

文章编号 1004-924X(2017)03-0712-08

三轴转台初始位姿对准误差的测试方法

刘庆博,任顺清*,王常虹

(哈尔滨工业大学 空间控制与惯性技术研究中心,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:雷达仿真实验用卧式三轴飞行仿真转台的三轴交汇中心与射频阵列仿真系统球面的球心同心,转台的初始姿态满足一定要求,以减小雷达仿真时的误差。为了三轴转台位姿的精确对准,提出了一种能补偿经纬仪竖直线铅垂度误差和俯仰轴零位误差的对准方案,首先根据精确的已知基点的坐标,通过经纬仪对各基点的观测结果采用最小二乘迭代处理方法,确定了经纬仪的三轴交汇中心的位置,再通过经纬仪对转台的内、中环轴轴端安装的靶标进行观测,确定了三轴转台的位置与初始姿态。通过实际测试与调整,解算出了三轴转台的三轴交汇中的坐标为 $-0.485, 0.203$ 和 -0.475 mm,外环轴指向误差为 $-59''$ 。该测试结果在位置误差1 mm,姿态误差 $2'$ 的要求范围之内,实现了三轴转台的位姿对准任务。

关键词:三轴飞行仿真转台;位姿对准;经纬仪;最小二乘法;迭代算法

中图分类号:TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172503.0712

Measurement method of initial position and attitude alignment error for three-axis simulator

LIU Qing-bo, REN Shun-qing*, WANG Chang-hong

(Space Control and Inertial Technology Research Center,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: renshunqing@hit.edu.cn

Abstract: Three-axis intersecting point of horizontal three-axis flight simulator used for radar simulation experiment shall be homocentric with spherical center of the RF array simulation system, and initial attitude of the simulator shall meet the requirements to reduce the radar simulation error. To achieve accurate position and attitude alignment of the simulator, an alignment method which can compensate for plumb error in vertical axis of the theodolite and the initial angular error in the pitch axis was put forward. Method: first, identified the position where three-axis intersecting point of the theodolite was located by adopting the Iterative Least Square Method based on accurate coordinates of the known base points and observation results of these base points; then determined the position and initial attitude of the three-axis simulator through observation in the targets installed at inner axis and middle axis end of the simulator by theodolite. Through actual test and adjustment, coordinate values in three-axis intersection of the simulator were calculated to be -0.485 mm, 0.203 mm and -0.475 mm, with an outer ring direction error of $-59''$. The test results, within the position error range of 1 mm and attitude error range of $2'$, help achieve position and attitude alignment of the three-axis simulator.

收稿日期:2016-09-10;修订日期:2016-10-17.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2013YQ310737)

Key words: three-axis flight simulator; the position and attitude alignment; theodolite; least square method; iterative algorithm

1 引言

随着电子信息的飞速发展,雷达在现代战争中所起到越来越重要的作用。雷达对抗仿真实验一般在实验室内进行,实验系统由微波暗室,天线阵列,馈电控制系统,三轴仿真转台以及雷达信号模拟系统等组成^[1-6]。三轴转台用来模拟导弹空间的角运动,要求三轴转台的外、中、内环轴的交汇中心位于射频阵列仿真系统球冠的球心上,并且要求中环轴线能指向球冠弧面中心,外环轴线始终水平等要求,即三轴转台必须满足初始位姿精度要求。计量部门以天线阵列球冠的球心为坐标原点,建立基准坐标系,并在球心周围布置了相应的基点,这些基点在已建立的坐标系下的坐标已精确测量出来。本文将利用这些基点实现三轴转台的对准。在实际应用中,多以坐标测量机、全站仪、经纬仪、激光跟踪仪等高精密测量仪器进行位姿的标定^[7-12]。文献[13]在暗室内建立经纬仪/全站仪三维智能测量系统,采用非接触测量模式和几何拟合法数据处理系统进行转台零位基准标定和各项误差的测定与校正,取得良好效果。文献[14]提出了基于全站仪 MetroIn 的高精度微波暗室转台中心测量方法,针对微波暗室特殊的测量环境,结合转台自身特殊的结构特征与运动特性,制定了相应的设备布站与测量实施方案实现了对微波暗室三轴仿真转台旋转中心的测量。文献[15]采用经纬仪将模拟运动球面的球心与转台三轴交汇中心联系起来,采用迭代最小二乘算法实现三轴转台的三轴交汇中心的精确对准,但是没有考虑经纬仪竖直轴线的铅垂度误差和俯仰轴的零位误差的影响。

