【20190118】光电校靶精度验证实验设计

2019-01-18

易思维（天津）科技有限公司

# 概述

## 1.1测试目的

光电校靶按照目前的标定流程完成标定后，获得了陀螺仪姿态更新和相机测量镜面法线方向的误差，主要表现为滚转轴的时间漂移测角误差较大。后续需要做进一步的精度测试分析，针对陀螺仪和相机标定技术规格书中各种测角精度和坐标系更新精度分别进行测试。

## 1.2测试组织

测试人员： 李志宇 张楠楠 刘海庆

测试时间：

实验设计人：李志宇

# 测试概要

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

# 具体实验设计内容

1. **单轴和三轴精度测试**

光电校靶传感器的技术规格书(后简称技术规格书)中提出，在排除时间漂移后，单轴测角误差<0.2’/360°，三轴合成误差<0.35’。同时注意到在实际的工作中仪器的pitch和roll不会超过90°，但要测试转过360°的精度，就要在初始化的时候做一些调整，所以单轴精度测试实验分为按实际工作位置初始化和非工作情况初始化。注意：该测试一定要在短时间内测试完成，尽量减小时间飘移的影响。

传感器坐标系中规定对应关系为：x轴-Pitch(俯仰)；y轴-Roll(滚转)；z轴-偏航(Yaw)。上位机显示的偏航、俯仰、滚转三轴角度(本质时欧拉角)是通过R = Ry\*Rx\*Rz的方式得到的。当x轴-Pitch(俯仰)旋转超过±90°时，通过旋转矩阵分解的欧拉角就会产生错误。因此测试过程中应当始终保持分解后的x轴-Pitch(俯仰)转过的角度不超过±90°。数学上分解后的y轴-Roll(滚转)允许超过±90°，但实际测量时一般不会超过±90°，因此测试时可以分两种情况。

**注意**：因为每次在转台上安装传感器时，都会又微小偏差，所以每次重新安装传感器到转台上时都需要对陀螺仪进行重新标定。

**本次实验标定陀螺仪的方法为：(每次都使用外框旋转还是三个框都使用)**

1. **单轴精度测试**
2. **工作位置初始化**

工作位置指与测试人员端起传感器测量时的姿态基本一致的位置，即roll轴和pitch轴基本水平，yaw轴朝天。工作时pitch和roll转过的角度不会超过±90°，所以测量pitch和roll轴旋转精度时最大旋转60°，yaw轴最大360°。

*测试一：工作位置初始化，转台三框初始化位置为(0°,-180°,0°)，正转，测量Yaw和Pitch*

实验步骤如下：

初始化位置对应三轴转台角度：外框0°，中框-180°，内框0°，记录初始化位置处三轴角度，应接近于0″；(-0°0′1″，-0°0′3″，0°0′0″)

1. 正转，首先转Yaw轴，其对应外框，依次旋转外框90°，180°，270°，360°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；
2. 旋转Pitch轴，其对应中框，依次旋转外框15°，30°，45°，60°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；
3. 将对应的测试数据填入表格1中。

表 1. 工作位置初始化，转台三框初始化位置为(0°,-180°,0°)，正转，测量Yaw和Pitch

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 轴 |  | 角度/° | | | |
| Yaw  (外框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (90,-180,0) | (180,-180,0) | (270,-180,0) | (360,-180,0) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (90,0,0) | (180,0,0) | (270,0,0) | (360,0,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (-0°0′1″，  -0°0′3″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (-0°0′0″，  -0°0′0″，  -0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (90°0′1″，  0°0′0″，  0°0′5″) | (180°0′0″，  0°0′1″，  0°0′2″) | (-89°59′56″，  0°0′3″，  -0°0′1″) | (-0°0′0″，  -0°0′0″，  -0°0′1″) |
|  | | | | | |
| Pitch (中框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (0,-165,0) | (0,-150,0) | (0,-135,0) | (0,-120,0) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,15,0) | (0,30,0) | (0,45,0) | (0,60,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (-0°0′0″，  -0°0′1″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  -0°0′0″，  0°0′0″) | (-0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′2″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (0°0′2″，  14°59′59″，  0°0′2″) | (0°0′6″，  30°0′2″，  0°0′1″) | (0°0′9″，  45°0′5″，  0°0′1″) | (0°0′13″，  60°0′10″，  -0°0′0″) |

*测试二：工作位置初始化，转台三框初始化位置为(0°,-180°,0°)，反转，测量Yaw和Pitch*

实验步骤如下：

1. 初始化位置对应三轴转台角度：外框0°，中框-180°，内框0°，记录初始化位置处三轴角度，应接近于0″；
2. 反转，首先转Yaw轴，其对应外框，依次旋转外框-90°，-180°，-270°，-360°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；
3. 旋转Pitch轴，其对应中框，依次旋转外框-15°，-30°，-45°，-60°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；
4. 将对应的测试数据填入表格2中。

表 2. 工作位置初始化，转台三框初始化位置为(0°,-180°,0°)，反转，测量Yaw和Pitch

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 轴 |  | 角度/° | | | |
| Yaw  (外框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (-90,-180,0) | (-180,-180,0) | (-270,-180,0) | (-360,-180,0) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (-90,0,0) | (-180,0,0) | (-270,0,0) | (-360,0,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  -0°0′2″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′2″，  -0°0′1″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (-90°0′2″，  0°0′2″，  0°0′0″) | (-179°59′57″，  0°0′4″，  0°0′4″) | (89°59′58″，  -0°0′3″，  -0°0′10″) | -0°0′3″，  -0°0′1″，  -0°0′2″) |
|  | | | | | |
| Pitch (中框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (0,-195,0) | (0,-210,0) | (0,-225,0) | (0,-240,0) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,-15,0) | (0,-30,0) | (0,-45,0) | (0,-60,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (-0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (-0°0′3″，  -14°59′59″，  -0°0′1″) | (-0°0′9″，  -30°0′0″，  -0°0′6″) | (-0°0′15″，  -44°59′58″，  -0°0′11″) | (-0°0′29″，  -59°59′56″，  -0°0′25″) |

