由于这些位姿下，仪器相对转台的固定板产生了位移。

3、对于时间漂移，在测试的5个位姿下，初始化后立刻测量误差与10min后再次测量的误差比较，误差增大幅度符合要求。

4、对于模仿实际工作精度，在测试的5个位姿下，有两个位姿的误差达不到要求，并且5个位姿的误差均很大。

5、