本文使用经纬仪观测经过精确测量的基点,测量水平角和竖直角,考虑经纬仪竖直轴的铅垂度误差和水平轴零位误差,解算出经纬仪的三轴交汇中心的三维坐标值,将基点的坐标转换到经纬仪坐标系下,再通过三轴转台的内环轴和中环轴端安装靶标,用经纬仪进行观测,解算出三轴转台初始位姿的对准误差,并自动消除经纬仪误差的影响。

2 初始位姿对准误差的测试方法与位姿对准方案

2.1 初始位姿对准误差的测试方法

经纬仪用于位姿对准平面示意如图1所示,以球冠球心 O_0 为坐标原点,以原点指向球冠中心为 O_0Y_0 轴, O_0Z_0 轴竖直向上, O_0X_0 轴与 O_0Y_0 , O_0Z_0 轴构成右手坐标系,并标定出4个基点的坐标。

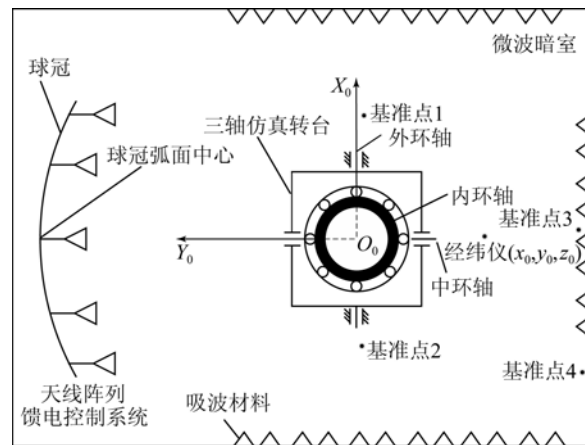


图1 经纬仪用于位姿对准平面示意图

Fig. 1 Sketch for position and attitude alignment using theodolite

在检测时,为了保证三轴转台的对准精度,需要将经纬仪的竖直轴调整到铅垂位置,借助经纬仪的水泡来调平只能达到 $10''$ 的精度,但在观测 5 m 距离处的目标会产生 $5 \text{ m} \times \tan 10'' = 0.25 \text{ mm}$ 的误差,对整个三轴转台的位姿对准的误差影响较大,有必要考虑经纬仪竖直轴对水平面的垂直度(俗称铅垂度)误差 $\Delta\theta_x$, $\Delta\theta_y$, 将它们统一考虑到误差模型中,可以实现自动补偿。

首先建立坐标系,令基准坐标系 $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ 原点为 $(0, 0, 0)$, 即理想的三轴转台的三轴交汇中心的位置,假设经纬仪在基准坐标系下的坐标为 (x_0, y_0, z_0) 。经纬仪坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 是在基准坐标系下平移 (x_0, y_0, z_0) , 然后绕基准坐标系 x 轴方向旋转 $\Delta\theta_x$, 再绕基准坐标系 y 轴方向旋转

$\Delta\theta_y$ 形成,两坐标系的齐次变换矩阵为:

$$\mathbf{T}_1^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & -\Delta\theta_x & 0 \\ -\Delta\theta_y & \Delta\theta_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta\theta_y & x_0 \\ 0 & 1 & -\Delta\theta_x & y_0 \\ -\Delta\theta_y & \Delta\theta_x & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

基准坐标系下的基点 (x_i, y_i, z_i) ($i=1, 2, 3, 4$) 在 经纬仪坐标系下的表示为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Delta\theta_y \\ 0 & 1 & \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y & -\Delta\theta_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ z_i - z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i - x_0 - \Delta\theta_y(z_i - z_0) \\ y_i - y_0 + \Delta\theta_x(z_i - z_0) \\ z_i - z_0 + \Delta\theta_y(x_i - x_0) - \Delta\theta_x(y_i - y_0) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

将 4 个基点投影到 $O_1 X_1 Y_1$ 平面,通过经纬 余弦定理,可得:
仪观测基点 i, j 的水平角之差 α_{ij} ,由平面三角形

$$\begin{aligned} & [x_i - x_j - \Delta\theta_y(z_i - z_j)]^2 + [y_i - y_j + \Delta\theta_x(z_i - z_j)]^2 = \\ & [x_i - x_0 - \Delta\theta_y(z_i - z_0)]^2 + [y_i - y_0 + \Delta\theta_x(z_i - z_0)]^2 + \\ & [x_j - x_0 - \Delta\theta_y(z_j - z_0)]^2 + [y_j - y_0 + \Delta\theta_x(z_j - z_0)]^2 - \\ & 2 \sqrt{[x_i - x_0 - \Delta\theta_y(z_i - z_0)]^2 + [y_i - y_0 + \Delta\theta_x(z_i - z_0)]^2} \cdot \\ & \sqrt{[x_j - x_0 - \Delta\theta_y(z_j - z_0)]^2 + [y_j - y_0 + \Delta\theta_x(z_j - z_0)]^2} \cos\alpha_{ij}. \end{aligned} \quad (3)$$