*测试三：非工作位置初始化，转台三框初始化位置为(0°,-180°,90°)，正转，测量Yaw和Roll*

实验步骤如下：

1. 初始化位置对应三轴转台角度：外框0°，中框-180°，内框90°，记录初始化位置处三轴角度，应接近于0″；
2. 正转，首先转Yaw轴，其对应外框(内框)，依次旋转外框90°，180°，270°，360°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；
3. 旋转Roll轴，其对应中框，依次旋转外框15°，30°，45°，60°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；
4. 将对应的测试数据填入表格2中。

表 3. 工作位置初始化，转台三框初始化位置为(0°,-180°,90°)，正转，测量Yaw和Roll

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 轴 |  | 角度/° | | | |
| Yaw  (外框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (90,-180,90) | (180,-180,90) | (270,-180,90) | (360,-180,90) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (90,0,0) | (180,0,0) | (270,0,0) | (360,0,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (-0°0′2″，  0°0′0″，  -0°0′2″) | (-0°0′0″，  -0°0′1″，  -0°0′2″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  -0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (90°0′1″，  -0°0′22″，  -0°0′0″) | (-179°59′59″，  -0°0′17″，  0°0′21″) | (-89°59′55″，  0°0′0″，  0°0′17″) | (0°0′0″，  -0°0′1″，  -0°0′2″) |
| Roll (中框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (0,-165,90) | (0,-150,90) | (0,-135,90) | (0,-120,90) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,0,15) | (0,0,30) | (0,0,45) | (0,0,60) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (-0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′2″) | (-0°0′0″，  -0°0′0″，  -0°0′2″) | (-0°0′0″，  -0°0′0″，  0°0′0″) | (-0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (0°0′4″，  0°0′0″，  15°0′3″) | (0°0′6″，  0°0′1″，  29°59′57″) | (0°0′9″，  0°0′5″，  45°0′0″) | (0°0′11″，  0°0′9″，  60°0′0″) |

*测试四：工作位置初始化，转台三框初始化位置为(0°,-180°,90°)，反转，测量Yaw和Roll*

实验步骤如下：

1. 初始化位置对应三轴转台角度：外框0°，中框-180°，内框90°，记录初始化位置处三轴角度，应接近于0″；
2. 反转，首先转Yaw轴，其对应外框(内框)，依次旋转外框-90°，-180°，-270°，-360°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；
3. 旋转Roll轴，其对应中框，依次旋转外框-15°，-30°，-45°，-60°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；
4. 将对应的测试数据填入表格4中。

表 4. 工作位置初始化，转台三框初始化位置为(0°,-180°,90°)，反转，测量Yaw和Roll

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 轴 |  | 角度/° | | | |
| Yaw  (外框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (-90,-180,90) | (-180,-180,90) | (-270,-180,90) | (-360,-180,90) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (-90,0,0) | (-180,0,0) | (-270,0,0) | (-360,0,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (-0°0′2″，  -0°0′0″，  -0°0′2″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′2″) | (0°0′0″，  -0°0′0″，  0°0′5″) | (-0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (-90°0′5″，  0°0′1″，  0°0′18″) | (-180°0′0″，  -0°0′20″，  0°0′16″) | (89°59′59″，  -0°0′14″，  -0°0′1″) | (0°0′1″，  -0°0′0″，  -0°0′2″) |
|  | | | | | |
| Roll (中框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (0,-195,90) | (0,-210,90) | (0,-225,90) | (0,-240,90) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,0,-15) | (0,0,-30) | (0,0,-45) | (0,0,-60) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  -0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (-0°0′3″，  0°0′0″，  -15°0′0″) | (-0°0′7″，  0°0′3″，  -30°0′0″) | (-0°0′9″，  0°0′6″，  -45°0′0″) | (-0°0′11″，  0°0′9″，  -59°59′59″) |

1. **非工作位置初始化**

*测试五：**Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，外框正反转，测量Roll*

a) 初始化位置对应三轴转台角度：外框0°，中框-90°，内框0°，记录初始化位置处三轴角度，应接近于0″；

b) 首先正转Roll轴，其对应外框，依次旋转外框15°，30°，45°，60°，90°，180°，270°，360°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；

c) 接着反转Roll轴，其对应外框，依次旋转外框-15°，-30°，-45°，-60°，-90°，-180°，-270°，-360°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；

d) 将对应的测试数据填入表格5中。

表 5. Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，外框正反转，测量Roll

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 轴 |  | 角度/° | | | |
| Roll  (外框正转) | 转台输入角度  (外，中，内) | (15,-90,0) | (30,-90,0) | (45,-90,0) | (60,-90,0) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,0,15) | (0,0,30) | (0,0,45) | (0,0,60) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  -0°0′2″，  -0°0′2″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (0°0′0″，  -0°0′5″，  14°59′56″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  29°59′59″) | (-0°0′1″，  0°0′0″，  44°59′58″) | (-0°0′2″，  0°0′0″，  59°59′59″) |
| 转台输入角度  (外，中，内) | (90,-90,0) | (180,-90,0) | (270,-90,0) | (360,-90,0) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,0,90) | (0,0,180) | (0,0,270) | (0,0,360) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (-0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  -0°0′0″) | (-0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (-0°0′0″，  -0°0′1″，  90°0′1″) | (-0°0′0″，  -0°0′3″，  179°59′59″) | (0°0′3″，  -0°0′1″，  -89°59′59″) | (0°0′1″，  -0°0′0″，  -0°0′2″) |
| 轴 |  | 角度/° | | | |
| Roll  (外框反转) | 转台输入角度  (外，中，内) | (-15,-90,0) | (-30,-90,0) | (-45,-90,0) | (-60,-90,0) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,0,-15) | (0,0,-30) | (0,0,-45) | (0,0,-60) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  -0°0′2″，  -0°0′2″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (0°0′0″，  -0°0′3″，  -15°0′1″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  -29°59′59″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  -45°0′1″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  -60°0′0″) |
| 转台输入角度  (外，中，内) | (-90,-90,0) | (-180,-90,0) | (-270,-90,0) | (-360,-90,0) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,0,-90) | (0,0,-180) | (0,0,-270) | (0,0,-360) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  -0°0′1″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (0°0′0″，  0°0′0″，  -90°0′2″) | (0°0′2″，  -0°0′1″，  179°59′55″) | (0°0′0″，  -0°0′2″，  89°59′57″) | (0°0′2″，  -0°0′2″，  0°0′2″) |

