

一种无引北三轴转台标定捷联惯组方法^{*}

曹院

(中国空空导弹研究院·洛阳·471009)

摘要: 使用三轴转台标定捷联惯组时, 需要对三轴转台引北, 用于精准测量捷联惯组相对地球北向的角度。为了减少引北带来的繁重工作量, 在研究传统六位置标定方法的基础上, 设计了十二位置标定方法。给出了十二位置翻转编排, 建立了捷联惯组器件误差参数模型, 详细推导了求解误差参数的方程式, 并在高精度三轴转台上进行了试验验证。结果表明, 在对三轴转台无引北的情况下, 十二位置标定方法仍能标定出捷联惯组的 24 个器件误差参数, 且精度与六位置标定方法相当, 达到了预期目的。

关键词: 捷联惯组; 标定; 无引北; 十二位置

中图分类号: TJ760.6

文献标志码: A

文章编号: 2096-5974(2022)02-0038-06

A Method for Calibrating the Strapdown Inertial Unit by Three-Axis Turntable Without North Reference

CAO Yuan

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009)

Abstract: When calibrating the strapdown inertial unit with the three-axis turntable, it is necessary to lead the three-axis turntable to the north, which is used to accurately measure the angle of the strapdown inertial unit with respect to the north direction of the earth. In order to reduce the heavy workload caused by looking for north reference, based on the study of traditional six position calibration method, a twelve position calibration method is designed. The twelve position flip arrangement is given, the error parameter model of strapdown inertial unit device is established, and the equation for solving the error parameters is derived in detail, and the twelve position calibration method is verified through the experiments on a high precision three axis turntable. The results show that the twelve position calibration method can still calibrate the twenty four error parameters of strapdown inertial unit device, and its accuracy is equivalent to that of the six position calibration method, as a result, the predict purpose has been achieved.

Keywords: strapdown inertial unit; calibration; without north reference; twelve positions

0 引言

目前, 工程中通常采用分立式标定方法对捷联惯组器件误差参数进行标定^[1-2], 该方法直接利用陀螺仪和加速度计的输出量进行计算^[3]。其基本原理是设计编排一组转台位置翻转序列, 以地球自转角速度和重力加速度作为计算基准, 依据建立的陀螺仪和加速度计误差模型, 在转台不同

的翻转位置上计算出捷联惯组各个轴向加速度计误差参数和陀螺仪零偏误差, 而陀螺仪的标度因数误差和非正交性误差是通过转台在标称角速率旋转时的陀螺仪输出值与标称值比较求得^[4-6]。在中低精度捷联惯组器件的标定中, 普遍采用的分立式标定方法是六位置翻转法^[7-9], 工程中还有采用十位置翻转法等, 均是由于不同的测试需求, 在六位置翻转法的基础上设计的。六位置翻转法

* 收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-11-30

基金项目: 航空科学基金 (202000010U0004)

作者简介: 曹院 (1988—), 男, 硕士, 工程师。E-mail: 1052378211@qq.com

需要转台为捷联惯组提供精确的方位基准和水平基准。使用水平仪等设备确定水平基准，操作较为简单，而确定方位基准必须对转台引北，工作量大、成本高，且后期需要定期校准，尤其是转台安装于密闭空间内，给引北带来了极大不便。为降低中低精度捷联惯组标定成本，在研究六位置翻转法的基础上，重新规划了标定流程，设计成十二位置三轴转台翻转标定测试方法。该方法首次采用十二位置翻转法，不依赖转台引北，也可标定出捷联惯组的24个器件误差参数^[10-11]。

1 捷联惯组误差数学模型

在仅考虑标度因数误差、非正交性误差和零偏误差的情况下^[12-13]，建立陀螺仪和加速度计的误差数学模型。

1.1 陀螺仪误差数学模型

$$\begin{bmatrix} N_{GX} \\ N_{GY} \\ N_{GZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + K_{GX} & E_{GXY} & E_{GXZ} \\ E_{GYX} & 1 + K_{GY} & E_{GYZ} \\ E_{GZX} & E_{GZY} & 1 + K_{GZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{GX} \\ D_{GY} \\ D_{GZ} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， N_{GX} 、 N_{GY} 、 N_{GZ} 分别为 X、Y、Z 三个轴向陀螺仪的输出值； K_{GX} 、 K_{GY} 、 K_{GZ} 分别为 X、Y、Z 三个轴向陀螺仪的标度因数误差； E_{GXY} 、 E_{GXZ} 、 E_{GYX} 、 E_{GYZ} 、 E_{GZX} 、 E_{GZY} 分别为 X、Y、Z 三个轴向陀螺仪的非正交性误差； ω_X 、 ω_Y 、 ω_Z 分别为 X、Y、Z 三个轴向的角速度输入值； D_{GX} 、 D_{GY} 、 D_{GZ} 分别为 X、Y、Z 三个轴向陀螺仪的零位误差。

