

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.05.07

一种浮空器气囊体积测量装置的现场校准方法探讨

王勤俭¹, 黄鑫², 张菁¹, 程杨¹, 吴平¹, 阳志勇¹

(1. 湖南航天机电设备与特种材料研究所, 湖南 长沙 410205; 2. 中国人民解放军长沙代表室, 湖南 长沙 410205)

摘要: 介绍一种浮空器气囊体积测量装置的现场校准方法, 通过设定现场校准区域, 构建地面控制点的局部三维坐标; 在被测对象侧边的 6 个地面控制点设立测站, 用激光全站仪和棱镜组件按照极坐标法观察得到被测对象侧边精密标定杆上所有准校点的局部三维坐标, 建立校准参考坐标系, 构建完整的现场校准场。测量装置对在校准参考坐标系中的精密标定杆上校准点进行拍摄获得图片, 解算得到测量装置的每个相机的外方位元素, 得到其位置和姿态, 完成校准工作。本文提出的现场校准方法解决了测量装置在任意场景下浮空器囊体体积测量的应用问题和测量装置使用中需要搬动情况下的校准问题。

关键词: 浮空器; 柔性气囊; 体积测量装置; 现场校准

中图分类号: TB92

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2017)05-0027-07

A Field Calibration Method for an Aerostat Ballonet Volume Measuring Device

WANG Qinjian¹, HUANG Xin², ZHANG Jing¹, CHENG Yang¹, WU Ping¹, YANG Zhiyong¹

(1. Hunan Aerospace Electromechanical Equipment and Special Material Research Institute, Changsha 410205, China;

2. Changsha Representative Office of the Chinese People's Liberation Army, Changsha 410205, China)

Abstract: This paper introduces the field calibration method of an aerostat ballonet volume measuring device, by setting the calibration area to construct local three-dimensional coordinates of ground control points. 6 ground control points are set up beside the object. With a total station and laser prism assembly in accordance with the polar coordinate method of observation, the local three-dimensional coordinates of the precision calibration bar beside the object are observed, a calibration reference coordinate system is set up, and a complete site calibration is constructed. The measuring device for calibration acquired images in the reference coordinate system of the precision calibration point bar, the solution of exterior orientation elements is obtained for each camera measurement device, and the position and attitude are obtained to complete the calibration work. This paper presents a field calibration method that solves the measurement device calibration problem, under the condition of moving measurement device in use in any scene and the application of aerostat envelope volume measurement.

Key words: aerostat; flexible air bag; volume measuring device; field calibration

0 引言

浮空器在飞试前, 通过测量浮空器囊体空间尺寸和体积来得到其平衡性能和气动特性, 此方法为评价和验证设计参数的有效手段, 为浮空器安全飞行提供重要保障。在外场试验环境中, 需要在一定风场、气流变化条件下为浮空器囊体现场体积测量装置提供一种可行的校准方法, 对其外形轮廓空间尺寸及体积进

行校准, 进而依据所得的浮空器囊体实际外形尺寸及体积, 分析所研制浮空器的各种品质与飞行性能, 及时调整浮空器飞行试验参数, 保证浮空器飞行试验的安全。

为解决上述技术问题, 本文提出在被测浮空器周围设定现场校准区域, 在被测对象侧边的 6 个地面控制点设立测站, 用激光全站仪和棱镜组件按照极坐标法观察得到被测对象侧边精密标定杆上所有准校点的局部三维坐标, 建立校准参考坐标系, 构建完整的现场校准场; 立体视觉体积测量装置对在校准参考坐标系中的精密标定杆上校准点进行拍摄获得图片, 解算得到测量装置的每个相机的外方位元素, 得到其位置和姿

收稿日期: 2017-03-23; 修回日期: 2017-07-01

基金项目: 国家“十二五”计量科研计划项目(JSJL2014204 B501)

作者简介: 王勤俭(1978-), 男, 工程师, 工程硕士, 从事测试技术与校准技术研究工作。

态完成校准工作；之后利用校准参数的视觉测量装置对空器囊体拍摄，完成浮空器囊体外形及空间尺寸测量，运用测量软件实现囊体三维模型重建和体积测量。

1 浮空器囊体体积测量装置校准原理

1.1 校准参考坐标系建立方法原理

浮空器囊体体积测量装置是“基于人工标志和自然纹理成像的近影摄像测量原理”的工作系统，测量装置所用普通工业相机需要通过现场校准，确定相机外部参数，也是确定三维空间点和二维图像点间映射关系的过程。确定所有相机相对于校准参考坐标系（称为世界坐标系）的三维位置和方向（称为相机外参数），是测量装置准确地从二维图像重建三维空间模型的关键，也是实现大型浮空器囊体现场体积测量的基础。