*测试六：**Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，中框正反转，测量Pitch*

a) 初始化位置对应三轴转台角度：外框0°，中框-90°，内框0°，记录初始化位置处三轴角度，应接近于0″；

b) 首先正转Pitch轴，其对应中框，依次旋转中框15°，30°，45°，60°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；

c) 接着反转Pitch轴，其对应外中框，依次旋转中框-15°，-30°，-45°，-60°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；

d) 将对应的测试数据填入表格6中。

表 6. Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，中框正反转，测量Pitch

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 轴 |  | 角度/° | | | |
| Pitch  (中框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (0,-75,0) | (0,-60,0) | (0,-45,0) | (0,-30,0) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,15,0) | (0,30,0) | (0,45,0) | (0,60,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  -0°0′2″，  -0°0′2″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (0°0′4″，  15°0′0″，  -0°0′2″) | (0°0′6″，  30°0′8″，  0°0′1″) | (0°0′9″，  45°0′11″，  0°0′1″) | (0°0′14″，  60°0′15″，  0°0′0″) |
| Pitch (中框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (0,-105,0) | (0,-120,0) | (0,-135,0) | (0,-150,0) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,-15,0) | (0,-30,0) | (0,-45,0) | (0,-60,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′1″，  -0°0′1″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (-0°0′3″，  -15°0′3″，  -0°0′1″) | (-0°0′8″，  -30°0′8″，  -0°0′4″) | (-0°0′15″，  -45°0′11″，  -0°0′10″) | (-0°0′25″，  -60°0′16″，  -0°0′23″) |

*测试七：**Pitch朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,-90°)，外框正反转，测量Pitch*

a) 初始化位置对应三轴转台角度：外框0°，中框-90°，内框-90°，记录初始化位置处三轴角度，应接近于0″；

b) 首先正转Pitch轴，其对应外框，依次旋转外框15°，30°，45°，60°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；

c) 接着反转Pitch轴，其对应外框，依次旋转外框-15°，-30°，-45°，-60°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；

d) 将对应的测试数据填入表格7中。

表 7. Pitch朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,-90°)，外框正反转，测量Pitch

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 轴 |  | 角度/° | | | |
| Pitch  (外框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (15,-90,-90) | (30,-90,-90) | (45,-90,-90) | (60,-90,-90) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,15,0) | (0,30,0) | (0,45,0) | (0,60,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  -0°0′2″，  0°0′2″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (0°0′0″，  14°59′56″，  0°0′2″) | (0°0′0″，  30°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  45°0′1″，  0°0′0″) | (0°0′1″，  60°0′2″，  0°0′0″) |
| Pitch (外框) | 转台输入角度  (外，中，内) | (-15,-90,-90) | (-30,-90,-90) | (-45,-90,-90) | (-60,-90,-90) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (0,-15,0) | (0,-30,0) | (0,-45,0) | (0,-60,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (-0°0′1″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (0°0′0″，  -15°0′0″，  0°0′0″) | (-0°0′1″，  -30°0′2″，  0°0′0″) | (-0°0′1″，  -45°0′2″，  0°0′0″) | (-0°0′2″，  -60°0′3″，  -0°0′2″) |

注：测试六和测试七Pitch转过的角度都不能超过±90°。

*测试八：**Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，内框正反转，测量Yaw*

a) 初始化位置对应三轴转台角度：外框0°，中框-90°，内框0°，记录初始化位置处三轴角度，应接近于0″；

b) 首先正转Yaw轴，其对应内框，依次旋转内框15°，30°，45°，60°，90°，180°，270°，360°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；

c) 接着反转Yaw轴，其对应内框，依次旋转内框-15°，-30°，-45°，-60°，-90°，-180°，-270°，-360°，记录旋转后三轴角度，应与三轴测量角度理论值差异不大。每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化，并记录初始化位置处三轴角度；

