

基于 PSD 传感器的炸点三维坐标测量方法研究

宁威, 褚文博, 张斌, 赵冬娥

(中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030000)

摘要: 针对野外炸点空间三维坐标测量的问题, 提出了基于二维 PSD 位置传感器的炸点位置测量方法, 构建了基于二维 PSD 位置传感器的炸点三维坐标测量系统; 基于双目视觉原理建立了炸点空间三维坐标测量数学模型; 研究了被动探测系统在野外远距离下的标定技术; 通过系统误差分解传递, 分析了各参数的误差; 在 Matlab 中分别绘制了炸点位置坐标 3 个维度的误差分布图, 并分析了测量系统误差随炸点实际位置变化的分布情况; 根据误差分布图得到了在理论 100 m 测试距离下 X 坐标最大测量误差约为 0.292~0.303 m, Y 坐标最大测量误差约为 0.251~0.371 m, Z 坐标最大测量误差 0.270~0.336 m; 最后通过静爆实验对测量方法正确性、被动探测系统标定技术可行性和测量系统功能性进行了验证, 结果表明测量系统响应速度快且功能正常, 被动探测系统标定技术具备可行性且操作方便, 可适用于野外炸点位置的快速测量。

关键词: PSD 位置传感器; 炸点位置测量; 双目视觉原理; 被动探测标定; 误差分析

Research on 3D Coordinate Measurement Method of Explosion Points based on PSD Sensors

NING Wei, CHU Wenbo, ZHANG Bin, ZHAO Donge

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030000, China)

Abstract: Aimed at the spatial 3D coordinate measurement of explosion points, an explosion point measurement method for measuring the spatial three-dimensional coordinates of explosion points in the field is proposed, based on 2D a two-dimensional position sensitive detector (PSD) position sensor is proposed. An explosion-point 3D A measurement system based on 2D PSD position sensor is constructed for determining the coordinates of explosion points in three dimensions using a two-dimensional PSD position sensor is constructed. Furthermore, a mathematical model for measuring the spatial 3D three-dimensional coordinates of explosion points is established based on binocular vision principles. Calibration techniques for long-range passive detection systems in the field are studied. By decomposing and transferring The system error is decomposed and transferred to analyzesystem error the errors of various parameters are analyzed, plot the. 3D error Error distribution graphs of the three dimensions of the explosion point's position coordinates are plotted in Matlab, and analyze the distribution of measurement system errors with changes in the actual location of the explosion point positions is analyzed. Based on the error distribution graphs, the maximum measurement error for the X-coordinate is approximately from 0.292 m to 0.303 m, for the Y-coordinate it is approximately from 0.251 m to 0.371 m, and for the Z-coordinate it is approximately from 0.270 m to 0.336 m, with at a theoretical testing distance of 100 m. Finally, the static explosion experiments verify the correctness of the measurement method, the calibration technique the feasibility of the calibration technique for the passive detection system, and the functionality of the measurement system are validated through static explosion experiments. The experimental results demonstrateshow that the measurement system has a fast response speed and good function, ality, the calibration technique for the passive detection system is operationally feasible, and the method is suitable for the rapid measurement of explosion point positionss in the field.

Keywords: PSD; explosion point location measurement; binocular vision principle; passive detection calibration; error analysis

0 引言

在靶场武器测试中, 目标爆炸的位置 (即炸点位置) 是一个重要的测量参数, 炸点的空间三维坐标测量结果关

系到后续速度、超压等参数的测量^[1]。目前在炸点位置测量领域常见的方法有双 CCD 测量法^[2-4]、被动声测量法^[5-7]、光电时延测量法^[8-9]以及光敏管阵列测量法^[10]等方法。双

收稿日期: 2024-01-10; 修回日期: 2024-02-01。

基金项目: 国家自然科学基金(62205307); 国家自然科学基金青年科学基金项目(62005254); 山西省基础研究计划(自由探索类)(202203021212113); 山西省科技成果转化引导专项(202204021301044)。

作者简介: 宁威(1999-), 男, 硕士研究生。

赵冬娥(1971-), 女, 博士, 教授, 博士生导师。

引用格式: 宁威, 褚文博, 张斌, 等. 基于 PSD 传感器的炸点三维坐标测量方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 195-203.