浮空器囊体体积测量装置指的是：均匀布设在试验现场四周、浮空器左右两侧若干高分辨力相机。为了校准得到多台相机在同一个坐标系内的外方位元素，需要按以下步骤进行校准：第一步，建立地面控制网，建立标准参考坐标系；第二步，测量相机前方的标定杆上的标志点；第三步，用单片空间后方交会的方法计算各相机的外方位元素。设置地面参考点，除了帮助转站之外，还有约束坐标系的绝对尺度的作用。如果不用地面参考点，就无法实现上述的浮空器左右两侧多台固定相机的外方位元素校准方法。由于浮空器是运动的，其运动包括浮空器在外界环境中随风摆动及浮空器自身的收缩膨胀，因此在测量浮空器三维形状时，尽量避免在浮空器表面贴标志点。

测量系统的坐标系即相机的外方位元素所在的坐标系，而校准系统的坐标系是指以全站仪的第 1 个测站作为基准的坐标系。首先，所有的校准点（基准点）的坐标是通过全站仪观测的，并且全部换算到了全站仪的基准坐标系中；其次，相机的外方位元素是通过视控制点坐标为真值的单片空间后方交会方法计算得到的，后方交会的原理决定了外方位元素与校准点在同一个坐标系中。因此，测量系统坐标系与校准系统坐标系其实是同一个坐标系，即以全站仪为基准的坐标系。

如图 1 所示， $\square$ 为测量装置； $|$ 为精密标定杆； $\bigcirc$ 为棱镜组件； $\triangle$ 为地面控制点； $\otimes$ 为激光全站仪； XOY 为校准参考坐标系。以全站仪为基准的参考坐标系建立方法原理：以测站点 A 为第一个测站，并设为基准站，之后设站顺序依次为测站 B, C, D, E, F 。设定 AD 方向为 X 轴，以被测对象头部的地面控制点 A 指向尾部方向的地面控制点 D 定义为 X 轴正方向，垂

直于 X 轴从地面指向天空定义为 Z 轴正方向， Y 轴定义符合右手定则，建立校准参考坐标系。

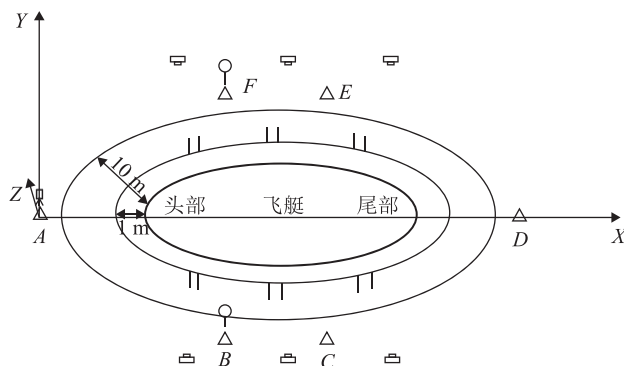


图 1 现场校准整体示意图

起初在实际测量中，选择第一个测站点 A 为坐标原点，其右方的观测点为 X 轴正方向，与 X 轴垂直方向为 Y 轴，如图 2 为所示，确定 AB 方向为 X 轴正方向，与 AB 垂直且以 F 方向为 Y 轴正方向，建立起平面 xoy 坐标系（ xoy 为实际测量坐标系），然后将 z 轴设为水平面。测量完毕后，将此实际测量坐标系逆时针旋转 $\angle\beta$ ，与校准参考坐标系重合，即完成校准参考坐标系的确定。

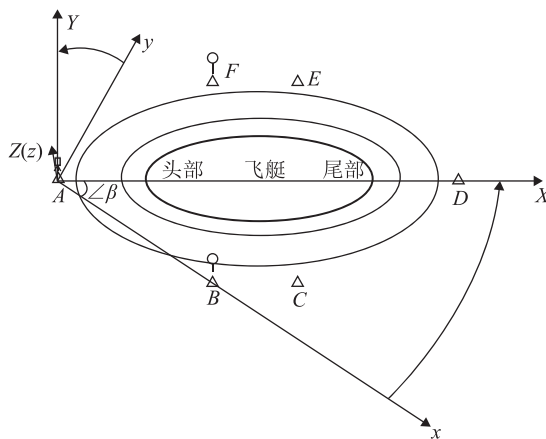


图 2 激光全站仪实际导线测量示意图

1.2 校准参考坐标系建立具体步骤

1) 激光全站仪获取测量数据

在测站点 A 设站，获得 A, F 两测站间的平距 D_{AF} ； A, B 两测站间的平距 D_{AB} ；观测水平角 $\angle AF_{\text{盘左}}$ ， $\angle AF_{\text{盘右}}$ ， $\angle AB_{\text{盘左}}$ ， $\angle AB_{\text{盘右}}$ ，竖直角 ϑ_{AB} ，仪器高 I_A ，棱镜高 V_B 。