d) 将对应的测试数据填入表格8中。

表 8. Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，内框正反转，测量Yaw

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 轴 |  | 角度/° | | | |
| Yaw  (内框反转) | 转台输入角度  (外，中，内) | (0,-90,-15) | (0,-90,-30) | (0,-90,-45) | (0,-90,-60) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (15,0,0) | (30,0,0) | (45,0,0) | (60,0,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  -0°0′3″，  -0°0′2″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  -0°0′1″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (15°0′1″，  -0°0′3″，  -0°0′1″) | (30°0′4″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (45°0′5″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (60°0′5″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 转台输入角度  (外，中，内) | (0,-90,-90) | (0,-90,-180) | (0,-90,-270) | (0,-90,-360) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (90,0,0) | (180,0,0) | (270,0,0) | (360,0,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′1″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (90°0′10″，  0°0′4″，  0°0′2″) | (179°59′57″，  0°0′6″，  -0°0′2″) | (-90°0′6″，  -0°0′1″，  -0°0′2″) | (-0°0′4″，  -0°0′2″，  0°0′2″) |
| 轴 |  | 角度/° | | | |
| Yaw  (内框正转) | 转台输入角度  (外，中，内) | (0,-90,15) | (0,-90,30) | (0,-90,45) | (0,-90,60) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (-15,0,0) | (-30,0,0) | (-45,0,0) | (-60,0,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  -0°0′2″，  -0°0′1″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′1″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (-15°0′1″，  -0°0′2″，  -0°0′1″) | (-30°0′2″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (-45°0′3″，  -0°0′1″，  0°0′0″) | (-60°0′6″，  0°0′0″，  -0°0′1″) |
| 转台输入角度  (外，中，内) | (0,-90,90) | (0,-90,180) | (0,-90,270) | (0,-90,360) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (-90,0,0) | (-180,0,0) | (-270,0,0) | (-360,0,0) |
| 初始化后三轴测角(y,p,r接近0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″) | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′1″) |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (-90°0′8″，  0°0′1″，  -0°0′1″) | (-179°59′56″，  0°0′5″，  0°0′1″) | (90°0′7″，  0°0′0″，  0°0′2″) | (0°0′7″，  0°0′0″，  0°0′0″) |

1. **三轴精度测试**

*测试九：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*

* 1. 初始化位置对应三轴转台角度：外框0°，中框-90°，内框0°,此时，外框——roll，中框——pitch，内框——yaw，并且内框正负方向与yaw轴测量方向是相反的；
  2. 按表格9中设计的转台角度依次输入数据，每次旋转后都要恢复到初始化位置，重新初始化；
  3. 通过matlab程序计算三轴转台依次转过设计角度后(设计角度为”三轴相对于初始位置(y,p,r)”)，理论的欧拉角值，并填入“三轴测量角度理论(y,p,r)”对应的表格中,“实际测量角度(y,p,r)”与“三轴测量角度理论(y,p,r)”相接近；

注意：设计的传感器朝向尽量让传感器的Roll轴指向斜上方，防止传感器位置移动；

* 1. 将对应的测试数据填入表格9中。

表 9. 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

每测试五组数据初始化一次，共初始化三次，初始化位置测得角度如下：

1.(0°0′1，-0°0′2″，-°0′2) 2.(0°0′0，-0°0′0″，0°0′0) 3.(0°0′0，-0°0′0″，-0°0′0)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 角度/° | | | | |
| 转台输入角度  (外，中，内) | (-45,-135,10) | (-15,-135,10) | (-45,-105,40) | (30,-70,60) | (45,-110,60) |
| 三轴相对于初始位置(y,p,r) | (-10,-45,-45) | (-10,-45,-15) | (-40,-15,-45) | (-60,20,30) | (-60,-20,45) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (-41°27′30″，  -21°41′30″，  -57°26′42″） | (-26°33′2″，  -38°52′48″，  -28°40′15″） | (-38°47′23″，  18°19′11″，  -43°59′18″） | (-60°38′55″，  -16°33′13″，  31°53′54″） | (-46°17′14″，  -47°9′47″，  12°14′12″） |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (-41°27′49″  -21°41′32″  -57°27′5″) | (-26°33′31″，  -38°52′57″，  -28°40′48″) | (-38°47′22″，  18°19′12″，  -43°59′44″) | (-60°39′24″，  -16°33′1″，  31°53′24″) | (-20°31′26″，  -39°46′56″，  30°9′24″) |
|  | 角度/° | | | | |
| 转台输入角度  (外，中，内) | (45,-120,-10) | (10,-100,-60) | (-4,-88,-20) | (1,-89,90) | (30,-105,-35) |
| 三轴相对于初始位置(y,p,r) | (10,-30,45) | (60,-10,10) | (20,2,-4) | (-90,1,1) | (35,-15,30) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (28°54′29″，  -13°1′33″，  51°3′25″） | (60°25′58″，  3°43′11″，  13°36′58″） | (20°5′22″，  0°30′26″，  -4°26′33″） | (-90°0′0″，  -1°0′0″，  0°59′59″） | (37°17′55″，  5°55′20″，  32°45′12″） |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (28°54′30″，  -13°1′37″，  51°3′27″) | (60°26′1″，  3°43′5″，  13°37′5″） | (19°50′41″，  3°14′22″，  3°4′50″） | (-90°0′0″，  -0°59′56″，  0°59′43″） | (37°17′54″，  5°54′59″，  32°45′18″） |
|  | 角度/° | | | | |
| 转台输入角度  (外，中，内) | (-2,-91,-65) | (10,-100,-30) | (-40,-70,45) | (1,-88,4) | (45,-45,45) |
| 三轴相对于初始位置(y,p,r) | (65,-1,-2) | (30,-10,10) | (-45,20,-40) | (-4,2,1) | (-45,45,45) |
| 三轴测量角度理论  (y,p,r) | (64°59′1″，  -2°14′6″，  0°3′38″） | (31°17′53″，  -3°30′46″，  13°40′12″） | (-30°10′2″，  39°46′32″，  -20°30′29″） | (-4°2′11″，  1°55′30″，  1°8′15″） | (-59°38′19″，  -8°25′15″，  59°38′19″） |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (64°59′9″，  -2°14′6″，  0°3′40″） | (31°18′5″，  -3°30′52″，  13°40′14″） | (-30°9′41″，  39°46′30″，  -20°30′28″） | (-4°2′54″，  1°55′32″，  1°8′13″） | (-59°38′6″，  -8°25′5″，  59°38′16″） |