1.2 加速度计误差数学模型

$$\begin{bmatrix} N_{AX} \\ N_{AY} \\ N_{AZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + K_{AX} & E_{AXY} & E_{AXZ} \\ E_{AYX} & 1 + K_{AY} & E_{AYZ} \\ E_{AZX} & E_{AZY} & 1 + K_{AZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{AX} \\ D_{AY} \\ D_{AZ} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， N_{AX} 、 N_{AY} 、 N_{AZ} 分别为 X、Y、Z 三个轴向加速度计的输出值； K_{AX} 、 K_{AY} 、 K_{AZ} 分别为 X、Y、Z 三个轴向加速度计的标度因数误差； E_{AXY} 、 E_{AXZ} 、 E_{AYX} 、 E_{AYZ} 、 E_{AZX} 、 E_{AZY} 分别为 X、Y、Z 三个轴向加速度计的非正交性误差；

a_X 、 a_Y 、 a_Z 分别为 X、Y、Z 三个轴向的加速度输入值； D_{AX} 、 D_{AY} 、 D_{AZ} 分别为 X、Y、Z 三个轴向加速度计的零位误差。

2 十二位置标定方法位置编排

对三轴转台引北的目的是精确标定陀螺仪的零偏误差，六位置翻转法需要精确知道捷联惯组在静态测试时陀螺仪的指向，才能扣除地球自转角速率在该轴向上的投影，这需要转台引北。为了达到转台不引北的目的，十二位置标定方法的设计思路是：通过设计合理的标定位置翻转序列，将转台方位旋转 180°，使六位置翻转法每个静态测试位置上的处于水平面上的陀螺仪测试两次，以消除转台方位不准确对求解零偏误差的影响。

假设三轴转台台面的水平度达到标定捷联惯组的要求，且粗测三轴转台相对于真实北向的方位角度为 θ ，误差角度为 $\Delta\theta$ ，则转台的理论方位角度为 $\theta + \Delta\theta$ ，转台未引北时虽不能精准确定 $\Delta\theta$ ，但 $\Delta\theta$ 值是一小量，小于 5°。如图 1 所示，位置 1 时 Y 轴和 Z 轴位于水平面内，标定前需要计算出 Z 轴指向与真实北向的角度。如图 1 所示，三轴转台在位置 1、位置 5 和位置 9 进行动态测试和静态测试，其他位置进行静态测试。测试顺序为：将三轴转台翻转到位置 1，启动捷联惯组，先动态测试，接着静态测试，完毕后将三轴转台翻转到位置 2，静态测试，完毕后进行位置 3 静态测试，按图 1 翻转顺序依次进行，待十二位置静态测试后，关闭捷联惯组，保存每个测试位置的陀螺仪和加速度计输出值^[14]。

十二位置翻转法比六位置翻转法多 6 个静态测试，会增大标定时间成本，但可节省转台引北的成本，尤其是在标定转台处在不易引北的环境中，十二位置翻转法的优势更加突出。

3 陀螺仪误差系数标定算法

3.1 陀螺仪的标度因数误差和非正交性误差

以求取 X 轴向陀螺仪的标度因数与非正交性误差为例。在位置 1 动态测试中，使转台绕 X 轴以一定转速分别正向和逆向旋转，转速点一般在陀螺仪量程内均匀选择。为避免动态效应，测试时间内转台应匀速旋转。采用整圈测试法，这样可以保证位于水平面的陀螺仪轴向上的地球自转角速度分量在转台旋转一圈后被抵消掉。