令 $x_0 = \hat{x}_0 + \Delta x$, $y_0 = \hat{y}_0 + \Delta y$, $z_0 = \hat{z}_0 + \Delta z$, (3)进行线性化,并略去二阶小量,整理得:

$$\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0 \text{ 为经纬仪中心坐标的估计值,可用卷尺} \quad a_k \Delta x + b_k \Delta y + c_k \Delta\theta_x + d_k \Delta\theta_y = e_k, \quad (4)$$

测量,将 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 以及 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ 视为小量对式
其中:

$$\begin{aligned} a_k &= -2x_{0i} - 2x_{0j} + 2 \left[\frac{x_{0i}d_{0j}}{d_{0i}} + \frac{x_{0j}d_{0i}}{d_{0j}} \right] \cos\alpha_{ij}, \\ b_k &= -2y_{0i} - 2y_{0j} + 2 \left[\frac{y_{0i}d_{0j}}{d_{0i}} + \frac{y_{0j}d_{0i}}{d_{0j}} \right] \cos\alpha_{ij}, \\ c_k &= 2y_{0i}z_{0i} + 2y_{0j}z_{0j} - 2 \left[\frac{y_{0i}z_{0i}d_{0j}}{d_{0i}} + \frac{y_{0j}z_{0j}d_{0i}}{d_{0j}} \right] \cos\alpha_{ij} - 2y_{ij}z_{ij}, \\ d_k &= -2x_{0i}z_{0i} - 2x_{0j}z_{0j} + 2 \left[\frac{x_{0i}z_{0i}d_{0j}}{d_{0i}} + \frac{x_{0j}z_{0j}d_{0i}}{d_{0j}} \right] \cos\alpha_{ij} + 2x_{ij}z_{ij}, \\ e_k &= x_{ij}^2 + y_{ij}^2 - x_{0i}^2 - y_{0i}^2 - x_{0j}^2 - y_{0j}^2 + 2d_{0i}d_{0j} \cos\alpha_{ij}, \end{aligned}$$

式中: $x_{ij} = x_i - x_j$, $y_{ij} = y_i - y_j$, $z_{ij} = z_i - z_j$, $x_{0i} =$
 $x_i - \hat{x}_0$, $y_{0i} = y_i - \hat{y}_0$, $x_{0j} = x_j - \hat{x}_0$, $y_{0j} = y_j - \hat{y}_0$, $z_{0i} =$
 $z_i - \hat{z}_0$, $z_{0j} = z_j - \hat{z}_0$, $d_{0i} = \sqrt{x_{0i}^2 + y_{0i}^2}$, $d_{0j} =$
 $\sqrt{x_{0j}^2 + y_{0j}^2}$, $i, j=1, 2, 3, 4$, 每两个点组合,可以得

到 6 个方程。

以上完成了在 $O_1 X_1 Y_1$ 平面内,以经纬仪水
平角建立了各坐标的几何关系。以经纬仪竖直角
建立在含 $O_1 Z_1$ 的几何关系:

$$\tan(\beta_i + \Delta\beta) = \frac{z_i - z_0 + \Delta\theta_y(x_i - x_0) - \Delta\theta_x(y_i - y_0)}{\sqrt{[x_i - x_0 - \Delta\theta_y(z_i - z_0)]^2 + [y_i - y_0 + \Delta\theta_x(z_i - z_0)]^2}}, \quad (5)$$

其中: β_i 为经纬仪观测基点 i 得到的竖直角, $\Delta\beta$
为俯仰轴的零位误差,即经纬仪竖直线铅垂,视
准轴线水平时,经纬仪的读数不为 90° 或 270° 引
起的误差。对式(5)进行整理得到:

$$m_i \Delta x + n_i \Delta y + p_i \Delta z + q_i \Delta\theta_x + r_i \Delta\theta_y + s_i \Delta\beta = t_i, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } m_i &= \frac{x_{0i}z_{0i}}{d_{0i}^2}, n_i = \frac{y_{0i}z_{0i}}{d_{0i}^2}, p_i = -1, q_i = -\frac{y_{0i}z_{0i}^2}{d_{0i}^2} \\ & - y_{0i}, r_i = \frac{x_{0i}z_{0i}^2}{d_{0i}^2} + x_{0i}, s_i = -d_{0i} \sec^2 \beta_i. \end{aligned}$$