注意：若数据偏多，则随机选择几组数据测试。

表 9.1. Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，测量完成一个角度都回到初始位置进行初始化,，每5组断电一次，测量三轴精度。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 角度/° | | | | |
| 转台输入角度  (外，中，内) | (-45,-135,10) | (-15,-135,10) | (-45,-105,40) | (30,-70,60) | (45,-110,60) |
| 三轴相对于初始位置(y,p,r) | (-10,-45,-45) | (-10,-45,-15) | (-40,-15,-45) | (-60,20,30) | (-60,-20,45) |
| 初始化角度(y,p,r) | (0°0′2″，  0°0′0″，  0°0′0″） | (0°0′3″，  -0°0′1″，  0°0′″） | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″） | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″） | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″） |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (-41°27′30″，  -21°41′30″，  -57°26′42″） | (-26°33′2″，  -38°52′48″，  -28°40′15″） | (-38°47′23″，  18°19′11″，  -43°59′18″） | (-60°38′55″，  -16°33′13″，  31°53′54″） | (-46°17′14″，  -47°9′47″，  12°14′12″） |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (-41°27′48″，  -21°41′30″，  -57°27′0″) | (-26°33′24″，  -38°52′54″，  -28°40′36″) | (-38°47′31″，  18°19′12″，  -43°59′19″) | (-60°39′6″，  -16°33′11″，  31°53′49″) | (-46°17′45″，  -47°9′57″，  12°13′49″) |
|  | 角度/° | | | | |
| 转台输入角度  (外，中，内) | (45,-120,-10) | (10,-100,-60) | (-4,-88,-20) | (1,-89,90) | (30,-105,-35) |
| 三轴相对于初始位置(y,p,r) | (10,-30,45) | (60,-10,10) | (20,2,-4) | (-90,1,1) | (35,-15,30) |
| 初始化角度(y,p,r) | (0°0′0″，  -0°0′2″，  -0°0′2″） | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″） | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″） | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″） | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″） |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (28°54′29″，  -13°1′33″，  51°3′25″） | (60°25′58″，  3°43′11″，  13°36′58″） | (20°5′22″，  0°30′26″，  -4°26′33″） | (-90°0′0″，  -1°0′0″，  0°59′59″） | (37°17′55″，  5°55′20″，  32°45′12″） |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (28°54′31″，  -13°1′40″，  51°3′26″) | (60°26′16″，  3°43′14″，  13°36′56″) | (20°5′24″，  0°30′26″，  -4°26′32″) | (-90°0′9″，  -0°59′57″，  0°59′58″) | (37°18′1″，  5°55′19″，  32°45′14″) |
|  | 角度/° | | | | |
| 转台输入角度  (外，中，内) | (-2,-91,-65) | (10,-100,-30) | (-40,-70,45) | (1,-88,4) | (45,-45,45) |
| 三轴相对于初始位置(y,p,r) | (65,-1,-2) | (30,-10,10) | (-45,20,-40) | (-4,2,1) | (-45,45,45) |
| 初始化角度(y,p,r) | (0°0′″，  -0°0′1″，  -0°0′2″） | (0°0′0″，  -0°0′2″，  -0°0′1″） | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″） | (0°0′1″，  0°0′0″，  0°0′0″） | (0°0′0″，  0°0′0″，  0°0′0″） |
| 三轴测量角度理论  (y,p,r) | (64°59′1″，  -2°14′6″，  0°3′38″） | (31°17′53″，  -3°30′46″，  13°40′12″） | (-30°10′2″，  39°46′32″，  -20°30′29″） | (-4°2′11″，  1°55′30″，  1°8′15″） | (-59°38′19″，  -8°25′15″，  59°38′19″） |
| 实际测量角度  (y,p,r) | (64°59′1″，  -2°14′6″，  0°3′38″) | (31°17′58″，  -3°30′51″，  13°40′14″) | (-30°10′0″，  39°46′36″，  -20°30′28″) | (-4°2′9″，  1°55′31″，  1°8′15″) | (-59°38′24″，  -8°25′10″，  59°38′15″) |

1. **时间飘移测试**

*测试十：**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*

1. 传感器初始化；
2. 按表格10中设计的转台角度依次输入数据(角度可选测试九中比较典型的几组数据，注意内框正负方向与yaw轴测量方向是相反，三轴相对于初始位置的理论值可计算得到)，转到相应位置立刻测量此时三轴测量到的角度；
3. 回到初始化位置(注意不要再次初始化)，等待10min，再次转到上述位置，测量此时三轴测量的角度；
4. 将对应的测试数据填入表格10中。

表 10. 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

初始：(0°0′0″，-0°0′2″，-0°0′2″) 10min:(-0°0′1″，0°0′6″，-0°0′8″)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 角度/° | | | | |
| 转台输入角度  (外，中，内) | (10,-100, -60) | (-40,-70,45) | (-15,-135,10) | (1,-88,4) | (30,-105, -35) |
| 三轴相对于初始位置(y,p,r) | (60,-10,10) | (-45,20,-40) | (-10,-45,-15) | (-4,2,1) | (35,-15,30) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (60°25′58″，  3°43′11″，  13°36′58″） | (-30°10′2″，  39°46′32″，  -20°30′29″） | (-26°33′2″，  -38°52′48″，  -28°40′15″） | (-4°2′11″，  1°55′30″，  1°8′15″） | (37°17′55″，  5°55′20″，  32°45′12″） |
| 立刻测量角度  (y,p,r) | (60°26′5″，  3°43′8″，  13°37′0″) | (-30°9′53″，  39°46′33″，  -20°30′35″) | (-26°33′26″，  -38°52′47″，  -28°40′35″) | (-4°2′14″，  1°55′32″，  1°8′4″) | (37°17′58″，  5°55′14″，  32°45′4″) |
| 10min后测量角度  (y,p,r) | (60°26′3″，  3°43′6″，  13°36′49″) | (-30°9′51″，  39°46′44″，  -20°30′34″) | (-26°33′24″，  -38°52′34″，  -28°40′36″) | (-4°2′11″，  1°55′44″，  1°7′58″) | (37°18′3″，  5°55′20″，  32°44′52″) |

