

## 基于局域 GPS 的飞机惯性导航部件安装校准

朱永国<sup>1</sup> 黄翔<sup>1</sup> 秦龙刚<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 成都飞机工业有限责任公司, 成都, 610091)

**摘要:**对基于局域 GPS 的惯导安装校准测量点布设和激光发射器位置标定方法进行了研究。在对局域 GPS 测量不确定度分析的基础上,给出了满足惯导安装精度要求需安装激光发射器数量的计算公式。通过建模分析了局域 GPS 的测量精度,分析结果表明测量精度与接收到的激光发射器信号数量、激光发射器姿态及其相互位置等因素有关,当两发射器距离小于 20 m,测量方位角在 10~70°之间,局域 GPS 可获得较高的测量精度。最后阐述了基于局域 GPS 的惯导安装校准工艺步骤。应用表明:安装 5 个激光发射器,测量距离小于 5 m,校准精度和效率均得到提高。  
**关键词:**惯性导航部件;校准;局域 GPS;测量不确定度

中图分类号:V249.34

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2009)05-0615-05

## Installation and Calibration of Airplane Inertial Navigation Based on Indoor GPS

Zhu Yongguo<sup>1</sup>, Huang Xiang<sup>1</sup>, Qin Longgang<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,  
Nanjing, 210016, China;

2. Chengdu Aircraft Industrial Co Ltd, Chengdu, 610091, China)

**Abstract:** To develop a new process of the installation and the calibration of airplane inertial navigation based on the indoor GPS, the layout of measuring points and the transmitter calibration method are described. On the basis of the analysis of indoor GPS measurement uncertainty, the formula of the necessary transmitter number is proposed. The measurement precision is analyzed by the measurement modeling. The analysis result shows that the precision is related with the transmitter number, the transmitter attitude and the connection of their positions. The precision is improved as the transmitter number is increased. The error reduces greatly while the distance is less than 20 m and the azimuth angle is between 10° and 70°. Finally, the steps of the new method are presented. The application results show that the efficiency and the precision are improved when five transmitters are installed and the distance between the transmitter and the measuring point is less than 5 m.

**Key words:** inertial navigation; calibration; indoor global positioning system; uncertainty of measurement

飞机惯性导航部件(简称惯导)是高精度惯导系统的重要组成部分,惯导安装校准精度对惯导系统性能有着极其重要的影响<sup>[1-2]</sup>。常规惯导安装校准方法是对经过调水平的飞机,利用电子经纬仪借助专用安装校准夹具以对靶方式进行。这种方法不仅耗时,且精度难以保证,已不能满足新飞机研制的要求。局域 GPS 是一种超越常规的大尺寸、高精

度数字化测量技术。相比激光跟踪仪、激光雷达等其他测量技术,局域 GPS 不需转换坐标系,避免了转站误差;可根据不同测量对象,灵活布设相应测量场,且测量场一经建立可多次重复使用。局域 GPS 已在航空航天、车辆、船舶制造等领域得到越来越广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。为减少惯导安装校准过程中误差,提高生产效率,本文提出了一种基于局域

收稿日期:2008-09-25;修订日期:2008-10-18

作者简介:朱永国,男,博士研究生,1978年10月生;黄翔(联系人),男,教授,博士生导师,E-mail:xhuang@nuaa.edu.cn。

GPS 惯导安装校准解决方法。

### 1 基于局域 GPS 惯导安装校准

局域 GPS 利用传感器测量被测点的坐标值, 传感器接收到激光发射器的信号, 能获得测量点的仰角和方位角两个空间参数。与经纬仪测量原理相似, 如果确定了各激光发射器的相互位置关系, 传感器接收到 2 个及其以上激光发射器的信号就能测得被测点空间坐标值<sup>[3]</sup>。