在测站 B 设站，获得 B, A 两测站间的平距 D_{BA} ； B, C 两测站间的平距 D_{BC} ；水平角 $\angle BA_{\text{盘左}}$ ， $\angle BA_{\text{盘右}}$ ， $\angle BC_{\text{盘左}}$ ， $\angle BC_{\text{盘右}}$ ，竖直角 ϑ_{BC} ，仪器高 I_B ，棱镜

高 V_C 。

同理, 依次在测站 C, D, E, F 设站, 获得一系列的测量数据。

平距计算

$$\begin{cases} D_{AB} = \frac{D_{AB} + D_{BA}}{2} \\ D_{BC} = \frac{D_{BC} + D_{CB}}{2} \\ \dots\dots \\ D_{EF} = \frac{D_{EF} + D_{FE}}{2} \\ D_{FA} = \frac{D_{FA} + D_{AF}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

水平角计算

$$\begin{cases} \angle A = \frac{|\angle AB_{\text{盘左}} - \angle AF_{\text{盘左}}| + |\angle AB_{\text{盘右}} - \angle AF_{\text{盘右}}|}{2} \\ \angle B = \frac{|\angle BC_{\text{盘左}} - \angle BA_{\text{盘左}}| + |\angle BC_{\text{盘右}} - \angle BA_{\text{盘右}}|}{2} \\ \dots\dots \\ \angle E = \frac{|\angle EF_{\text{盘左}} - \angle ED_{\text{盘左}}| + |\angle EF_{\text{盘右}} - \angle ED_{\text{盘右}}|}{2} \\ \angle F = \frac{|\angle FA_{\text{盘左}} - \angle FE_{\text{盘左}}| + |\angle FA_{\text{盘右}} - \angle FE_{\text{盘右}}|}{2} \end{cases} \quad (2)$$

2) 每个内角的改正数 ν_β

$$\nu_\beta = -\frac{(\angle A + \angle B + \angle C + \angle D + \angle E + \angle F) - (n-2) \times 180^\circ}{n} \quad (3)$$

在这里, $n = 6$ 。

3) 内角改正后的大小

$$\begin{cases} \angle A' = \angle A + \nu_\beta \\ \angle B' = \angle B + \nu_\beta \\ \dots\dots \\ \angle E' = \angle E + \nu_\beta \\ \angle F' = \angle F + \nu_\beta \end{cases} \quad (4)$$

4) 方位角计算

设定测站点 A 的平面坐标为 $(0,0)$, 测站点 B 的平面坐标为 $(D_{AB}, 0)$, 故 $\alpha_{AB} = 0^\circ$,

$$\begin{cases} \alpha_{BC} = \alpha_{AB} + \angle B' - 180^\circ \\ \alpha_{CD} = \alpha_{BC} + \angle C' - 180^\circ \\ \alpha_{DE} = \alpha_{CD} + \angle D' - 180^\circ \\ \alpha_{EF} = \alpha_{DE} + \angle E' - 180^\circ \\ \alpha_{FA} = \alpha_{EF} + \angle F' - 180^\circ \end{cases} \quad (5)$$

5) 各测站 X, Y 坐标计算

$$\begin{cases} X_C = X_B + D_{BC} \cdot \cos \alpha_{BC} \\ Y_C = Y_B + D_{BC} \cdot \sin \alpha_{BC} \\ \begin{cases} X_A = 0 \\ Y_A = 0 \end{cases} \\ \begin{cases} X_B = D_{AB} \\ Y_B = 0 \end{cases} \end{cases} \begin{cases} X_D = X_C + D_{CD} \cdot \cos \alpha_{CD} \\ Y_D = Y_C + D_{CD} \cdot \sin \alpha_{CD} \\ \begin{cases} X_E = X_D + D_{DE} \cdot \cos \alpha_{DE} \\ Y_E = Y_D + D_{DE} \cdot \sin \alpha_{DE} \end{cases} \\ \begin{cases} X_F = X_E + D_{EF} \cdot \cos \alpha_{EF} \\ Y_F = Y_E + D_{EF} \cdot \sin \alpha_{EF} \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

6) 旋转坐标系

计算旋转角度: 将 AB 方向的 x 轴绕测站点 A 逆时针旋转 $\angle \beta$, 与 AD 为正方向的 X 轴重合。在校准参考坐标系中, 设 D 的坐标为 $(D_{AD}, 0)$; 而在以 AB 为 x 轴正方向的坐标中, D 的坐标为 (X_D, Y_D) 。