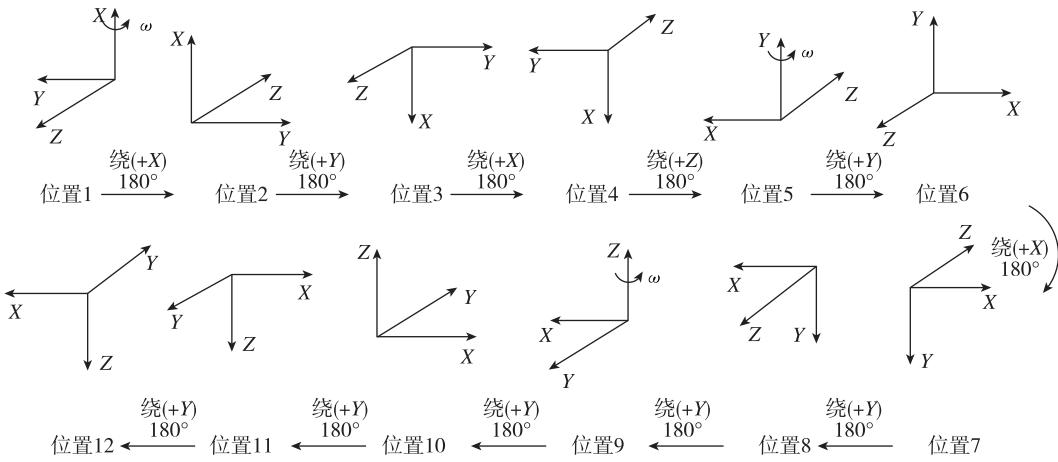


图 1 十二位置标定方法位置编排

Fig. 1 Position arrangement of twelve-position calibration method

在位置 1 的动态测试中, 绕 X 轴正向旋转时的 X 轴角速度输出值为

$$\begin{bmatrix} \omega_{x1} \\ \omega_{y1} \\ \omega_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t + \theta + \Delta\theta) & \sin(\omega t + \theta + \Delta\theta) \\ 0 & -\sin(\omega t + \theta + \Delta\theta) & \cos(\omega t + \theta + \Delta\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega + \omega_{ie} \sin L \\ 0 \\ \omega_{ie} \cos L \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, L 为当地地理纬度; ω 为转台旋转角速度; ω_{ie} 为地球自转角速度。

将式 (3) 代入式 (1) 中, 可得

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{GX1}(t)(+) = (1 + K_{GX})(\omega + \omega_{ie} \sin L) + E_{GYX}\omega_{ie} \cdot \cos L \sin(\omega t + \theta + \Delta\theta) + E_{GZX}\omega_{ie} \cos L \cdot \cos(\omega t + \theta + \Delta\theta) + D_{GX} \\ N_{GY1}(t)(+) = (1 + K_{GY})\omega_{ie} \cos L \sin(\omega t + \theta + \Delta\theta) + E_{GXY}(\omega + \omega_{ie} \sin L) + E_{GZY}\omega_{ie} \cdot \cos L \cos(\omega t + \theta + \Delta\theta) + D_{GY} \\ N_{GZ1}(t)(+) = (1 + K_{GZ})\omega_{ie} \cos L \cos(\omega t + \theta + \Delta\theta) + E_{GXZ}(\omega + \omega_{ie} \sin L) + E_{GYZ}\omega_{ie} \cdot \cos L \sin(\omega t + \theta + \Delta\theta) + D_{GZ} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中, $N_{GX1}(t)(+)$ 、 $N_{GY1}(t)(+)$ 、 $N_{GZ1}(t)(+)$ 分别为转台在位置 1 以 ω 角速度正向旋转时 X、Y、Z 三个陀螺仪轴向的输出值。

在转台正向旋转一圈后, 对三个轴向陀螺仪的输出值求和, 可得

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum N_{GX1}(t)(+) = \sum \omega K_{GX} + \sum D_{GX} + \omega T \\ \sum N_{GY1}(t)(+) = \sum \omega E_{GYX} + \sum D_{GY} + \omega T \\ \sum N_{GZ1}(t)(+) = \sum \omega E_{GZX} + \sum D_{GZ} + \omega T \end{array} \right. \quad (5)$$