将经纬仪 $O_1 X_1 Y_1$ 平面和回转轴所在平面的
表达式写成矩阵的形式,其中 $O_1 X_1 Y_1$ 平面内可
以得到 6 个方程,回转轴所在平面内可以得到 4
个方程,用矩阵的形式表示为:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_6 \\ t_1 \\ \vdots \\ t_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & 0 & c_1 & d_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_6 & b_6 & 0 & c_6 & d_6 & 0 \\ m_1 & n_1 & p_1 & q_1 & r_1 & s_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_4 & n_4 & p_4 & q_4 & r_4 & s_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \theta_x \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

简写为:

$$B = Ak, \quad (8)$$

其中: $k = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta \theta_x \ \Delta \theta_y \ \Delta \beta]^T$ 。

采用最小二乘的方法,得到误差向量 k 的估计值为:

$$\hat{k} = (A^T A)^{-1} A^T B. \quad (9)$$

将 $(\hat{x}_0 + \Delta x, \hat{y}_0 + \Delta y, \hat{z}_0 + \Delta z)$ 作为新的估计值,再次进行迭代计算,直到满足精度要求为止。如果只采用其中 3 个基点观测可能收敛于另一个点,而采用 4 个基点进行测量只能收敛于一点。此算法误差较小,经过几次迭代后,算法误差小于 $1 \mu\text{m}$,所以经纬仪的测量误差决定了中心的三维位置坐标的估计误差。

此位姿对准方法中需要观测的基点数量是 4 个,水平平面可得到 6 个方程,竖直平面可得到 4 个方程,对 6 个未知参数,即 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \theta_x, \Delta \theta_y, \Delta \beta$ 进行最小二乘法的辨识。若只观测其中 3 个基点,水平平面可得到 3 个方程,竖直平面可得到 3 个方程,但在水平平面内得到的 3 个方程无法辨识出 $\Delta x, \Delta y, \Delta \theta_x, \Delta \theta_y$ 4 个参数,所以只观测 3 个基点无法实现未知参数的辨识,只能将 $\Delta \theta_x, \Delta \theta_y, \Delta \beta$ 省略,不能消除它们的影响,所以精度较低。另外,在利用经纬仪对三轴转台进行位姿对准的过程中,计算出的位姿对准误差需要利用式(1)变换到基准坐标系下。

2.2 三轴转台的位置对准方案

为了实现三轴转台的位置对准,首先应测量出转台中心在基准坐标系下的坐标值。如果测量的坐标值不为 0,则应进行相应的调整。在内环轴轴端安装一个十字靶标,由此机械结构的限制,靶标不能安装在三轴交汇中心上,此靶标距离中环轴线也有一定距离 d ,为了解决此问题,可以首先将内环轴线处于水平状态,确定三轴交汇中心的 x, z 坐标值,然后将内环轴线处于铅垂状态,