注意：若数据偏多，可适当减少测试量。

1. **模仿实际工作场景测试**

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)。

*测试十一：Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，**三轴不停转动，测量陀螺仪整体精度*

1. 传感器初始化；
2. 在表11设计的角度基础上每个框可随机加减一个≤5°的角度，在十分钟内不停转动转台的三个框；
3. 10min后转台三个框停在如表12所示位置(与表10设计值对应)，计算理论的三轴测量角度，并测量实际测量角度；

将对应的测试数据填入表格12中，重复a)~d)。

表 11. 转台不停旋转的角度参考值

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 角度/° | | | | |
| 转台输入角度(外，中，内) | (-35,-135,-45) | (-35,-135,-15) | (-40,-105,-45) | (-60,-70,30) | (-60,-110,45) |
|  | 角度/° | | | | |
| 转台输入角度(外，中，内) | (35,-120,45) | (60,-100,10) | (40,-88,-4) | (-70,-89,1) | (70,-105,30) |
|  | 角度/° | | | | |
| 转台输入角度(外，中，内) | (23,-91,-2) | (30,-100,10) | (-45,-70,-40) | (-4,-88,1) | (36,-135,45) |

表 12. 三轴不停转动，测量陀螺仪整体精度

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 角度/° | | | | |
| 最终转台输入角度(外，中，内) | (10,-100, -60) | (-40,-70,45) | (-15,-135,10) | (1,-88,4) | (30,-105, -35) |
| 三轴相对于初始位置(y,p,r) | (60,-10,10) | (-45,20,-40) | (-10,-45,-15) | (-4,2,1) | (35,-15,30) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (60°25′58″，  3°43′11″，  13°36′58″） | (-30°10′2″，  39°46′32″，  -20°30′29″） | (-26°33′2″，  -38°52′48″，  -28°40′15″） | (-4°2′11″，  1°55′30″，  1°8′15″） | (37°17′55″，  5°55′20″，  32°45′12″） |
| 10min后测量角度  (y,p,r) |  |  |  |  |  |

注意：若数据偏多，可适当减少测试量。

*测试十一(2)：Roll朝天初始化，转台三框初始化位置为(0°,-90°,0°)，在转台轴开环情况下，手动转动仪器，测量陀螺仪整体精度*

1. 传感器初始化；
2. 在转台轴开环的情况下手动转动转台到随机位置。
3. 10min后转台三个框停在如表12所示位置(与表10设计值对应)，计算理论的三轴测量角度，并测量实际测量角度；
4. 将对应的测试数据填入表格12中，重复a)~d)。

开始初始化位置：(0°0′0″，-0°0′2″，-0°0′1″)

10min后测量的初始位置：(-0°0′15″，-0°0′14″，-0°0′11″)

表 12. 三轴不停转动，测量陀螺仪整体精度

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 角度/° | | | | |
| 最终转台输入角度(外，中，内) | (-45,-70,-40) | (-20,-80,20) | (1,-89,10) | (1,-91,-20) | (30,-105, -35) |
| 三轴相对于初始位置(y,p,r) | (40,20,-45) | (-20,10,-20) | (-10,1,1) | (20,-1,1) | (35,-15,30) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (41°37′47″，  -15°37′11″，  -46°22′27″) | (-16°0′46″，  15°40′58″，  -16°0′46″) | (-10°1′0″，  0°48′39″，  1°9′30″) | (20°0′55″，  0°35′51″，  1°16′54″) | (37°17′57″，  5°55′10″，  32°45′6″) |
| 10min后测量角度  (y,p,r) | (41°37′42″，  -15°37′28″，  -46°22′23″) | (-16°0′50″，  15°40′58″，  -16°1′1″) | (-10°1′11″，  0°48′30″，  1°9′14″) | (20°0′46″，  -0°36′5″，  1°16′44″) | (37°17′53″，  5°55′3″，  32°45′15″) |

更换为与测量时间漂移相同的角度：

开始初始化位置：(0°0′0″，-0°0′2″，-0°0′2″)

10min后测量的初始位置：(0°0′5″，-0°0′7″，-0°0′13″)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 角度/° | | | | |
| 最终转台输入角度(外，中，内) | (10,-100, -60) | (-40,-70,45) | (-15,-135,10) | (1,-88,4) | (30,-105, -35) |
| 三轴相对于初始位置(y,p,r) | (60,-10,10) | (-45,20,-40) | (-10,-45,-15) | (-4,2,1) | (35,-15,30) |
| 三轴测量角度理论(y,p,r) | (60°25′58″，  3°43′11″，  13°36′58″） | (-30°10′2″，  39°46′32″，  -20°30′29″） | (-26°33′2″，  -38°52′48″，  -28°40′15″） | (-4°2′11″，  1°55′30″，  1°8′15″） | (37°17′55″，  5°55′20″，  32°45′12″） |
| 10min后测量角度  (y,p,r) | (60°26′10″，  3°42′53″，  13°37′0″） | (-30°9′34″，  39°46′31″，  -20°30′52″） | (-26°33′28″，  -38°52′46″，  -28°40′51″） | (-4°2′5″，  1°55′29″，  1°7′52″） | (37°18′7″，  5°55′4″，  32°45′58″） |

注意：若数据偏多，可适当减少测试量。

1. **相机精度测试**

相机能测试的角度范围为-2°到2°，由于无法保证初始位置反光镜的光轴与激光的光轴重合，所以首先要记录初始位置时的平面镜光轴的角度，尽量调整到激光与平面镜垂直，并调整反光镜到仪器的高度(低于30mm)，保证激光不会射到反光镜外部。