根据平面坐标系平移公式, 列出下面的平移方程, 见公式(7)。

$$\begin{cases} D_{AD} = X_D \cdot \cos \angle \beta - Y_D \cdot \sin \angle \beta \\ 0 = X_D \cdot \sin \angle \beta + Y_D \cdot \cos \angle \beta \end{cases} \quad (7)$$

解得

$$\angle \beta = \arcsin\left(\frac{-D_{AD} \cdot Y_D}{(X_D^2 + Y_D^2)}\right) \quad (8)$$

进行坐标旋转

$$\begin{cases} X_A = 0 \\ Y_A = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} X'_B = D_{AB} \cdot \cos \angle \beta - 0 \cdot \sin \angle \beta \\ Y'_B = D_{AB} \cdot \sin \angle \beta + 0 \cdot \cos \angle \beta \end{cases}$$

$$\begin{cases} X'_C = X_C \cdot \cos \angle \beta - Y_C \cdot \sin \angle \beta \\ Y'_C = X_C \cdot \sin \angle \beta + Y_C \cdot \cos \angle \beta \end{cases}$$

$$\begin{cases} X'_D = D_{AD} \\ Y'_D = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} X'_E = X_E \cdot \cos \angle \beta - Y_E \cdot \sin \angle \beta \\ Y'_E = X_E \cdot \sin \angle \beta + Y_E \cdot \cos \angle \beta \end{cases}$$

$$\begin{cases} X'_F = X_F \cdot \cos \angle \beta - Y_F \cdot \sin \angle \beta \\ Y'_F = X_F \cdot \sin \angle \beta + Y_F \cdot \cos \angle \beta \end{cases}$$

7) 计算各测站的 Z 坐标

设测站 A 的 $ZA = 0$, 根据三角高程测量公式。

$$Z_{i+1} = Z_i + D_{i(i+1)} \cdot \tan \partial_{i(i+1)} + I_i - V_{i+1} \quad (11)$$

式中: $i = A, B, C, D, E, F$ 顺序循环; $D_{i(i+1)}$ 为测站点 i 和测站点 $i+1$ 之间的平距; $\partial_{i(i+1)}$ 为在测站 i 观测时,

立在测站 $i+1$ 上的棱镜的竖直角; I_i 为在测站点 i 量取的仪器高; V_{i+1} 为立在测站点 $i+1$ 上的棱镜高。

根据上述的三角高程测量公式, 求得测站 A, B, C, D, E, F 的高程 Z 坐标。

8) 最小化误差

$$\begin{aligned} & \text{令 } [(D_{AB} - \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2})^2 + \\ & (D_{BC} - \sqrt{(X_B - X_C)^2 + (Y_B - Y_C)^2})^2 + \\ & (D_{CD} - \sqrt{(X_C - X_D)^2 + (Y_C - Y_D)^2})^2 + \\ & (D_{DE} - \sqrt{(X_D - X_E)^2 + (Y_D - Y_E)^2})^2 + \\ & (D_{EF} - \sqrt{(X_E - X_F)^2 + (Y_E - Y_F)^2})^2 + \\ & (D_{FA} - \sqrt{(X_F - X_A)^2 + (Y_F - Y_A)^2})^2] \varepsilon + \\ & [(\angle A - Q(F, A, B))^2 + (\angle B - Q(A, B, C))^2 + \\ & (\angle D - Q(C, D, E))^2 + (\angle C - Q(B, C, D))^2 + \\ & (\angle E - Q(D, E, F))^2 + (\angle F - Q(E, F, A))^2](1 - \varepsilon) \end{aligned} \quad (12)$$

在约束条件为

$$\begin{cases} X_A = 0 \\ Y_A = 0 \\ Y_D = 0 \end{cases} \quad (13)$$

时, 误差为最小。

其中, $Q(F, A, B)$ 表示由测站点 F, A, B 的 X, Y 平面坐标计算出的 $\angle FAB$, $Q(A, B, C) \cdots Q(E, F, A)$ 同理。由于平距的测量误差为 2 mm , 水平角测角误差为 $2''$, 故取 $\varepsilon = 0.5$ 。

令

$$[(I_i + D_{i(i+1)} \tan \partial_{i(i+1)} - V_{i+1}) - (Z_{i+1} - Z_i)] \quad (14)$$

在约束条件为

$$\begin{cases} X_A = 0 \\ Y_A = 0 \\ Z_A = 0 \\ Y_D = 0 \end{cases} \quad (15)$$

时, 误差为最小。

其中, $i = A, B, C, D, E, F$ 顺次循环。

9) 精密标定杆上校准点坐标计算

在被测对象侧边的 4 个地面控制点设立测站, 用激光全站仪和棱镜组件按照极坐标法观察得到被测对象侧边精密标定杆上所有校准点的局部三维坐标。

如图 3 所示, 在测站 B 设站, 测站 B 与校准点 a 平距 D_{Ba} , 测得校准点 a 与 BA 方向的水平角 θ_a , 竖直角 ∂_{Ba} , 量得仪器高 I_B , 棱镜高则为 $V_a = 0$ 。