#### 1.1 惯导安装校准测量点布设

根据局域 GPS 测量传感器特点, 测量点有两种形式: (1) 将圆柱式传感器安装在测量点上自动测量; (2) 使用手持式测量杆对测量点手动测量。前一种测量形式需在被测点位置加工精度较高的螺纹孔以便安装圆柱式传感器; 而后一种形式只需用十字交叉画出被测点, 然后直接用手持式测量杆测量交叉点。采用十字交叉点形式测量更为简便、效率更高。根据惯导安装校准空间位置特点, 可采用在辅助校准平板上布置 1~3 这 3 个交叉测量点, 点 1, 2 及点 2, 3 连线分别与安装支座轴线平行, 如图 1 所示。

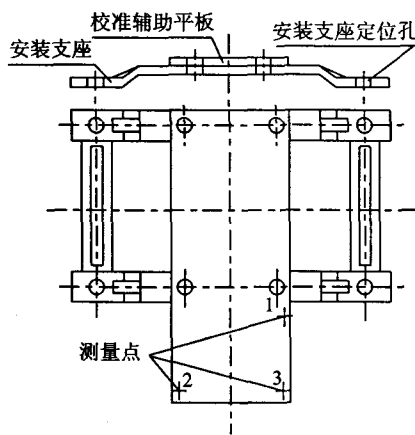


图 1 测量点布设示意图

利用如图 1 所示布置的 1~3 点的测量坐标值  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$ , 可用式(1)计算出安装校准过程中辅助校准平板横滚、航向及俯仰方向安装角度误差  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  (图 2)。

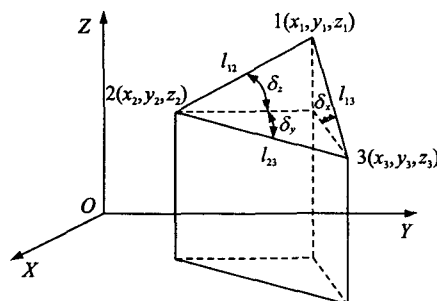


图 2 安装角度误差示意图

$$\{\delta_x, \delta_y, \delta_z\}^T = \left\{ \arcsin\left(\frac{z_1 - z_3}{l_{13}}\right), \arcsin\left(\frac{x_2 - x_3}{l_{23}}\right), \arcsin\left(\frac{z_1 - z_2}{l_{12}}\right) \right\}^T \quad (1)$$

式中:  $l_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$

$l_{13} = \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2}$

$l_{23} = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2}$

#### 1.2 激光发射器数量确定

测量过程中, 测量仪器、测量环境以及数据处理方法等均会引起测量误差, 使得测量结果具有一定程度的不确定性, 不确定度反映了可能存在的误差分布范围, 是误差的数字指标。测量不确定度有两种表示方式: (1) 标准不确定度, (2) 扩展不确定度。大多数情况下使用扩展不确定度, 扩展不确定度是通过给测量不确定度一个较高置信概率的置信区间得到的。

设  $u_x, u_y, u_z$  为第  $i$  个测量点坐标值测量不确定度,  $\lambda_i$  为第  $i$  个测量点接收到激光发射器信号数量的系数, 接收到信号数越多系数  $\lambda_i$  值越小<sup>[3]</sup>。  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  的测量不确定度  $u_x, u_y, u_z$  可表示为

$$\{u_x, u_y, u_z\} = \left\{ \arcsin\left(\frac{\lambda_1 u_{x_1} - \lambda_3 u_{x_3}}{l_{13}}\right), \arcsin\left(\frac{\lambda_2 u_{x_2} - \lambda_3 u_{x_3}}{l_{23}}\right), \arcsin\left(\frac{\lambda_1 u_{z_1} - \lambda_2 u_{z_2}}{l_{12}}\right) \right\} \quad (2)$$

根据文献[5], 当测量置信概率为 95%, 扩展不确定度  $u$  和误差允许极限  $\Delta$  应满足  $u \leq \left(\frac{1}{4} \sim \frac{1}{10}\right) \times |\Delta|$ , 因此有

$$\max\{u_x, u_y, u_z\} \leq \left(\frac{1}{4} \sim \frac{1}{10}\right) \times |\Delta| \quad (3)$$