式中, T 为转台旋转一圈的时间。

同理, 转台以 ω 角速度负向旋转一圈, 对三个轴向陀螺仪的输出值求和, 可得

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum N_{GX1}(t)(-) = -\sum \omega K_{GX} + \sum D_{GX} + \omega T \\ \sum N_{GY1}(t)(-) = -\sum \omega E_{GYX} + \sum D_{GY} + \omega T \\ \sum N_{GZ1}(t)(-) = -\sum \omega E_{GZX} + \sum D_{GZ} + \omega T \end{array} \right. \quad (6)$$

式中, $N_{GX1}(t)(-)$ 、 $N_{GY1}(t)(-)$ 、 $N_{GZ1}(t)(-)$ 分别为转台在位置 1 以 ω 角速度负向旋转时 X、Y、Z 三个轴向陀螺仪的输出值。

式 (5) 减式 (6), 可得

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta N_{GX1} = 2\omega K_{GX} \\ \Delta N_{GY1} = 2\omega E_{GYX} \\ \Delta N_{GZ1} = 2\omega E_{GZX} \end{array} \right. \quad (7)$$

同理, 对位置 5 和位置 9 动态测试的陀螺仪输出值做同样推导, 可得

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta N_{GX5} = 2\omega E_{GYX} \\ \Delta N_{GY5} = 2\omega K_{GY} \\ \Delta N_{GZ5} = 2\omega E_{GYZ} \\ \Delta N_{GX9} = 2\omega E_{GZX} \\ \Delta N_{GY9} = 2\omega E_{GZY} \\ \Delta N_{GZ9} = 2\omega K_{GZ} \end{array} \right. \quad (8)$$

由式 (7) 和式 (8) 可求得在 ω 转速下三个

轴向陀螺仪的标度因数误差和非正交性误差。通过计算不同转速点下的标度因数误差和非正交性误差，利用最小二乘法可计算出三个轴向陀螺仪的标度因数误差和非正交性误差。

3.2 陀螺仪的零偏误差

利用位置1~位置12静态测试的陀螺仪的输出可求得陀螺仪的零偏误差。

通过式(1)和式(3)，以及地球自转角速度在X、Y、Z轴向上的分量，可求得位置1时三个轴向陀螺仪的输出为

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{GX1} = (1 + K_{GX})\omega_{ie}\sin L + E_{GYX}\omega_{ie}\cos L \sin(\theta + \Delta\theta) + E_{GZX}\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) + D_{GX1} \\ N_{GY1} = (1 + K_{GY})\omega_{ie}\cos L \sin(\theta + \Delta\theta) + E_{GXY}\omega_{ie}\sin L + E_{GZY}\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) + D_{GY1} \\ N_{GZ1} = (1 + K_{GZ})\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) + E_{GXZ}\omega_{ie}\sin L + E_{GYZ}\omega_{ie}\cos L \sin(\theta + \Delta\theta) + D_{GZ1} \end{array} \right. \quad (9)$$

同理，可求得位置2时三个轴向陀螺仪的输出为

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{GX2} = (1 + K_{GX})\omega_{ie}\sin L + E_{GYX}\omega_{ie}\cos L \sin(\theta + \Delta\theta) + E_{GZX}\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) + D_{GX2} \\ N_{GY2} = (1 + K_{GY})\omega_{ie}\cos L \sin(\theta + \Delta\theta) + E_{GXY}\omega_{ie}\sin L + E_{GZY}\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) + D_{GY2} \\ N_{GZ2} = (1 + K_{GZ})\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) + E_{GXZ}\omega_{ie}\sin L + E_{GYZ}\omega_{ie}\cos L \sin(\theta + \Delta\theta) + D_{GZ2} \end{array} \right. \quad (10)$$

同理，可求得位置3时三个轴向陀螺仪的输出为

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{GX3} = -(1 + K_{GX})\omega_{ie}\sin L - E_{GYX}\omega_{ie}\cos L \sin(\theta + \Delta\theta) + E_{GZX}\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) + D_{GX3} \\ N_{GY3} = -(1 + K_{GY})\omega_{ie}\cos L \sin(\theta + \Delta\theta) - E_{GXY}\omega_{ie}\sin L + E_{GZY}\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) + D_{GY3} \\ N_{GZ3} = (1 + K_{GZ})\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) - E_{GXZ}\omega_{ie}\sin L - E_{GYZ}\omega_{ie}\cos L \sin(\theta + \Delta\theta) + D_{GZ3} \end{array} \right. \quad (11)$$