由步骤 4) 得到方位角 $\alpha_{Ba} = \alpha_{AB} + \theta_a - 180^\circ$ 。

由步骤 5) 得到校准点 a 的平面坐标

$$\begin{cases} X_a = X_B + D_{Ba} \cos \alpha_{Ba} \\ Y_a = Y_B + D_{Ba} \sin \alpha_{Ba} \end{cases} \quad (16)$$

由步骤 7) 得到校准点 a 的 Z 坐标。

$$Z_a = I_B + D_{Ba} \tan \partial_{Ba} - V_a \quad (17)$$

同理, 由步骤 4), 5), 7) 可得到其它校准点的三维坐标。

到此, 根据步骤 1) ~ 步骤 9) 得到校准参考坐标系的测站点和校准点的三维坐标, 完全建立了校准参考坐标系, 如图 3 所示。

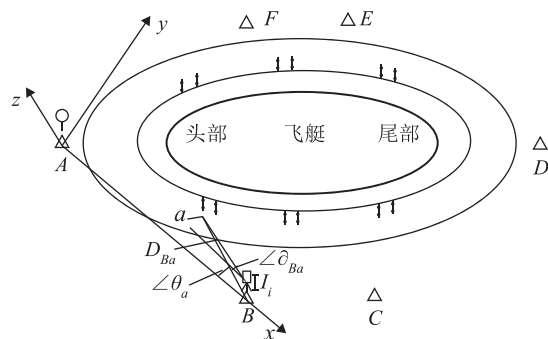


图 3 精密标定杆上校准点坐标测量示意图

1.3 测量系统的测量相机参数校准原理

如图 4 所示, 测量装置中的各测量相机对精密标定杆上的校准点进行拍摄, 获得校准点的影像, 在获取的影像上量取各个校准点的像点坐标。利用各个校准点的像点坐标和其相对应的地面控制点三维坐标, 以及事先标定好的相机内方位元素, 采用后方交汇测量的方法解算得到测量装置的每个相机的外方位元素, 得到其位置和姿态完成校准工作。

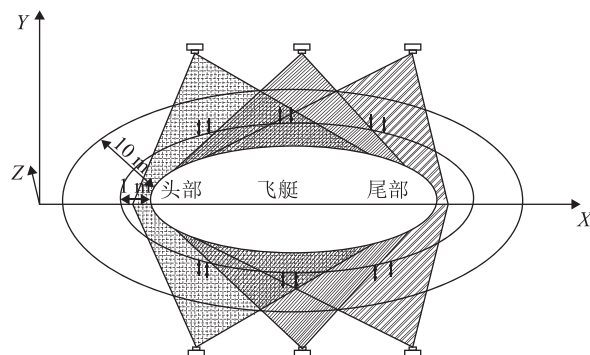


图 4 测量装置拍摄示意图

1.4 测量系统的测量相机参数校准具体方法

1.4.1 量测校准点的像点坐标

测量装置中的各组测量相机通过控制曝光采集图像, 每个相机保证能拍到至少 4 个校准点。在每张图

像上量取至少 3 个校准点的像点坐标, 本方法量取 4 个校准点。如在一张图像上量取到校准点 a, b, c, d 的像点坐标为 $a(x_a, y_a), b(x_b, y_b), c(x_c, y_c), d(x_d, y_d)$ 。

1.4.2 后方交会解算相机的外方位元素

相机的外方位元素有 6 个, 分别为 $X_s, Y_s, Z_s, \varphi, \omega, \kappa$ 。由校准点的像点坐标及其对应的控制点三维坐标, 已知的相机的内方位元素 (x_o, y_o, f) , 依据共线条件方程一般公式(18)。

$$\begin{aligned} x - x_o &= -f \frac{a_1(X_A - X_s) + b_1(Y_A - Y_s) + c_1(Z_A - Z_s)}{a_3(X_A - X_s) + b_3(Y_A - Y_s) + c_3(Z_A - Z_s)} \\ y - y_o &= -f \frac{a_2(X_A - X_s) + b_2(Y_A - Y_s) + c_2(Z_A - Z_s)}{a_3(X_A - X_s) + b_3(Y_A - Y_s) + c_3(Z_A - Z_s)} \end{aligned} \quad (18)$$

列出检校点的共线方程公式(19)。

$$\begin{aligned} x - x_o &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_o &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \quad (19)$$