CCD 测量法是基于双目视觉原理而来的, 其有两种衍生方法, 一种是平行光轴法^[11-12], 该方法需要两台相机处于光轴平行的状态, 但是由于其调整难度较大, 测试范围较小, 不适用于外场环境; 另一种则是 CCD 交汇测量法, 该方法是目前使用最广泛的炸点位置测量方法, 其通过两台交汇布设的高速相机来拍摄爆炸图像, 并对图像进行处理得到炸点位置坐标, 但该方法需要高帧率的 CCD 相机, 成本高昂, 实时性较差。被动声测量法是通过布设多个声传感器并根据爆炸声音到达各个探测器的时延差来计算炸点位置坐标, 其原理简单、成本低廉, 但是易受气象环境的影响^[13], 解算复杂误差大。光电时延测量法是根据火光信号到达不同位置光电探测器的时延差来推算炸点位置, 该方法类似被动声测量法, 需要布设的探测器较多, 且对电路响应一致性要求较高。光敏管阵列测量法是通过大量高速响应的光敏管组成规律排列的探测阵列, 根据入射光引起的响应计算炸点位置坐标, 该方法由于光敏管之间存在间隙, 导致其分辨率不高, 仅适用于密闭小范围环境使用, 无法适应外场大范围情形。因此, 为了实现野外炸点位置的快速测量, 本文提出了基于二维位置敏感传感器 (PSD, position sensitive detector) 的炸点位置测量方法。该测量方法主要是根据双目视觉原理进行炸点位置测量^[14-16], 并且二维 PSD 器件可以根据入射光斑在光敏面上的位置输出入射点坐标电压^[17], 结合测量数学模型可以快速得到炸点空间三维坐标。

在外场进行炸点位置测量时, 传统的 CCD 测量法是使用标志物结合图像处理的方法进行标定^[18], 该方法需要探测设备具有拍摄图片的功能且大多情况下是事后处理数据, 实时性不能得到保证。在短距离下, PSD 位置传感器可以效仿该方法, 使用发光的标志物进行标定^[19], 但是当测试距离较远时, 对标志物光源的功率要求很高, 很难找到合适的光源进行标定工作, 因此针对野外复杂地势和快速布场测试的需求, 本文提出了被动探测系统野外快速标定技术, 通过瞄准镜和 GPS 接收机, 实现在野外环境下的测量系统光轴快速交汇以及距离方位角标定。基于上述原理及方法, 本文在 matlab 中从炸点位置坐标 3 个维度分析测量系统的误差分布情况。最后经靶场试验验证, 基于 PSD 传感器的炸点三维坐标测量方法是正确的, 该测量系统布设方便、调整迅速、响应速度快并且可以适应野外环境下的炸点位置测量。

1 基于 PSD 的炸点位置测量原理

1.1 二维 PSD 位置传感器原理

二维 PSD 位置传感器是一种可以检测入射光点位置的器件, 其基于横向光电效应进行工作^[20], 其光敏面由面状 PN 节构成, 在表面 P 层形成面状分布电阻, 并在其 4 个对角有引出 4 个收集光电压的电极, 如图 1 所示。

由于光敏面分布电阻较为均匀, 当光斑入射光敏面产生光电压时, 4 个电极收集到的电压大小与入射光斑位置唯一对应。其计算表达式如下:

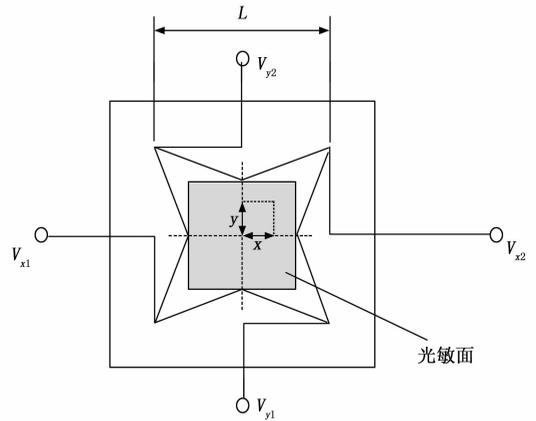


图 1 二维 PSD 位置传感器光敏面

$$X = \frac{(V_{x2} + V_{y1}) - (V_{x1} + V_{y2})}{V_{x1} + V_{x2} + V_{y1} + V_{y2}} \times \frac{L}{2} \quad (1)$$

$$Y = \frac{(V_{x2} + V_{y2}) - (V_{x1} + V_{y1})}{V_{x1} + V_{x2} + V_{y1} + V_{y2}} \times \frac{L}{2} \quad (2)$$