同理，可求得位置4时三个轴向陀螺仪的输出为

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{GX4} = -(1 + K_{GX})\omega_{ie}\sin L + E_{GYX}\omega_{ie}\cos L \cdot \sin(\theta + \Delta\theta) - E_{GZX}\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) + D_{GX4} \\ N_{GY4} = (1 + K_{GY})\omega_{ie}\cos L \sin(\theta + \Delta\theta) - E_{GXY}\omega_{ie}\sin L - E_{GZY}\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) + D_{GY4} \\ N_{GZ4} = -(1 + K_{GZ})\omega_{ie}\cos L \cos(\theta + \Delta\theta) - E_{GXZ}\omega_{ie}\sin L + E_{GYZ}\omega_{ie}\cos L \sin(\theta + \Delta\theta) + D_{GZ4} \end{array} \right. \quad (12)$$

由式(9)~式(12)相加，计算可得位置1~位置4三个轴向陀螺仪的零偏误差均值为

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{GX1\sim 4} = (N_{GX1} + N_{GX2} + N_{GX3} + N_{GX4})/4 \\ D_{GY1\sim 4} = (N_{GY1} + N_{GY2} + N_{GY3} + N_{GY4})/4 \\ D_{GZ1\sim 4} = (N_{GZ1} + N_{GZ2} + N_{GZ3} + N_{GZ4})/4 \end{array} \right. \quad (13)$$

同理，可求得位置5~位置8和位置9~位置12的陀螺仪零偏误差均值，则三个轴向陀螺仪的零偏误差为

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{GX} = (D_{GX1\sim 4} + D_{GX5\sim 8} + D_{GX9\sim 12})/3 \\ \quad = (N_{GX1} + N_{GX2} + \dots + N_{GX12})/12 \\ D_{GY} = (D_{GY1\sim 4} + D_{GY5\sim 8} + D_{GY9\sim 12})/3 \\ \quad = (N_{GY1} + N_{GY2} + \dots + N_{GY12})/12 \\ D_{GZ} = (D_{GZ1\sim 4} + D_{GZ5\sim 8} + D_{GZ9\sim 12})/3 \\ \quad = (N_{GZ1} + N_{GZ2} + \dots + N_{GZ12})/12 \end{array} \right. \quad (14)$$

4 加速度计误差系数标定算法

在静态测试中，垂直方向的加速度计受到重力影响，可根据输出值计算该轴向加速度计的标度因数误差和零偏误差；水平方向的加速度计主要受到非正交性误差的影响，可根据输出值计算非正交性误差。

由式(2)和图1，可计算位置1和位置2时三个轴向加速度计的输出为

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{AX12} = (1 + K_{AX}) \times g + D_{AX} \\ N_{AY12} = E_{AXY} \times g + D_{AY} \\ N_{AZ12} = E_{AZY} \times g + D_{AZ} \end{array} \right. \quad (15)$$

式中，g为当地重力加速度。

同理，可计算位置3和位置4时三个轴向加速度计的输出为

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{AX34} = -(1 + K_{AX}) \times g + D_{AX} \\ N_{AY34} = -E_{AXY} \times g + D_{AY} \\ N_{AZ34} = -E_{AZY} \times g + D_{AZ} \end{array} \right. \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可计算得

$$\begin{cases} K_{AX} = (N_{AX12} - N_{AX34})/2 - g \\ D_{AX} = (N_{AX12} + N_{AX34})/2 \\ E_{AXY} = (N_{AY12} - N_{AY34})/(2 \times g) \\ E_{AXZ} = (N_{AZ12} - N_{AZ34})/(2 \times g) \end{cases} \quad (17)$$