具体的为

$$\begin{cases} x_a - x_o = -f \frac{a_1(X_a - X_s) + b_1(Y_a - Y_s) + c_1(Z_a - Z_s)}{a_3(X_a - X_s) + b_3(Y_a - Y_s) + c_3(Z_a - Z_s)} \\ y_a - y_o = -f \frac{a_2(X_a - X_s) + b_2(Y_a - Y_s) + c_2(Z_a - Z_s)}{a_3(X_a - X_s) + b_3(Y_a - Y_s) + c_3(Z_a - Z_s)} \\ x_b - x_o = -f \frac{a_1(X_b - X_s) + b_1(Y_b - Y_s) + c_1(Z_b - Z_s)}{a_3(X_b - X_s) + b_3(Y_b - Y_s) + c_3(Z_b - Z_s)} \\ y_b - y_o = -f \frac{a_2(X_b - X_s) + b_2(Y_b - Y_s) + c_2(Z_b - Z_s)}{a_3(X_b - X_s) + b_3(Y_b - Y_s) + c_3(Z_b - Z_s)} \\ \dots\dots \end{cases} \quad (20)$$

其中,

$$\begin{cases} a_1 = \cos\varphi\cos\kappa - \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa \\ a_2 = -\cos\varphi\sin\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ a_3 = -\sin\varphi\cos\omega \\ b_1 = \cos\omega\sin\kappa \\ b_2 = \cos\omega\cos\kappa \\ b_3 = -\sin\omega \\ c_1 = \sin\varphi\cos\kappa + \cos\varphi\sin\omega\sin\kappa \\ c_2 = -\sin\varphi\sin\kappa + \cos\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ c_3 = \cos\varphi\cos\omega \end{cases} \quad (21)$$

测量装置中的每个相机外方位元素都有 6 个, 即为 6 个未知数, 由一个像点坐标可以列 2 个方程式, 故至少需要 3 个像点才可进行方程求解。本方法选用 4 个像点进行求解, 以第一个相机的图像上校准点为 a, b, c, d 例按下述方法求解, 步骤如下:

1) 共线方程线性化

$$\begin{aligned} v_x = (x) - x + \frac{\partial x}{\partial X_s}\Delta X_s + \frac{\partial x}{\partial Y_s}\Delta Y_s + \frac{\partial x}{\partial Z_s}\Delta Z_s \\ + \frac{\partial x}{\partial \varphi}\Delta\varphi + \frac{\partial x}{\partial \omega}\Delta\omega + \frac{\partial x}{\partial \kappa}\Delta\kappa \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} v_y = (y) - y + \frac{\partial y}{\partial X_s}\Delta X_s + \frac{\partial y}{\partial Y_s}\Delta Y_s + \frac{\partial y}{\partial Z_s}\Delta Z_s \\ + \frac{\partial y}{\partial \varphi}\Delta\varphi + \frac{\partial y}{\partial \omega}\Delta\omega + \frac{\partial y}{\partial \kappa}\Delta\kappa \end{aligned} \quad (23)$$

2) 误差方程式的建立

$$\begin{aligned} v_x = a_{11}\Delta X_s + a_{12}\Delta Y_s + a_{13}\Delta Z_s \\ + a_{14}\Delta\varphi + a_{15}\Delta\omega + a_{16}\Delta\kappa - lx \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} v_y = a_{21}\Delta X_s + a_{22}\Delta Y_s + a_{23}\Delta Z_s + a_{24}\Delta\varphi \\ + a_{25}\Delta\omega + a_{26}\Delta\kappa - ly \\ V = AX - L, P \end{aligned} \quad (25)$$

其中, $X = [\Delta X_s, \Delta Y_s, \Delta Z_s, \Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa]^T$, P 为像点观测值的权。

其它符号对应每一个像点为

$$V_i = [v_x \quad v_y]^T \quad (26)$$

$$L_i = [lx \quad ly]^T = [x - (x), y - (y)]^T \quad (27)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix} \quad (28)$$

3) 法方程求解

法方程式

$$A^T P A X = A^T P L \quad (29)$$

法方程解

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (30)$$

从而可求出相机外方位元素近似值的改正数 $\Delta X_s, \Delta Y_s, \Delta Z_s, \Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa$ 。

4) 改正后的外方位元素

由于共线方程在线性化过程中各系数取自泰勒级数展开式的一次项, 且未知数的初值一般都是比较粗糙的, 因此计算需要迭代进行。每次迭代时用未知数近似值与上次迭代计算的改正后数之和作为新的近似值, 重复计算过程, 求出新的改正数, 这样反复趋近, 直到改正数小于某一个限值为止, 最后得出相机的 6 个外方位元素的解。

$$\begin{cases} X_s = X^0_s + \Delta X^1_s + \Delta X^2_s + \dots \\ Y_s = Y^0_s + \Delta Y^1_s + \Delta Y^2_s + \dots \\ Z_s = Z^0_s + \Delta Z^1_s + \Delta Z^2_s + \dots \\ \varphi = \varphi^0 + \Delta \varphi^1 + \Delta \varphi^2 + \dots \\ \omega = \omega^0 + \Delta \omega^1 + \Delta \omega^2 + \dots \\ \kappa = \kappa^0 + \Delta \kappa^1 + \Delta \kappa^2 + \dots \end{cases} \quad (31)$$