为减少激光发射器数量, 各测量点均应接收到最大数量的激光发射器信号, 即  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$ 。令  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$ , 则式(2)可改写为

$$\{u_x, u_y, u_z\} = \left\{ \arcsin\lambda\left(\frac{u_{x_1} - u_{x_3}}{l_{13}}\right), \arcsin\lambda\left(\frac{u_{x_2} - u_{x_3}}{l_{23}}\right), \arcsin\lambda\left(\frac{u_{z_1} - u_{z_2}}{l_{12}}\right) \right\} \quad (4)$$

星群 3Di 局域 GPS 置信概率为 95% 测量长度的扩展不确定度  $u_{95} = 2 \times \sqrt{40^2 + (4 \times l)^2} \times 10^{-3} \text{ mm}^{[3]}$  ( $l$  为激光发射器到传感器的直线距离, 单位为 m)。对式(4)进行不等式变换

$$\{u_x, u_y, u_z\} \leq \left\{ \arcsin\left(\lambda \frac{|u_{x_1} - u_{x_3}|}{l_{13}}\right), \arcsin\left(\lambda \frac{|u_{x_2} - u_{x_3}|}{l_{23}}\right), \arcsin\left(\lambda \frac{|u_{z_1} - u_{z_2}|}{l_{12}}\right) \right\} \leq \left\{ \arcsin\left(\lambda \left| \frac{u_{l_{13}}}{l_{13}} \right|\right), \arcsin\left(\lambda \left| \frac{u_{l_{23}}}{l_{23}} \right|\right), \arcsin\left(\lambda \left| \frac{u_{l_{12}}}{l_{12}} \right|\right) \right\} \quad (5)$$

式中,  $u_{l_{12}}, u_{l_{13}}, u_{l_{23}}$  为  $l_{12}, l_{13}, l_{23}$  测量扩展不确定度。联立式(3,5)

$$\max \left\{ \arcsin \left( \lambda \left| \frac{u_{l_{13}}}{l_{13}} \right| \right), \arcsin \left( \lambda \left| \frac{u_{l_{23}}}{l_{23}} \right| \right), \arcsin \left( \lambda \left| \frac{u_{l_{12}}}{l_{12}} \right| \right) \right\} \leq \left( \frac{1}{4} \sim \frac{1}{10} \right) \times |\Delta| \quad (6)$$

利用式(6)在已知激光发射器到传感器的距离、安装允许误差及测量点布设情况下,就可计算出满足测量精度所需激光发射器数量。某型号飞机利用局域 GPS 实现惯导安装校准,各激光发射器离被测点直线距离  $l_{min} \leq 5 \text{ m}$ ,  $\max(l_{12}, l_{13}, l_{23}) \leq 500 \text{ mm}$ , 允许误差极限为  $\pm 60''$ 。取不等式(5)右边为  $\frac{1}{5} \times |\Delta|$ , 经计算  $\lambda \leq 0.32$ 。根据文献[3]应安装 5 个以上激光发射器,为节约成本可选择安装 5 个。

### 1.3 激光发射器标定

布置激光发射器后,需进行激光发射器标定。激光发射器标定本质就是各激光发射器相对定向,以确定相互空间位置<sup>[6-7]</sup>。两两激光发射器相对定向存在 3 个位置参数、3 个旋转参数共 6 个未知参数,  $n$  个激光发射器相对定向总共有  $C_n^2 \times 6$  个未知参数。为解算各未知参数,依据局域 GPS 测量特点及其配件条件,可采用先依次测量公共点,最后测量标准杆的方法进行(图 3),测量标准杆时,在  $P_1, P_2$  处均安装传感器。设标定需布置公共点数为  $m$ , 则需解算未知数参数总数为  $C_n^2 \times 6 + 3m + 6$ 。依据激光发射器测量原理,  $n$  个激光发射器测量一公共点可以获得  $2n$  个方程,测量标准杆一次可获得  $4n + 1$