其中: V_{x1} 、 V_{x2} 、 V_{y1} 、 V_{y2} 为四个电极输出电压, L 为电极间距, X 和 Y 为入射光斑坐标。

1.2 炸点三维坐标测量原理

基于二维 PSD 位置传感器原理, 本文提出了基于 PSD 的炸点位置测量方法, 测量原理如图 2 所示, 两台测量系统主机采取交汇布站的方式, 以设备光轴 (光敏面中心 O_p 与测量坐标系原点 O_w 的连线) 的交汇点为原点, 两台设备分别布设于两个方向的合适距离处, 以平行于两套设备连线且过原点的直线作为 X_w 轴, 过原点且垂直于 X_w 轴的直线作为 Y_w 轴, 过原点同时垂直于 X_w 轴和 Y_w 轴的直线作为 Z_w 轴, 建立测量坐标系。

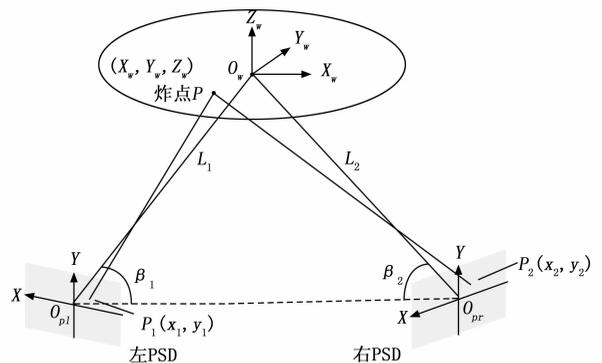


图 2 测量原理图

由于二维 PSD 位置传感器具有根据入射光点位置得到二维坐标的功能, 因此在炸点出现后, 两台设备分别有读数 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 。在测量系统进行标定时可以得到两 PSD 中心 O_{pl} 、 O_{pr} 分别与原点 O_w 的距离 L_1 和 L_2 , 以及设备光轴与两设备连线的夹角即方位角 β_1 和 β_2 , 设备镜头焦距为 f_1 和 f_2 。在实际布场时, 一般需要通过水平仪配合位姿调整模块将设备横滚角 (PSD 光敏面 X 轴与水平面的夹角) 调整至零。至于俯仰角 (设备光轴与水平面夹角), 在调整时无需关注, 调整结束后可以用水平仪测出, 后续

通过坐标系转换的方法引入, 由此即可实现测试现场快速调姿并进行炸点位置测量。

基于横滚角和俯仰角为零的条件, 可以得到炸点的三维坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 表达式:

$$X_w = \frac{(L_1 \cos\beta_1 + L_2 \cos\beta_2) \cos\left[\beta_1 - \arctan\left(\frac{x_1}{f_1}\right)\right] \sin\left[\beta_2 + \arctan\left(\frac{x_2}{f_2}\right)\right]}{\sin\left[\beta_1 - \arctan\left(\frac{x_1}{f_1}\right) + \beta_2 + \arctan\left(\frac{x_2}{f_2}\right)\right]} - L_1 \cos\beta_1 \quad (3)$$

$$Y_w = \frac{(L_1 \cos\beta_1 + L_2 \cos\beta_2) \sin\left[\beta_1 - \arctan\left(\frac{x_1}{f_1}\right)\right] \sin\left[\beta_2 + \arctan\left(\frac{x_2}{f_2}\right)\right]}{\sin\left[\beta_1 - \arctan\left(\frac{x_1}{f_1}\right) + \beta_2 + \arctan\left(\frac{x_2}{f_2}\right)\right]} - L_1 \sin\beta_1 \quad (4)$$

$$Z_w = \frac{Z_{w1} + Z_{w2}}{2} \quad (5)$$

其中: Z_{w1} 和 Z_{w2} 的表达式如下:

$$Z_{w1} = \frac{y_1 (L_1 \cos\beta_1 + L_2 \cos\beta_2) \cos\left[\arctan\left(\frac{x_1}{f_1}\right)\right] \sin\left[\beta_2 + \arctan\left(\frac{x_2}{f_2}\right)\right]}{f_1 \sin\left[\beta_1 - \arctan\left(\frac{x_1}{f_1}\right) + \beta_2 + \arctan\left(\frac{x_2}{f_2}\right)\right]} \quad (6)$$

$$Z_{w2} = \frac{y_2 (L_1 \cos\beta_1 + L_2 \cos\beta_2) \cos\left[\arctan\left(\frac{x_2}{f_2}\right)\right] \sin\left[\beta_1 - \arctan\left(\frac{x_1}{f_1}\right)\right]}{f_2 \sin\left[\beta_1 - \arctan\left(\frac{x_1}{f_1}\right) + \beta_2 + \arctan\left(\frac{x_2}{f_2}\right)\right]} \quad (7)$$

由于测得水平两坐标后只需要一个 PSD 设备的 y 读数即可求得高度坐标, 因此炸点 Z_w 坐标取两个设备计算结果的平均值, 最终表达式如下:

$$Z_w = \frac{(L_1 \cos\beta_1 + L_2 \cos\beta_2) \left\{ y_1 f_2 \cos\left[\arctan\left(\frac{x_1}{f_1}\right)\right] \sin\left[\beta_2 + \arctan\left(\frac{x_2}{f_2}\right)\right] + y_2 f_1 \cos\left[\arctan\left(\frac{x_2}{f_2}\right)\right] \sin\left[\beta_1 - \arctan\left(\frac{x_1}{f_1}\right)\right] \right\}}{2 f_1 f_2 \sin\left[\beta_1 - \arctan\left(\frac{x_1}{f_1}\right) + \beta_2 + \arctan\left(\frac{x_2}{f_2}\right)\right]} \quad (8)$$

上述表达式基于横滚角和俯仰角为零这一条件, 得到的坐标系与以地面为基准的空间直角坐标系不同, 其坐标值不对应高度、深度等参数, 因此在实际中往往需要将结果进行坐标系转换, 转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = \mathbf{R}_X(\alpha) \mathbf{R}_Y(\beta) \mathbf{R}_Z(\gamma) \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: \mathbf{R} 为坐标系 3 个维度旋转矩阵, 脚标代表所绕旋转轴, 各个旋转角度可以根据事先用水平仪测出的角度计算而来, 3 个旋转矩阵具体表达式如下:

$$\mathbf{R}_X(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_Y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_Z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

1.3 炸点三维坐标测量系统设计

基于上述测量原理构建炸点空间三维坐标测量系统 (后称测量系统), 该测量系统包含二维 PSD 位置传感器模块、信号调理处理模块、光学成像模块、数据采集模块、辅助标定模块以及位姿调整模块等部分, 主要组成如图 3 所示。

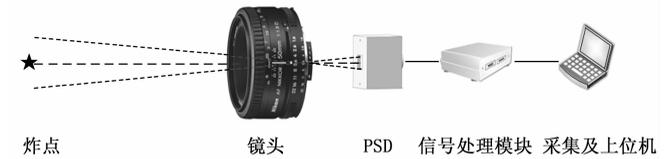


图 3 测量系统主要组成部分

其中二维 PSD 位置传感器模块主要由二维 PSD 传感器、反向偏置电压电路和转换放大器组成, 其原理图如图 4 所示, 当入射光到达光敏面时, 基于横向光电效应产生输入电流信号, 通过转换放大器将电流信号转换为电压信号并将其放大, 最后于 4 个电极处输出, 其输出的电压值和入射光斑与 4 个电极的相对位置相关, 由于光敏面电阻均匀, 越靠近某一个电极其输出越大, 可以根据输出电压快速判断入射光点在光敏面上的大概位置。