其中, $X^0_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, $Y^0_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$, $Z^0_s = f$,

$\varphi^0 = \omega^0 = \kappa^0 = 0$ 。n 为单张影像上像点的个数; X_i, Y_i 为单张影像上像点对应的地面平面坐标。

至此, 根据以上步骤 1) ~ 步骤 4) 可求得一个相机的 6 个外方位元素, 同理, 重复以上步骤可将其他相机的外方位元素求出, 完成相机参数的校准。

2 校准方法验证

2.1 浮空器囊体体积测量装置的参数现场校准

浮空器囊体体积测量装置的校准工作分为测量型照相机内参数校准和外参数校准。因此, 现场校准包括两个方面内容: 其一, 校准所有测量型照相机内参数 (也称: 内方位元素) 如: 图像主点坐标、焦距, 确定固化相机内参数, 并形成参数列表; 其二, 通过准确空间位置测量和软件计算确定测量型照相机、相对位姿等现场外参数 (也称: 外方位元素)。

内参数现场校准方案: 使用已知坐标物方点的内方位元素标定板 (以下简称“标定板”), 选取 5 个不同角度 (固定位置), 用测量型相机旋转拍摄标定板; 拍摄前根据实景选好成像距离并固定焦距; 拍摄标定板占满整个取景框的画幅; 最后通过软件完成相机内方位元素校准。

外参数现场校准方案: 首先, 用校准装置构建现场测量系统的校准场地, 用激光全站仪对精密标定杆上设定的现场校准点进行测量, 通过现场标定得到现场参考校准点的实际位置参数; 其次, 用测量型照相机对位置已知的现场校准点进行拍摄; 然后, 利用现场校准点的实际三维坐标和在各测量型照相机所成图像中的位置, 计算得到测量型照相机的一系列现场参数; 最后, 通过对现场测量重构得到的校准点三维坐标与校准点实际的三维坐标之间的均方误差进行评判, 确定其误差为最小则校准成功。

2.2 内参数校准结果

将内方位元素标定板固定在工作台面上 (如图 5) 所示。将被校准测量型相机按 A, B, C, D, E 五个角度放置; 每个角度拍摄标定板占满整个取景框的画幅。

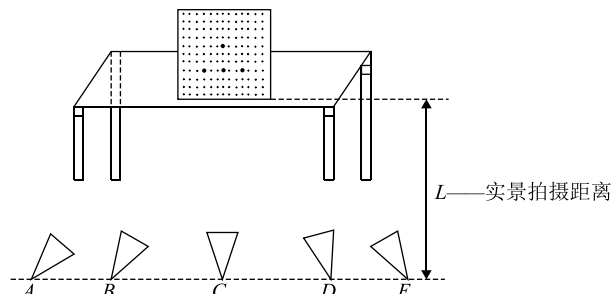


图 5 内参数校准场

通过校准软件解算得到校准结果见表 1。

表 1 内参数标准结果

序号	相机编号	xo/mm	yo/mm	f/mm
1	Camera00	2.878	2.211	12.075
2	Camera41	2.825	2.132	12.156
3	Camera52	2.893	2.221	12.091
4	Camera56	2.851	2.162	8.352
5	Camera79	2.946	2.099	8.370
6	Camera90	2.930	2.130	16.117
7	CameraD800-1	17.742	12.107	36.558
8	CameraD800-2	17.700	12.135	36.460
9	CameraD800-3	17.690	12.009	36.576
10	CameraD800-4	17.797	11.992	36.508

2.3 外参数校准结果

在被测物区域周围 3 ~ 10 m 区域布设 6 个地面控制点 (确保每两个各地面控制点能互相观察不被遮挡), 头尾各 1 个, 侧边各 2 个; 在被测物侧边 1 m 以外布设 12 根精密标定杆, 确保每组相机每一个均可以拍摄到 2 根以上的精密标定杆, 见图 6 所示。