可以确定三轴交汇中心的 x, y 坐标值,综上所述可以确定出三轴转台的三轴交汇中心的坐标。如图 2、图 3 所示。

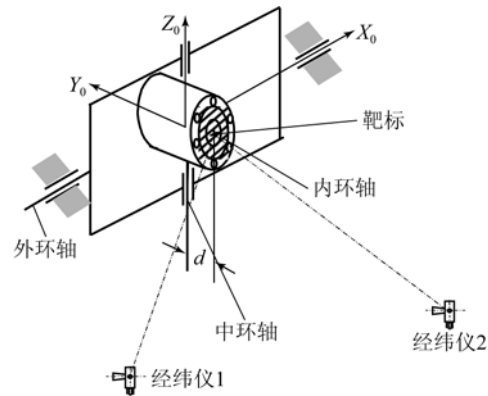


图 2 内环轴水平状态

Fig. 2 Sketch map while inner axis in the horizontal state

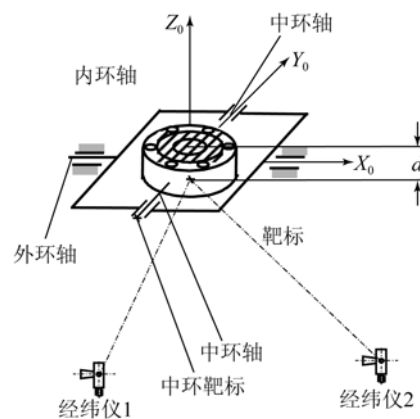


图 3 内环轴铅垂状态

Fig. 3 Sketch map while inner axis in the vertical state

测试时,将十字靶标安装在内环轴端,内环轴等 90° 间隔旋转 4 个位置(中环轴处于铅垂位置),内环轴线与外环轴线垂直,这个状态可以通过水平仪进行精确调整,然后加以精确控制得到。中环轴铅垂时,旋转内环轴时靶标绕内环轴的轨迹是一个圆,圆心在内环轴上,当经纬仪分别对准靶标时,读取的 4 个水平角和竖直角均值为经纬仪指向靶标轨迹圆心时的水平角和竖直角。设此时靶标中心的坐标为 x_p, y_p, z_p (基准坐标系下),可以得出经纬仪分别指向基点和靶标中心的水平角之差 $\alpha_{pi} (i = 1, 2, 3, 4)$,俯仰角 β_i ,由式(3)和(5)可得:

$$\begin{aligned} & [x_i - x_p - \Delta\theta_y(z_i - z_p)]^2 + [y_i - y_p + \Delta\theta_x(z_i - z_p)]^2 = \\ & [x_i - x_0 - \Delta\theta_y(z_i - z_0)]^2 + [y_i - y_0 + \Delta\theta_x(z_i - z_0)]^2 + \\ & [x_p - x_0 - \Delta\theta_y(z_p - z_0)]^2 + [y_p - y_0 + \Delta\theta_x(z_p - z_0)]^2 - \\ & 2\sqrt{[x_i - x_0 - \Delta\theta_y(z_i - z_0)]^2 + [y_i - y_0 + \Delta\theta_x(z_i - z_0)]^2} \cdot \\ & \sqrt{[x_p - x_0 - \Delta\theta_y(z_p - z_0)]^2 + [y_p - y_0 + \Delta\theta_x(z_p - z_0)]^2} \cos\alpha_{ip}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\tan(\beta_p + \Delta\beta) = \frac{z_p - z_0 + \Delta\theta_y(x_p - x_0) - \Delta\theta_x(y_p - y_0)}{\sqrt{[x_p - x_0 - \Delta\theta_y(z_p - z_0)]^2 + [y_p - y_0 + \Delta\theta_x(z_p - z_0)]^2}} \quad (11)$$

再针对经纬仪 2 (其中心坐标为 x'_0, y'_0, z'_0 , 误差为 $\Delta\theta'_x, \Delta\theta'_y, \Delta\beta'$), 可得:

$$\begin{aligned} & [x_i - x_p - \Delta\theta'_y(z_i - z_p)]^2 + [y_i - y_p + \Delta\theta'_x(z_i - z_p)]^2 = \\ & [x_i - x'_0 - \Delta\theta'_y(z_i - z'_0)]^2 + [y_i - y'_0 + \Delta\theta'_x(z_i - z'_0)]^2 + \\ & [x_p - x'_0 - \Delta\theta'_y(z_p - z'_0)]^2 + [y_p - y'_0 + \Delta\theta'_x(z_p - z'_0)]^2 - \\ & 2\sqrt{[x_i - x'_0 - \Delta\theta'_y(z_i - z'_0)]^2 + [y_i - y'_0 + \Delta\theta'_x(z_i - z'_0)]^2} \cdot \\ & \sqrt{[x_p - x'_0 - \Delta\theta'_y(z_p - z'_0)]^2 + [y_p - y'_0 + \Delta\theta'_x(z_p - z'_0)]^2} \cos\alpha'_{ip}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\tan(\beta'_p + \Delta\beta') = \frac{z_p - z'_0 + \Delta\theta'_y(x_p - x'_0) - \Delta\theta'_x(y_p - y'_0)}{\sqrt{[x_p - x'_0 - \Delta\theta'_y(z_p - z'_0)]^2 + [y_p - y'_0 + \Delta\theta'_x(z_p - z'_0)]^2}} \quad (13)$$

针对 x_p, y_p, z_p 做类似式(4)和(6)的线性化处理, 采用最小二乘的迭代算法求解。考虑到采用一台经纬仪能够根据竖直角确定交汇中心的高度坐标, 但是水平面的二维坐标采用一台经纬仪测量可能会产生较大误差, 所以须采用 2 台经纬仪交汇测量才能完成。

当内环轴处于铅垂状态时, 设此时靶标中心为 x_q, y_q, z_q , 可采用同样的方法计算出。综合两种状态的测试结果, 可得到三轴转台的三轴交汇中心的坐标为 $\frac{x_p + x_q}{2}, y_q, z_p$ 。然后根据这些测量值对三轴转台中心进行适当调整。其中在内环轴的两种状态下测试得到的 $|y_p|, |z_q|$ 均为靶标距离中环轴线距离 d , 它们是否接近可以对测试结果加以验证。