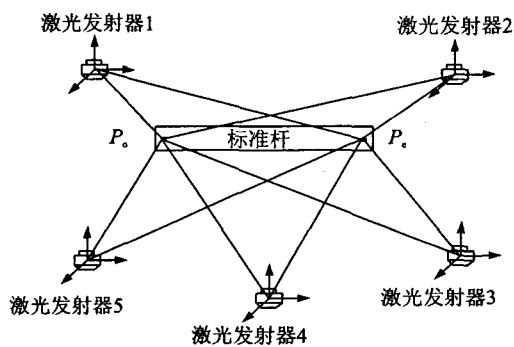


图 3 标准杆测量示意图

$$M = \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\psi - \sin\varphi \cos\theta \sin\psi & \cos\varphi \sin\psi + \sin\varphi \cos\theta \cos\psi & \sin\varphi \sin\theta \\ -\sin\varphi \cos\psi - \cos\varphi \cos\theta \sin\psi & -\sin\varphi \sin\psi + \cos\varphi \cos\theta \cos\psi & \cos\varphi \sin\theta \\ \sin\theta \sin\psi & -\sin\theta \cos\psi & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中  $\varphi, \theta, \psi$  为  $OXYZ$  相对  $O_1X_1Y_1Z_1$  的欧拉角(313 转动顺序),可通过测量飞机基准点计算获得。

## 2 测量精度分析

### 2.1 传感器仅接收到两激光发射器信号

如图 5 所示传感器测量  $p$  点时仅接收到  $T_1$ ,

个方程,因此公共点数  $m$  应满足  $2m \times n + 4n + 1 \geq C_n^2 \times 6 + 3m + 6$ 。即

$$m \geq \frac{C_n^2 \times 6 - 4n + 5}{2n - 3} \quad (7)$$

为提高标定精度,公共测量点数应大于通过式(7)求得值,此时激光发射器相对定向将构成超定方程组,可利用最小二乘法求解。利用式(7),标定 5 个激光发射器需布置 5 个以上公共测量点,可取 8 个公共测量点。公共点布置方法如图 4 所示。

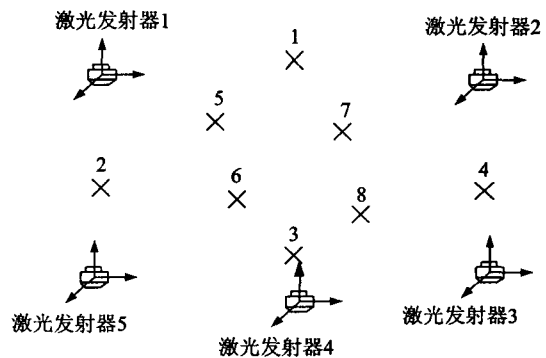


图 4 标定测量点布置图

图 4 中,1~4 点位于各激光发射器连线的中间位置,5~8 点位于 1~4 点连线构成的空间内且大致构成菱形。

### 1.4 局域 GPS 测量坐标系与飞机机身坐标系转换

局域 GPS 依据设备坐标系建立测量坐标系,该测量坐标系一般不与飞机机身坐标系重合,在惯导安装校准中需将局域 GPS 测量坐标系转换为飞机机身坐标系。两坐标系的转换存在 3 个位置参数和 3 个旋转参数,惯导安装校准只要求惯导安装角度误差在设计允许的误差极限内,因此只需求解旋转参数。设局域 GPS 测量坐标系为  $O_1X_1Y_1Z_1$ ,飞机机身坐标系为  $OXYZ$ ,  $\{x', y', z'\}$  为测量点在  $O_1X_1Y_1Z_1$  中的坐标值,  $\{x, y, z\}$  为测量点在  $OXYZ$  中的坐标值。则有

$$\{x, y, z\} = M \{x', y', z'\} \quad (8)$$

式中  $M$  为  $OXYZ$  相对  $O_1X_1Y_1Z_1$  变换矩阵,可用式(9)计算

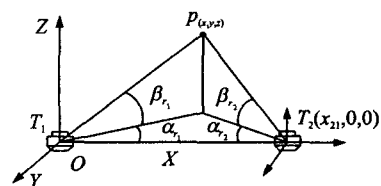


图 5 两个激光发射器测量

$T_2$  两激光发射器信号。局域 GPS 测量坐标系建立在  $T_1$  坐标系上。为描述方便,  $T_1, T_2$  两坐标系各轴线相互平行, 且  $T_2$  坐标系原点落在坐标系  $X$  轴上。