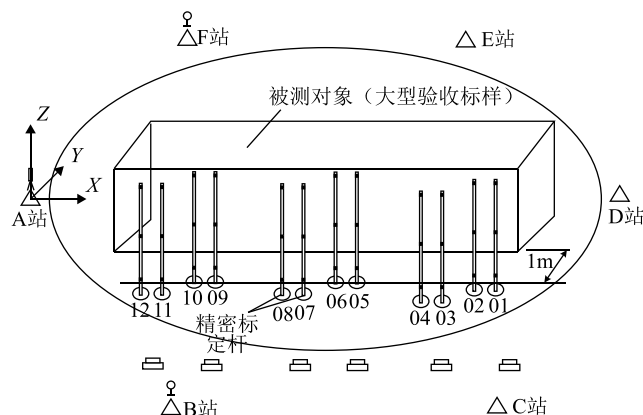


图 6 现场校准布置图

用 1 台激光全站仪和 2 个棱镜, 依次在 6 个地面

控制点设测站，按照测回法测定 6 个地面控制点的边角网，进而计算平面坐标；按照三角高程测量法测定 6 个地面控制点的高程网，进而计算高程坐标；最终得到 6 个地面控制点的三维坐标，由于坐标系是局部坐标系，设头部的地面控制点为坐标原点，从头部的地面控制点按照逆时针方向指向下一个地面控制点为坐标系的 X 轴正方向。用 1 台激光全站仪和 1 个棱镜，

在侧边的 4 个地面控制点设测站，按照极坐标法观测浮空器侧边 12 根精密标定杆上的所有校准点的三维坐标。

测量型相机对精密标定杆进行拍照，每张影像上至少应存在 6 个以上的校准点。对校准点进行像点坐标量测，利用像点坐标和控制点三维坐标的对应关系以及事先标定好的相机内方位元素，通过校准软件自动解算测量型相机的外参数，并将校准结果记录在表 2 中。

表 2 测量相机外参数标准结果

序号	相机编号	X_s/m	Y_s/m	Z_s/m	ψ/rad	ω/rad	κ/rad
1	Camera00	6.7223	1.4948	0.8525	-0.9116	1.6551	0.9150
2	Camera41	11.1113	2.1113	0.8292	-0.1529	1.6144	0.1559
3	Camera52	11.4727	2.1450	0.8367	0.6204	1.6350	-0.6274
4	Camera56	2.5543	2.5192	0.8185	0.9979	1.6831	-0.9547
5	Camera79	2.9170	2.5363	0.8047	1.1336	1.7193	-1.1252
6	Camera90	7.0888	1.4750	0.8323	-0.7813	1.6232	0.7697
7	CameraD800-1	-7.6058	10.8752	1.5043	-3.1293	-0.0517	-1.3790
8	CameraD800-2	-8.6766	2.3733	1.5820	3.1287	-0.0827	-1.3461
9	CameraD800-3	14.8975	11.2460	1.4588	-3.1380	-0.0270	-1.4056
10	CameraD800-4	14.7516	3.5867	1.6131	3.1274	-0.0722	1.7428

3 结论

本文阐述浮空器囊体体积测量装置的校准原理、校准参考坐标系建立方法、参数校准方法。验证并校准了浮空器囊体体积测量装置的内、外参数，给出了校准结果，为浮空器囊体测量装置提供重要参数保障，解决了任意场景下浮空器囊体体积测量的应用问题和测量装置使用中需要搬动情况下的校准问题，能够为我国的浮空器研制、生产与安全运行提供有力保障，在我国浮空器领域具有良好的应用前景。



(上接第 26 页)

的样气露点值不同，20 min 内波动度均小于 0.2℃，最大误差值在 ±0.4℃ 以内。

10 结论

本文介绍了便携式渗透法湿度发生器的原理及结构设计，系统剖析了恒温器、干燥气体产生器的设计思路以及渗透管的处理，并对电路设计、气路选通设计进行了介绍。

该湿度发生器在恒温体中同时预置四支渗透管，根据发生湿度值的需要选用不同渗透率的渗透管。由

参 考 文 献

[1] 管海兵. 视觉测量系统中的图像校正技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
[2] 唐志豪. 基于双目立体视觉的测量技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2006.
[3] 张春. 基于视觉测量应变分析系统的数据处理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
[4] 刘太磊. 相机标定与三维重建相关技术研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
[5] 谢耀华. 数字摄影测量与三维重建系统关键技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2004.

电气开关控制，四支渗透管完全独立工作，在相同的温度和流量下，分别对应各自湿度发生值，扩展了湿度发生范围，大大提高了工作效率。

参 考 文 献

[1] 周庆福, 顾继承, 吕国义, 等. 一种多渗透室湿度发生器的研制[J]. 计测技术, 2010, 30(S1): 31-33.
[2] 李英干, 范盒鹏. 湿度测量[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 340-350.
[3] 顾继承, 李群芳, 周庆福. 渗透法标准湿度发生器中渗透管的研制[J]. 新技术新仪器, 2011, 31(1): 7-10.
[4] 顾继承, 孙志明. 一种新型渗透法标准湿度发生器[J]. 新技术新仪器, 2010, 30(5): 34-35.