2.3 外环轴指向调整方案

外环轴的指向在理想情况下应该水平并且与 $O_0 X_0$ 轴平行, 外环轴的水平度可以用水平仪进行精密调整, 可以达到较高的精度。为了保证已处于水平面内的外环轴线与 $O_0 X_0$ 轴平行, 可在中环轴轴端安装靶标, 旋转中环轴, 用经纬仪进行观测, 按照 2.2 节的方法可以确定靶标旋转中心的三维坐标, 如图 4 所示。

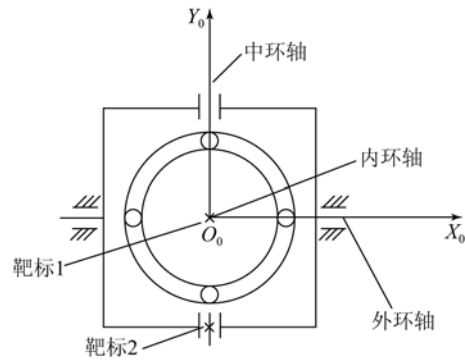


图 4 外环轴指向调整

Fig. 4 Orientation adjustment of outer axis

如果解算的中环轴轴端的靶标中心的 x 坐标与转台中心的 x 坐标一致时, 说明中环轴与 $O_0 Y_0$ 轴平行, 由于中环与外环轴线的垂直度总装时满足精度要求, 即可保证转台的外环轴线与 $O_0 X_0$ 平行。

3 位姿对准方案的实际应用验证

将位姿对准方案实际应用到三轴飞行仿真转台的对准任务中:

图 1 中 4 个基点的三维坐标(单位: mm):

基点 1: $x: 2\ 586.5, y: -3.0, z: -2\ 001.2$ 。

基点 2: $x: -2\ 576.7, y: -3.6, z: -1\ 997.6$ 。

基点 3: $x: -0.5, y: -9\ 604.0, z: -831.4$ 。

基点 4: $x: -5\ 644.1, y: -9\ 643.8, z: 3.0$ 。

使用经纬仪 1 观测 4 个基点的水平角和竖直角如表 1 所示。

表 1 经纬仪对准基点的水平角和竖直角

Tab. 1 Horizontal and vertical angles of theodolite while pointing to cardinal points

基点	水平角	竖直角
1	130°29'08"	99°03'55"
2	66°03'07"	98°28'30"
3	284°14'26"	85°37'22"
4	328°04'22"	81°12'44"

拟合该经纬仪 1 中心的坐标为(294.803 3, -4 085.404 4, -1 252.406 8),同理,经纬仪 2 观测计算的中心坐标为(-2 067.173 6, -3 315.261 0, -1 249.863 2)。在内环轴轴端安装靶标,分别在内环轴水平状态和铅垂状态下用经纬仪观测靶标,得到的水平角和竖直角如表 2、表 3 所示。

表 2 内环轴水平状态下观测轴端靶标的水平角和竖直角

Tab. 2 Horizontal and vertical angles of theodolites while pointing to the target fixed on the end of the inner axis in the horizontal state

内环位置	经纬仪 1		经纬仪 2	
	水平角	竖直角	水平角	竖直角
0°	96°55'47"	72°26'08"	92°40'05"	71°44'21"
90°	96°53'44"	72°27'07"	92°38'23"	71°45'01"
180°	96°52'25"	72°25'23"	92°39'25"	71°47'19"
270°	96°54'32"	72°24'14"	92°41'12"	71°46'28"
均值	96°54'07"	72°25'43"	92°39'46.25"	71°45'47.25"

根据表 2 中的数据可以得到在内环轴水平状态下,内环轴端的靶标的坐标为(-0.592 4, -137.602 9, -0.474 9)。

表 3 内环轴铅垂状态下观测轴端靶标的水平角和竖直角

Tab. 3 Horizontal and vertical angles of theodolites while pointing to the target fixed on the end of the inner axis in the vertical state

内环位置	经纬仪 1		经纬仪 2	
	水平角	竖直角	水平角	竖直角
0°	97°03'16"	74°45'33"	91°33'12"	74°08'09"
90°	97°01'09"	74°45'58"	91°31'59"	74°07'41"
180°	97°02'31"	74°46'29"	91°34'09"	74°07'13"
270°	97°04'35"	72°46'08"	91°35'22"	74°07'55"
均值	97°02'52.75"	74°46'02"	91°33'40.5"	74°07'44.5"