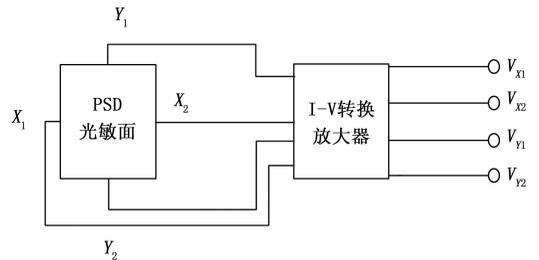


图 4 二维 PSD 传感器模块原理图

信号调理模块是专门用于处理二维 PSD 位置传感器模块 4 个电极的输出电压, 其包含模拟运算电路、数模转换电路、CPU 以及适配上位机的线驱动器部分, 模拟电路部分原理图如图 5 所示。由于二维 PSD 传感器模块仅仅只是将输入信号进行转换, 因此并不能直接输出可以使用的坐标值, 而信号调理模块包含模拟运算电路可以将传感器模块输出的 4 个电压值进行运算处理, 其计算原理如公式

(1) ~ (2) 所示, 最终得到与入射光斑在光敏面上实际位置相关的坐标值, 测量系统使用的二维 PSD 传感器模块和调理模块的运算结果中 1 V 正好等于 1 mm。此外调理模块还可以输出代表入射光强大小的 4 个电极输出电压之和, 根据该数值判断入射光是否处于合适水平。至于数字电路电路部分, 响应速度较慢且需要配合上位机使用, 不适用于外场环境, 在此不做讨论。

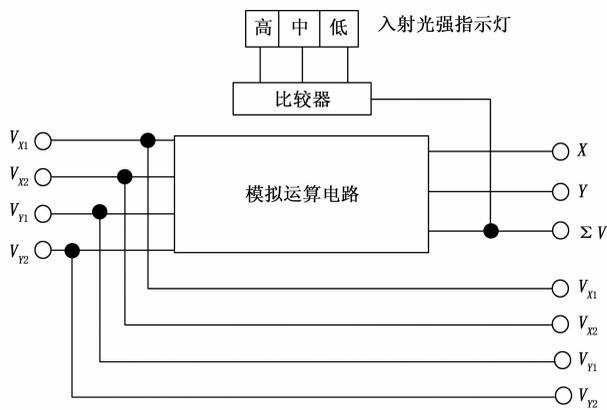


图 5 调理模块原理图

光学成像模块主要为光学镜头以及连接其与 PSD 模块的连接结构, 类似相机底片与镜头之间的连接结构。采集模块为四通道采集系统, 采样率为 4 MHz。辅助标定模块由瞄准镜和具备 RTK 技术 (实时动态载波相位差分技术^[21]) 的 GPS 接收机 (后称 RTK) 组成, 其结构如图 6 所示。其中 RTK 通过定位销安装到外壳上, 二维 PSD 传感器模块光敏面与定位销中心有严格的位置对应关系, 从而保证 RTK 与光敏面中心的相对位置是固定的。在实验室环境下通过测量出该位置关系, 可以使 RTK 在测量过程中得到光敏面中心的位置坐标。此外, RTK 可以通过定位销快速插拔, 瞄准镜在使用过程中是不受 RTK 遮挡, 因为两者在测量系统的标定过程中是有严格的使用时序关系。

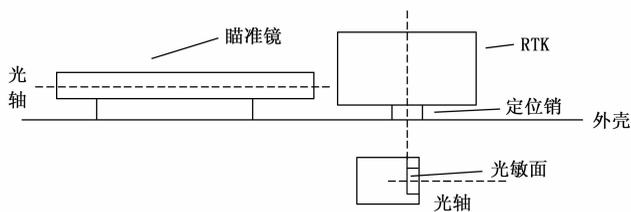


图 6 辅助标定模块

2 被动探测系统野外快速标定技术

PSD 位置传感器不同于相机, 无法通过拍摄标志物结合图像处理的方法进行标定, 近距离下可以用发光标志物进行标定, 但随着距离提高, 对光源的功率要求也逐步提高, 在远距离下很难找到合适的光源, 因此本文提出了一种基于瞄准镜和 RTK 的被动探测系统野外快速标定技术。其中瞄准镜用于光轴校准并辅助测量系统设备实现远距离光轴交汇, RTK 用于标定距离和角度。