$p$  点坐标值可由式(10)计算

$$\begin{cases} x = \frac{x_{21} \sin \alpha_{T_2} \cos \alpha_{T_1}}{\sin(\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2})} \\ y = \frac{x_{21} \sin \alpha_{T_2} \sin \alpha_{T_1}}{\sin(\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2})} \\ z = \frac{x_{21} \sin \alpha_{T_2} \tan \beta_{T_1}}{\sin(\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2})} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\alpha_{T_1}, \alpha_{T_2}$  为  $T_1, T_2$  方位角;  $\beta_{T_1}, \beta_{T_2}$  为  $T_1, T_2$  仰角;  $x_{21}$  为  $T_2$  相对  $T_1$  的  $X$  轴坐标值, 由激光发射器标定时确定。大空间测量中  $x_{21}$  的标定误差相对  $x_{21}$  为极小值, 可忽略。对式(10)求偏导

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{\partial x}{\partial \alpha_{T_1}} + \frac{\partial x}{\partial \alpha_{T_2}} = \frac{-x_{21} \sin 2\alpha_{T_2}}{2\sin^2(\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2})} + \frac{x_{21} \sin 2\alpha_{T_1}}{2\sin^2(\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2})} \\ \Delta y = \frac{\partial y}{\partial \alpha_{T_1}} + \frac{\partial y}{\partial \alpha_{T_2}} = \frac{x_{21} \sin^2 \alpha_{T_2}}{\sin^2(\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2})} + \frac{x_{21} \sin^2 \alpha_{T_1}}{\sin^2(\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2})} \\ \Delta z = \frac{\partial z}{\partial \alpha_{T_1}} + \frac{\partial z}{\partial \alpha_{T_2}} + \frac{\partial z}{\partial \beta_{T_1}} = \frac{x_{21} \sin \alpha_{T_2} \tan \beta_{T_1} \cos(\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2})}{\sin^2(\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2})} + \frac{x_{21} \tan \beta_{T_1} \sin \alpha_{T_1}}{\sin^2(\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2})} + \frac{x_{21} \sin \alpha_{T_2}}{\sin^2(\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2}) \cos^2 \beta_{T_1}} \end{cases} \quad (11)$$

设  $\alpha_{T_1}, \alpha_{T_2}, \beta_{T_1}$  的测角误差为  $\Delta \alpha_{T_1}, \Delta \alpha_{T_2}, \Delta \beta_{T_1}$ , 则测量误差  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  可用式(12)计算

$$\begin{cases} \Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \alpha_{T_1}} \Delta \alpha_{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha_{T_2}} \Delta \alpha_{T_2}\right)^2} \\ \Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial \alpha_{T_1}} \Delta \alpha_{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha_{T_2}} \Delta \alpha_{T_2}\right)^2} \\ \Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial \alpha_{T_1}} \Delta \alpha_{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \alpha_{T_2}} \Delta \alpha_{T_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \beta_{T_1}} \Delta \beta_{T_1}\right)^2} \end{cases} \quad (12)$$

总测量误差为  $\Delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ 。

式(12)说明总测量误差与方位角、仰角大小、测角误差及两激光发射器测量距离有关。当  $\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2} = k\pi$  时, 总测量误差  $\Delta$  趋近于无穷大, 安装激光发射器时, 应调整其位置避免  $\alpha_{T_1} + \alpha_{T_2} = k\pi$ 。不同架次飞机在测量场中位姿一般各不相同, 利用 Matlab 仿真, 图 6~8 分别给出了不同方位角、仰

角在两激光发射器距离为 5 m 时总测量误差, 图 9 给出了总测量误差随测量距离变化曲线。星群 3Di 测角误差为  $0.5^{[3]}$ 。

从图 6~7 可看出, 测量误差随着方位角变化而有很大改变, 当方位角  $\alpha_{T_1}, \alpha_{T_2}$  测量值都接近  $0^\circ$  时, 总测量误差将急剧增加; 方位角在  $90^\circ$  附近总