根据表 3 中的数据可以得到在内环轴铅垂状态下,内环轴端的靶标的坐标为(-0.377 1, 0.203 1, -138.196 2)。

在中环轴轴端安装靶标,并将中环轴处于水平状态,用经纬仪观测靶标得到的水平角如表 4 所示。

表 4 经纬仪对准中环轴轴端靶标的水平角

Tab. 4 Horizontal angles of theodolite while pointing to the target fixed on the end of the middle axis

中环位置	水平角
-90°	94°53'23"
-60°	94°53'47"
-30°	94°53'54"
0°	94°54'00"
30°	94°53'40"
60°	94°53'20"
88°	94°52'51"
常数项值	94.885 2°

表 4 中用经纬仪测得的 7 个不同中环位置的水平角,中环轴轴端靶标转动轨迹的圆心即为采用最小二乘法拟合出的常数项值。中环轴轴端靶标回转中心的坐标为(-0.082 2, -1 406.120 3, -0.063 8)。综上,可得三轴转台的三轴交汇中心的坐标为-0.485, 0.203 和 -0.475 mm,同时可以得到外环轴指向误差为 $\arctan \frac{-0.485 - (-0.082 2)}{0.203 1 + 1 406.120 3} = -59''$ 。

在利用经纬仪观测基准坐标系的基点坐标并解算经纬仪中心的同时,根据建立的数学模型,也可以得到经纬仪安装的竖直轴线的铅垂度误差以及经纬仪俯仰轴的零位误差,由表 1 中的数据可以得到竖直轴线的铅垂度误差为 $21.3''$,其中 $\Delta\theta_x = -9.3''$, $\Delta\theta_y = 15.1''$,俯仰轴的零位误差为 $-70.3''$ 。如果在测量过程中,不考虑经纬仪竖直轴线的铅垂度误差和俯仰轴的零位误差,由表 1 的数据得到经纬仪中心的坐标为 $(294.776\ 9, -4\ 085.418\ 7, -1\ 254.186\ 8)$,可以看出求解经纬仪中心 x, y 方向的坐标值误差较小, z 方向的坐标值误差较大。模型自动补偿了经纬仪安装的竖直轴线的铅垂度误差以及经纬仪俯仰轴的零位误差,减小了经纬仪中心坐标的计算误差。

该位姿对准方案的算法精度较高,对准的测试误差主要与经纬仪的测量精度有关,实际使用的经纬仪的精度误差为 $2''$,在 Matlab 软件编程中加入 $2''$ 的白噪声随机误差进行分析,通过仿真得到采用本文所提出的对准方案所计算出的经纬仪的三轴交汇中心的误差在 $0.05\ \text{mm}$ 左右。

参考文献:

- [1] SOERENS R, AUBIN J, WINEBRANDM, *et al.*. Methods for anechoic chamber certification at VHF/UHF frequencies [J]. *Seminars in Oncology Nursing*, 2011, 22(1 Suppl 1):28-34.
- [2] MIACCI M A S, MARTIN I M, REZENDE M C. Radar cross section measurements of complex targets (missile parts) in C-band in anechoic chamber [C]. IMOC, 2007:401-405.
- [3] KINEZOS C, UNGVICHIAN V. A low cost conversion of semi-anechoic chamber to fully-anechoic chamber for RF antenna measurements [C]. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2003(2):724-729.
- [4] 王建敏, 张武龙, 吴云洁, 等. 微波暗室对导弹仿真系统影响的误差分析[J]. *西安电子科技大学学报:自然科学版*, 2015, 42(4):100-106.
- WANG J M, ZHANG W L, WU Y J, *et al.*. Error analysis of the impact for anechoic chamber on missile simulation system [J]. *Journal of Xi'an University*, 2015, 42(4):100-106. (in Chinese)
- [5] 杨黎都, 王立冬, 刘敏. 反辐射导弹仿真试验系统误差分析[J]. *现代电子技术*, 2014, 37(7):38-42.