同理, 利用位置 5~位置 8 和位置 9~位置 12 的加速度计输出值可求得其余加速度计误差, 则三个轴向加速度计的标度因数误差、非正交性误差和零偏误差为

$$\begin{cases} K_{AX} = (N_{AX12} - N_{AX34})/2 - g \\ K_{AY} = (N_{AY56} - N_{AY78})/2 - g \\ K_{AZ} = (N_{AZ910} - N_{AZ1112})/2 - g \\ E_{AXY} = (N_{AY12} - N_{AY34})/(2 \times g) \\ E_{AXZ} = (N_{AZ12} - N_{AZ34})/(2 \times g) \\ E_{AYX} = (N_{AX56} - N_{AX78})/(2 \times g) \\ E_{AYZ} = (N_{AZ56} - N_{AZ78})/(2 \times g) \\ E_{AZX} = (N_{AX910} - N_{AX1112})/(2 \times g) \\ E_{AZY} = (N_{AY910} - N_{AY1112})/(2 \times g) \\ D_{AX} = (N_{AX12} + N_{AX34})/2 \\ D_{AY} = (N_{AY56} + N_{AY78})/2 \\ D_{AZ} = (N_{AZ910} + N_{AZ1112})/2 \end{cases} \quad (18)$$

5 试验验证

试验用的捷联惯组由三轴光纤陀螺仪组合和三轴石英加速度计组合构成, 是已工程应用的中精度捷联惯组, 其试验结果具有普遍性。光纤陀螺仪的标度因数为 $7.8 (\text{"})/\text{p}$ (p 表示脉冲, 这里表示每个陀螺仪输出脉冲代表的角度值), 石英加速度计的标度因数为 $0.01 (\text{m}/\text{s}^2)/\text{p}$ 。使用高精度三轴转台进行标定试验验证^[15], 如图 2 所示。



图 2 高精度三轴转台

Fig. 2 High precision three axis turtable

首先, 采用六位置翻转标定方法对捷联惯组进行标定, 记录标定结果; 然后, 利用本文设计的十二位置翻转标定方法对捷联惯组再次标定, 记录标定结果。对比两次标定的结果, 如表 1 所示, 表中 g 为当地重力加速度。

表 1 六位置与十二位置标定结果对比表

Tab. 1 Comparison table of calibration results between six positions and twelve positions

误差项	六位置标定法	十二位置标定法	差值
K_{GX}	-0.015 (\") / p	-0.015 (\") / p	0
K_{GY}	0.005 (\") / p	0.005 (\") / p	0
K_{GZ}	0.008 (\") / p	0.008 (\") / p	0
E_{GXY}	5.21'	5.23'	-0.02'
E_{GXZ}	2.61'	2.57'	0.04'
E_{GYX}	-4.82'	-4.79'	-0.03'
E_{GYZ}	0.54'	0.54'	0
E_{GZX}	-3.57'	-3.54'	-0.03'
E_{GZY}	-1.59'	-1.60'	0.01'
D_{GX}	2.04 (°) / h	1.75 (°) / h	0.29 (°) / h
D_{GY}	1.82 (°) / h	1.50 (°) / h	0.32 (°) / h
D_{GZ}	0.48 (°) / h	0.88 (°) / h	-0.40 (°) / h
K_{AX}	0.0010 (m/s^2) / p	0.0010 (m/s^2) / p	0
K_{AY}	0.0005 (m/s^2) / p	0.0005 (m/s^2) / p	0
K_{AZ}	-0.002 (m/s^2) / p	-0.002 (m/s^2) / p	0
E_{AXY}	4.58'	4.57'	0.01'
E_{AXZ}	-1.38'	-1.38'	0
E_{AYX}	0.57'	0.57'	0
E_{AYZ}	7.52'	7.55'	-0.03'
E_{AZX}	-0.85'	-0.81'	-0.04'
E_{AZY}	0.10'	0.09'	0.01'
D_{AX}	0.0004g	0.0003g	0.0001g
D_{AY}	-0.0008g	-0.0008g	0
D_{AZ}	-0.0007g	-0.0007g	0

从表 1 的对比结果可以看出, 采用十二位置标定方法与六位置标定方法对同一捷联惯组的标定结果一致, 说明在三轴转台无引北的情况下, 本文设计的十二位置标定方法仍能准确标定出捷联惯组的 24 个误差参数。