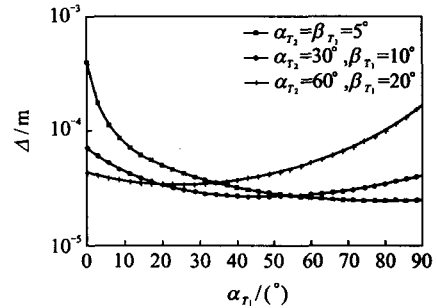


图 6  $\alpha_{T_1}$  变化引起总测量误差示意图

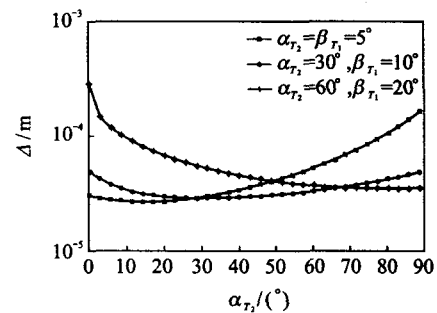


图 7  $\alpha_{T_2}$  变化引起测量误差示意图

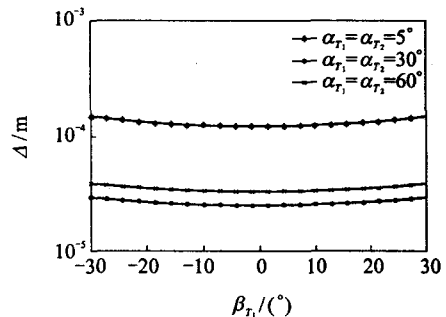


图 8  $\beta_{T_1}$  变化引起测量误差示意图

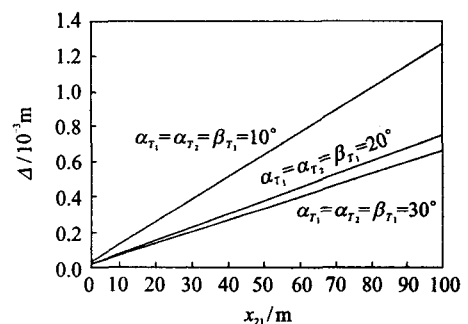


图 9  $x_{21}$  变化引起测量误差示意图

测量误差也会明显增大。实际测量时,激光发射器相对被测点方位角应避开 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 附近。从图8可看出,俯仰角 $\beta_{T_1}$ 变化对总测量误差影响较小,但总测量误差随 $|\beta_{T_1}|$ 增大而有所增大。图9表明总测量误差与两发射器距离 $x_{21}$ 成正比,测量时应尽可能减少发射器之间的距离。当方位角 $\alpha_{T_1}, \alpha_{T_2}$ 在 $10^\circ \sim 70^\circ$ 之间,两发射器距离小于20 m,总测量误差将小于 $10^{-4}$  m。

## 2.2 传感器接收到多个激光发射器信号

当传感器接收到激光发射器信号数 $n \geq 3$ 时,将可获得 $C_n^2$ 个被测点坐标值。设 $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}$ 为第 $i, j$ 个激光发射器测量坐标值, $\Delta_{x_{ij}}, \Delta_{y_{ij}}, \Delta_{z_{ij}}$ 分别为 $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}$ 测量误差。那么测量点坐标为<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} x = \sum_{1 \leq i < j \leq n} \left( \frac{1}{\Delta_{x_{ij}}^2} x_{ij} \right) D_x^{-1} \\ y = \sum_{1 \leq i < j \leq n} \left( \frac{1}{\Delta_{y_{ij}}^2} y_{ij} \right) D_y^{-1} \\ z = \sum_{1 \leq i < j \leq n} \left( \frac{1}{\Delta_{z_{ij}}^2} z_{ij} \right) D_z^{-1} \end{cases} \quad (13)$$