测试一：单角度测试

实验步骤如下：

a) 初始化位置对应三轴转台角度：外框0°，中框-90°，内框0°，将初始化位置测得反光镜位置记录到表格中。α对应内框，β对应中框。α0 = ；β0 = ；

b) 测试α角度，保持中框-90°，内框做对应转动。

c) 恢复到初始位置，保持内框0°，外框做对应转动。(-0.1716,0.0647)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-90,-1.7) | (-90,-1.4) | (-90,-1.1) | (-90,-0.8) | (-90,-0.5) |
| 测量角度理论(α，β) | (1.7,0) | (1.4,0) | (1.1,0) | (0.8,0) | (0.5,0) |
| 实际测量角度(α，β) | (1.5283,0.0727) | (1.2282,0.0710) | (0.9282,0.0701) | (0.6282,0.0679) | (0.3282,0.0668) |
|  |  | | | | |
| 转台输入角度(中，内) | (-90,-0.2) | (-90,0.1) | (-90,0.4) | (-90,0.7) | (-90,1) |
| 测量角度理论(α，β) | (0.2,0) | (-0.1,0) | (-0.4,0) | (-0.7,0) | (-1,0) |
| 实际测量角度(α，β) | ( 0.0284, 0.0655 ) | ( -0.2717 ,  0.0643) | ( -0.5716 ,  0.0620) | ( -0.8717 ,  0.0608 ) | ( -1.1715 ,  0.0593 ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-90,1.3) | (-90,1.6) | (-90,1.9) | (-90,0) |  |
| 测量角度理论(α，β) | (-1.3,0) | (-1.6,0) | (-1.9,0) |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( -1.4717,  0.0585) | (-1.7714 ,  0.0563 ) | ( -2.0713 ,  0.0540) | ( ,  ) | ( ,  ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-91.7,0) | (-91.4,0) | (-91.1,0) | (-90.8,0) | (-90.5,0) |
| 测量角度理论(α，β) | (0,-1.7) | (0,-1.4) | (0,-1.1) | (0,-0.8) | (0,-0.5) |
| 实际测量角度(α，β) | ( -0.1655 ,  -1.6351) | ( -0.1633 ,  -1.3352 ) | (-0.1673 ,  -1.0356) | ( -0.1684 ,  -0.7351 ) | ( -0.1697 ,  -0.4356 ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-90.2,0) | (-89.9,0) | (-89.6,0) | (-89.3,0) | (-89,0) |
| 测量角度理论(α，β) | (0,-0.2) | (0,0.1) | (0,0.4) | (0,0.7) | (0,1) |
| 实际测量角度(α，β) | ( -0.1709 ,  -0.1361) | ( -0.1721 ,  0.1655) | ( -0.1730 ,  0.4647) | ( -0.1740 ,  0.7643 ) | ( -0.1753 ,  1.0649 ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-88.7,0) | (-88.4,0) | (-88.1,0) | (-90,0) |  |
| 测量角度理论(α，β) | (0,1.3) | (0,1.6) | (0,1.9) |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( -0.1768 ,  1.3641) | ( -0.1774 ,  1.6645) | (-0.1798 ,  1.9652) | ( ,  ) | ( ,  ) |
|  |  |  |  |  |  |