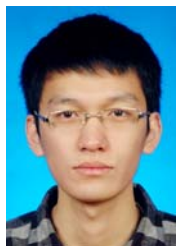
4 结 论

本文建立了利用经纬仪观测基点坐标并解算经纬仪中心坐标的数学模型,在经纬仪坐标系下采用迭代最小二乘法计算了经纬仪中心在基准坐标系下的三维坐标,再通过经纬仪对三轴转台的内环轴和中环轴轴端安装的靶标进行观测,根据经纬仪观测得到的水平角和竖直角,可以确定三轴转台的位置与初始姿态,并且所建立的模型自动补偿了经纬仪安装的竖直轴线的铅垂度误差以及经纬仪俯仰轴的零位误差,有效地减小了经纬仪中心坐标的计算误差,提高了整个测量过程的精度。在实际的位姿对准测试和调整中,根据经纬仪的测量结果解算出三轴转台的三轴交汇中的坐标为 $-0.485, 0.203$ 和 $-0.475\ \text{mm}$,外环轴指向误差为 $-59''$ 。该测试结果在位置误差 $1\ \text{mm}$,姿态误差 $2'$ 的要求范围之内,调整过程验证了该方法的正确性,实现了三轴转台的位姿对准任务。

- YANG L D, WANG L D, LIU M. Error analysis on simulation test system of anti-radiation missile [J]. *Modern Electronics Technique*, 2014, 37(7):38-42. (in Chinese)
- [6] 易鸣韬, 王迪. 微波暗室设计研究[J]. *通信电源技术*, 2012, 29(5):128-130.
- YI M D, WANG D. Study on microwave darkroom design [J]. *Telecom Power Technology*, 2012, 29(5):128-130. (in Chinese)
- [7] 杨洪涛. 坐标测量机误差建模与修正技术研究[D]. 合肥工业大学, 2007.
- YANG H T. *Research on Error Model Building and Error Correcting Technique of Coordinate Measuring Machines* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] 张智韬, 黄兆铭, 杨江涛. 全站仪三角高程测量方法及精度分析[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2008, 36(9):229-234.
- ZHANG ZH T, HUANG ZH M, YANG J T. Accuracy analysis and approaches of total station triangle elevation surveying [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2008, 36(9):229-234. (in Chinese)
- [9] 刘娇月, 杨聚庆, 董登峰, 等. 激光跟踪仪的光电瞄

- 准与定位系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1558-1564.
- LIU J Y, YANG J Q, DONG D F, *et al.*. Optoelectronic aiming and orientation system of laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1558-1564. (in Chinese)
- [10] 惠广裕, 武瑞娟. 利用双经纬仪高精度标定机载雷达天线阵面[J]. 地理空间信息, 2015, 13(3): 36-38.
- HUI G Y, WU R J. High precision calibration of airborne radar antenna array surface based on dual-theodolites measuring system [J]. *Geospatial Information*, 2015, 13(3):36-38. (in Chinese)
- [11] 刘旨春, 郭立红, 关文翠, 等. 经纬仪交会精度的定量预测[J]. 光学精密工程, 2009, 16(10): 1822-1830.
- LIU Y CH, GUO L H, GUAN W C, *et al.*. Quantitative forecasting of intersection precision for theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 16(10):1822-1830. (in Chinese)
- [12] 王晓东. 机载惯导及制导天线安装精密测量关键技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.
- WANG X D. *The key technology research of the measure of the airborne inertial navigation and guidance antenna precision installation* [D]. Zhengzhou, PLA Information Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [13] 郭福生, 张升峰, 马国元. 微波暗室雷达仿真转台与阵列基准测试方法探讨[J]. 海洋测绘, 2004, 24(5):16-19.
- GUO F SH, ZHANG SH F, MA G Y. The discusses about the benchmark test method of radar emulator turning platform and the layout of antenna array in microwave darkroom [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2004, 24(5):16-19. (in Chinese)
- [14] 刘鹏军, 王策, 刘敏, 等. 微波暗室三轴仿真转台旋转中心测量[J]. 测绘科学, 2015, 40(8): 135-139.
- LIU P J, WANG C, LIU M, *et al.*. Measurement of the center of rotation of three-axis simulation turntable in anechoic chamber based on metroIn [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(8):135-139. (in Chinese)
- [15] 李志成, 任顺清, 温奇咏, 等. 三轴转台三轴交汇中心位置对准方法的研究[J]. 宇航计测技术, 2009, 29(2):10-13,16.
- LI ZH CH, REN SH Q, WEN Q Y, *et al.*. Research on position alignment method of a three-axis simulator [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2009, 29(2):10-13,16. (in Chinese)

作者简介:



刘庆博(1991—),男,黑龙江牡丹江人,博士研究生,2013年、2015年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事惯性技术方面的研究。E-mail: lqb9104@163.com

导师简介:



任顺清(1967—),男,湖北松滋人,博士,教授,博士生导师,1989年、1994年和1999年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事精密测试技术,惯性技术,系统辨识方面的研究。E-mail:renshunqing@hit.edu.cn