6 结论

本文设计了在三轴转台无引北情况下的十二

位置捷联惯组标定方法，通过在高精度三轴转台上对同一中精度捷联惯组的标定结果进行对比，可以看出，该方法可替代六位置标定方法，降低了中精度捷联惯组标定设备的研制成本，对中精度捷联惯组的标定具有一定的参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 王志伟, 候书铭. 捷联惯测组合快速标定方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2011 (6): 43-47.
- WANG Z W, HOU S M. Rapid calibration method of strapdown inertial measurement [J]. Missiles and Space Vehicles, 2011 (6): 43-47 (in Chinese).
- [2] 曹院, 鲁浩. 三轴惯导测试转台寻零方法应用研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2015, 36 (8): 166-168.
- CAO Y, LU H. Applied research of looking zero for three axis inertial navigation test turntable [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2015, 36 (8): 166-168 (in Chinese).
- [3] 赵桂玲, 高伟, 李仔冰, 等. 高精度光纤陀螺组件标定方法 [J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34 (2): 209-215.
- ZHAO G L, GAO W, LI Z B, et al. Calibration method for high precision fiber-optic gyro unit [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012, 34 (2): 209-215 (in Chinese).
- [4] 乔邦江, 方涛, 王红, 等. 某型捷联式惯导标定原理及步骤 [J]. 科技创新与应用, 2020 (4): 124-126.
- QIAO B J, FANG T, WANG H, et al. Calibration principle and steps of a strapdown inertial navigation system [J]. Technology Innovation and Application, 2020 (4): 124-126 (in Chinese).
- [5] 周章华, 邱宏波, 李延, 等. 用低精度双轴转台对捷联惯导进行系统级标定的方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18 (4): 503-507.
- ZHOU Z H, QIU H B, LI Y, et al. Systematic calibration method for SINS with low-precision two-axis turntable [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18 (4): 503-507 (in Chinese).
- [6] 王文革, 高延滨. 光纤捷联系统标定技术研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2014 (12): 37-40.
- WANG W G, GAO Y B. Strapdown system calibration technology research [J]. Automation & Instrumentation, 2014 (12): 37-40 (in Chinese).
- [7] 陈北鸥, 孙文胜, 张桂宏, 等. 捷联组合(设备无定向)六位置测试标定 [J]. 导弹与航天运载技术, 2001 (3): 23-27.
- CHEN B O, SUN W S, ZHANG G H, et al. Strapdown unit (without orientation) six-position test calibration [J]. Missiles and Space Vehicles, 2001 (3): 23-27 (in Chinese).
- [8] 刘宇, 季廷洪. 基于 Kalman 滤波和六位置法的加速度计标定补偿 [J]. 压电与声光, 2016, 38 (1): 94-98.
- LIU Y, JI T H. Calibrator and compensation for accelerometer based on Kalman filter and a six-position method [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38 (1): 94-98 (in Chinese).
- [9] 胡国欣, 于吉胜. 捷联惯导系统的两种系统级标定方法研究 [J]. 遥测遥控, 2020, 41 (4): 68-72.
- HU G X, YU G S. Research on two systematic calibration methods for strapdown inertial navigation system [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41 (4): 68-72 (in Chinese).
- [10] 卿立, 李海强. 中低精度捷联惯测装置的不开箱标定方法研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2004 (4): 31-34.
- QING L, LI H Q. Method of calibrating strapdown inertial measurement unit of middle and low accuracy without opening box [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2004 (4): 31-34 (in Chinese).
- [11] 张华强, 赵剡, 陈雨. 捷联惯性导航系统整体标定新方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38 (4): 459-463.
- ZHANG H Q, ZHAO Y, CHEN Y. New system calibration method for strapdown inertial navigation system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38 (4): 459-463 (in Chinese).
- [12] 付梦印, 郑辛. 传递对准理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 21-25.
- FU M Y, ZHENG X. Transfer alignment theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2012: 21-25 (in Chinese).
- [13] 王建中. 激光陀螺捷联惯性导航系统 IMU 误差标定 [J]. 压电与声光, 2018, 40 (3): 448-453.
- WANG J Z. Error calibration of IMU in laser gyro strapdown inertial navigation system [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40 (3): 448-453 (in Chinese).
- [14] 吴运平, 何永前, 林新荣. 捷联惯导系统标定方案设计 [J]. 船舶电子工程, 2017, 37 (2): 47-50, 142.
- WU Y P, HE Y Q, LIN X R. Design of strapdown inertial navigation system calibration scheme [J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37 (2): 47-50, 142 (in Chinese).
- [15] 肖宝亮, 缪晋, 王护利. 捷联惯性测量组合标定仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23 (5): 921-924.
- XIAO B L, MIU J, WANG H L. Simulation research on strapdown inertial measuring unit calibration [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23 (5): 921-924 (in Chinese).