表 10

测试二： 双角度测试

实验步骤如下：

a) 初始化位置对应三轴转台角度：外框0°，中框-90°，内框0°，α对应内框，β对应中框。

b) 按表格8中设计的转台角度依次输入37组数据，实验过程中不会旋转转台外框。

c) 记录数据到表格中。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-91.7,-1.7) | (-91.1,-1.7) | (-90.5,-1.7) | (-89.9,-1.7) | (-89.3,-1.7) |
| 转台转过角度 | (1.7,-1.7) | (1.7,-1.1) | (1.7,-0.5) | (1.7,0.1) | (1.7,0.7) |
| 测量角度理论(α，β) |  |  |  |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( 1.5398 ,  -1.6335) | (1.5342 ,  -1.0291 ) | ( 1.5302,  -0.4270) | ( 1.5281,  0.1728 ) | ( 1.5282 ,  0.7733 ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-88.7,-1.7) | (-88.1,-1.7) | (-88.1,-1.1) | (-88.7,-1.1) | (-89.3,-1.1) |
| 转台转过角度 | (1.7,1.3) | (1.7,1.9) | (1.1,1.9) | (1.1,1.3) | (1.1,0.7) |
| 测量角度理论(α，β) |  | 超 |  |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( 1.5296 ,  1.3763) | ( ,  ) | (0.9267 ,  1.9719) | ( 0.9259 ,  1.3700) | ( 0.9261 ,  0.7694 ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-89.9,-1.1) | (-90.5,-1.1) | (-91.1,-1.1) | (-91.7,-1.1) | (-91.7,-0.5) |
| 转台转过角度 | (1.1,0.1) | (1.1,-0.5) | (1.1,-1.1) | (1.1,-1.7) | (0.5,-1.7) |
| 测量角度理论(α，β) |  |  |  |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | (0.9279 ,  0.1700) | ( 0.9296 ,  -0.4291) | ( 0.9320 ,  -1.0293) | (0.9371 ,  -1.6330 ) | ( 0.3345,  -1.6326) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-91.1,-0.5) | (-90.5,-0.5) | (-89.9,-0.5) | (-89.3,-0.5) | (-88.7,-0.5) |
| 转台转过角度 | (0.5,-1.1) | (0.5,-0.5) | (0.5,0.1) | (0.5,0.7) | (0.5,1.3) |
| 测量角度理论(α，β) |  |  |  |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( 0.3315 ,  -1.0326) | (0.3298 ,  -0.4330 ) | (0.3278 ,  0.1665) | ( 0.3255 ,  0.7668 ) | ( 0.3237 ,  1.3661 ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-88.1,-0.5) | (-88.1,0.1) | (-88.7,0.1) | (-89.3,0.1) | (-89.9,0.1) |
| 转台转过角度 | (0.5,1.9) | (-0.1,1.9) | (-0.1,1.3) | (-0.1,0.7) | (-0.1,0.1) |
| 测量角度理论(α，β) |  |  |  |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( 0.3226 ,  1.9667) | ( -0.2800 ,  1.9643) | ( -0.2770 ,  1.3637) | ( -0.2744 ,  0.7632 ) | ( -0.2722 ,  0.1640 ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-90.5,0.1) | (-91.1,0.1) | (-91.7,0.1) | (-91.7,0.7) | (-91.1,0.7) |
| 转台转过角度 | (-0.1,-0.5) | (-0.1,-1.1) | (-0.1,-1.7) | (-0.7,-1.7) | (-0.7,-1.1) |
| 测量角度理论(α，β) |  |  |  |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( -0.2700,  -0.4356) | ( -0.2676 ,  -1.0363 ) | (-0.2657 ,  -1.6357) | (-0.8664 ,  -1.6415 ) | ( -0.8693 ,  -0.4387 ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-90.5,0.7) | (-89.9,0.7) | (-89.3,0.7) | (-88.7,0.7) | (-88.1,0.7) |
| 转台转过角度 | (-0.7,-0.5) | (-0.7,0.1) | (-0.7,0.7) | (-0.7,1.3) | (-0.7,1.9) |
| 测量角度理论(α，β) |  |  |  |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( -0.8693 ,  -0.4390) | ( -0.8722 ,  0.1606 ) | (-0.8745 ,  0.7606) | (-0.8782 ,  1.3612 ) | ( -0.8831 ,  1.9617 ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-88.1,1.3) | (-88.7, 1.3) | (-89.3,1.3) | (-89.9, 1.3) | (-90.5, 1.3) |
| 转台转过角度 | (-1.3,1.9) | (-1.3,1.3) | (-1.3,0.7) | (-1.3,0.1) | (-1.3,-0.5) |
| 测量角度理论(α，β) |  |  |  |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( -1.4874 ,  1.9612) | ( -1.4820,  1.3609 ) | ( -1.4763 ,  0.7590) | ( -1.4724 ,  0.1581 ) | ( -1.4724 ,  0.1581 ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-91.1, 1.3) | (-91.7,1.3) | (-90, 0) |  |  |
| 转台转过角度 | (-1.3,-1.1) | (-1.3,-1.7) | (0,0) |  |  |
| 测量角度理论(α，β) |  |  |  |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( -1.4686 ,  -1.0440) | ( -1.4684 ,  -1.6477 ) | ( ,  ) | ( ,  ) | ( ,  ) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-88.1,1.9) | (-88.7, 1.9) | (-89.3,1.9) | (-89.9, 1.9) | (-90.5, 1.9) |
| 转台转过角度 | (-1.9,1.9) | (-1.9,1.3) | (-1.9,0.7) | (-1.9,0.1) | (-1.9,-0.5) |
| 测量角度理论(α，β) |  |  |  |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( ,  ) | ( -2.0820,  1.3588 ) | ( -2.0770 ,  0.7561) | ( -2.0725 ,  0.1543 ) | ( -2.0696,  -0.4472) |
|  |  |  |  |  |  |
| 转台输入角度(中，内) | (-91.1, 1.9) | (-91.7,1.9) | (-90, 0) |  |  |
| 转台转过角度 | (-1.9,-1.1) | (-1.9,-1.7) | (0,0) |  |  |
| 测量角度理论(α，β) |  |  |  |  |  |
| 实际测量角度(α，β) | ( -2.0681 ,  -1.0501) | ( -2.0672 ,  -1.6536) | ( ,  ) | ( ,  ) | ( ,  ) |

表 11

1. **最终合成精度测试**

需要设计一个预先知道的反光镜位置。

1. **角度时间飘移原因测试**

陀螺仪角度时间飘移的原因大致有两个，一是初始化过程中没有获得精确的地球自转角速度，造成后续的积分误差；二是陀螺仪本身敏感外界角速度存在时间漂移，也就是对于外界的同一角速度，在不同时刻陀螺仪敏感到的数据是不同的。

对于这两个原因，都需要对单片机的程序做一些相应的修改。

原因一：直接调用标定时所用的串口发送函数 ，能够将光电校靶初始位置下敏感的地球自转角速度发送到电脑上。

设计实验记录初始化过程中感受的地球转速和保持仪器不动，再次记录10min后感受的地球自转转速，分析数据 大小变化。

原因二：增加将陀螺仪数据发送到串口的函数

设计实验：

初始化：外框0°，中框-90°，内框0°

初始化后按标定不正交矩阵的方式调整转台位置，分别记录每个转轴按20°/s的转速发来的数据，然后恢复到初始位置，等待10min后再次，重复实验过程。

1. **Roll轴时间漂移较大原因测试**

推测分析Roll轴时间漂移较大的原因:一是算法原因；二是硬件原因，Roll对应的陀螺仪本身时间漂移较大。

三个轴角度计算在算法上用的是统一算法，所以可能的原因是Roll轴陀螺仪所处的位置，造成了Roll的陀螺仪的时间漂移较大。设法改变初始化的位置，即改变初始化时Roll轴陀螺仪相对于地球的位置。传感器正常初始化姿态为：Yaw轴陀螺仪在下方，Pitch轴陀螺仪在右方，Roll轴陀螺仪在后方，对应的转台位置是：外框0°，中框-180°，内框0°。改变Pitch轴和Roll轴相对于地球的位置，即对应的转台位置是：外框0°，中框-180°，内框-90°，重新测时间漂移。