式中:测量误差 $\Delta_{x_{ij}}, \Delta_{y_{ij}}, \Delta_{z_{ij}}$ 由式(13)计算;测量方差 $D_x = \sum_{1 \leq i < j \leq n} \frac{1}{\Delta_{x_{ij}}^2}, D_y = \sum_{1 \leq i < j \leq n} \frac{1}{\Delta_{y_{ij}}^2}, D_z = \sum_{1 \leq i < j \leq n} \frac{1}{\Delta_{z_{ij}}^2}$ 。式(13)为对各测量结果分别以其相应测量值

方差倒数为权进行加权运算,方差较大值赋以较小的权,而方差较小值赋以较大权。利用不等式可以证明 $\Delta_x < \min_{1 \leq i < j \leq n} (\Delta_{x_{ij}}), \Delta_y < \min_{1 \leq i < j \leq n} (\Delta_{y_{ij}}), \Delta_z < \min_{1 \leq i < j \leq n} (\Delta_{z_{ij}})$ ,这说明多激光发射器测量精度要高于任意2台激光发射器测量精度。

## 3 基于局域GPS惯导安装校准测量工艺步骤

某型号飞机采用星群3Di局域GPS进行惯导安装校准,主要由以下步骤组成:

- (1) 测量点布设;
- (2) 确定激光发射器数量,布置激光发射器;
- (3) 标定各激光发射器相互位置;
- (4) 安装辅助校准平板;
- (5) 建立测量坐标系;
- (6) 用手持式测量杆测量十字交叉点的坐标值;
- (7) 利用研发的软件接口,将测量坐标值导入到开发的测量点数据处理软件系统,该软件可根据测量坐标值,实现调整量及调整位置实时输出;
- (8) 根据调整量及调整位置调整安装支座;

(9) 手动重复6~8步,反复调整安装支座直到安装误差均在允许范围以内。

局域GPS实现惯导安装校准时布置激光发射器需20 min,系统标定需15 min,系统标定好后可供多批次飞机重复使用;惯导安装校准大约需30 min。而常规校准仅水平测量就需一个班组大约1个小时才能完成,校准大约需45 min,局域GPS校准效率较常规方法提高一倍以上。

## 4 结束语

利用局域GPS对惯导进行安装校准,无需将飞机调成水平状态,校准夹具制造简单,校准精度容易保证;不需要转站测量;校准过程具有较高的可视化,无论是在装配现场还是中央控制中心,操作人员都可以通过计算机屏幕上实时看到传感器动态或静态三维坐标,所需调整量、调整位置也可通过数据处理软件系统求解,减少了调整过程盲目性。为保证测量精度除需安装一定数量的激光发射器,还要调整激光发射器的位置使得测量方向角在一定的范围内( $10^\circ \sim 70^\circ$ ),同时应尽量减少各激光发射器之间的距离。

## 参考文献:

- [1] 曹咏弘,祖静,林祖森. 无陀螺捷联惯导系统综述[J]. 测试技术学报,2004,18(3):270-273.
- [2] 杨华波,张士峰,蔡洪. 无陀螺仪惯性系统构型中安装误差分析与标定[J]. 中国惯性技术学报,2007,2:43.
- [3] Arc Second Inc. Error budget and specifications [EB/OL]. [2008-09-15]. <http://www.arcsecond.com>. 2002.
- [4] ARC Second Inc. Product literature [EB/OL]. [2008-09-15]. <http://www.arcsecond.com>. 2003.
- [5] 赵春生. 测量不确定度的理论与实践研究[D]. 长春: 长春理工大学机电工程学院,2007.
- [6] Maisano D A, Jamshidi J, Franceschini F, et al. Indoor GPS: system functionality and initial performance evaluation[J]. International Journal of Manufacturing Research, 2008,3(3):335-349.
- [7] Kang S, Tesar D. A noble 6-DOF measurement tool with indoor GPS for metrology and calibration of modular reconfigurable robots [C]//IEEE ICM International Conference on Mechatronics. Istanbul, Turkey: IEEE, 2004.
- [8] 凌林本,李滋刚,陈超英. 多传感器数据融合时权的最优分配原则[J]. 中国惯性技术学报,2000,8(6):36-37.