瞄准镜校准原理如图 7 所示, 当瞄准镜光轴和 PSD 镜

头光轴平行后, 瞄准镜分划线中心对准点下方固定距离处即为 PSD 镜头光轴的对准点, 根据此方法可在远距离下利用瞄准镜实现设备光轴交汇。

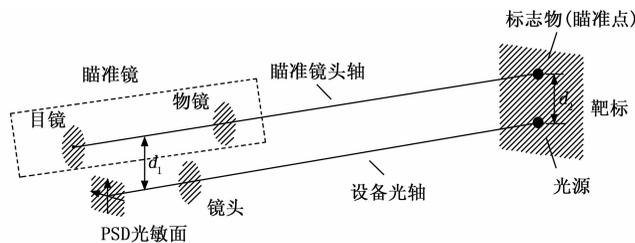


图 7 光轴校准原理图

在实验室内标定出 RTK 与 PSD 的位置关系后, RTK 即可通过测出设备和预设炸点坐标来完成距离和方位角的测量, 其精度为毫米级。在 RTK 手簿中, 可以将大地坐标系 BLH 转换为空间直角坐标系 XYZ, 因此在测量点坐标时可以直接到 XYZ 系下坐标, 如图 8 所示, 距离和方位角表达式如下:

$$L_1 = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \quad (13)$$

$$L_2 = \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} \quad (14)$$

$$\beta_1 = \arccos \frac{\frac{(x_0 - x_1)(x_2 - x_1) + (y_0 - y_1)(y_2 - y_1) + (z_0 - z_1)(z_2 - z_1)}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \cdot \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}} \quad (15)$$

$$\beta_2 = \arccos \frac{\frac{(x_0 - x_2)(x_1 - x_2) + (y_0 - y_2)(y_1 - y_2) + (z_0 - z_2)(z_1 - z_2)}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} \cdot \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2}} \quad (16)$$

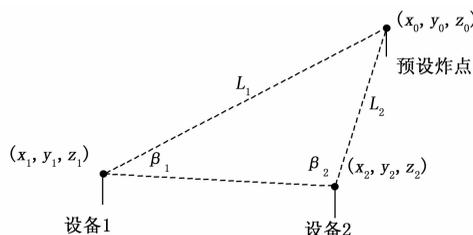


图 8 RTK 测量示意图

3 理论误差分析

3.1 系统误差分析

由前述公式 (3) ~ (4)、(8) 可知, 炸点三维坐标仅与镜头焦距 f 、距离 L 、方位角以及二维 PSD 读数 (x, y) 相关, 因此测量系统的误差只与上述参数的误差相关。因为二维 PSD 位置传感器光敏面较小, 使用的视场为镜头中心部分, 其中心区域畸变可以忽略不计, 故得到如图 9 所示的理论误差组成。

引起 PSD 读数误差的主要原因是光敏面制作工艺, 由

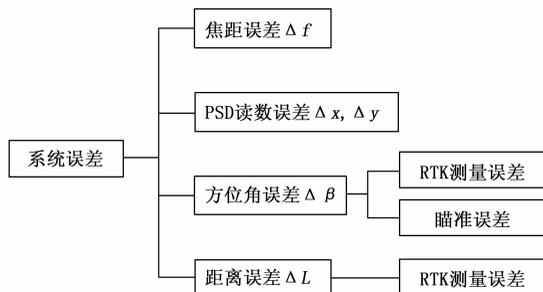


图 9 系统误差组成

于实际很难生产出绝对均匀的光敏材料，因此入射光斑引起的电压坐标值与其入射的真实位置存在一定的偏差，在室温下 0.2 mm 的入射光点的响应情况如图 10 所示，在越靠近边缘的位置，其检测结果与真实入射位置偏差越大，类似相机镜头的“枕形畸变”，因此在使用时需要避免探测目标入射光落在 PSD 光敏面的边缘。通常使用范围为有效区域的百分之八十。

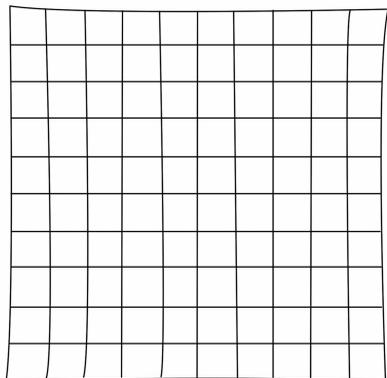


图 10 PSD 光敏面误差示意图

在方位角误差中包含两部分，一部分是由 RTK 测量引起的误差，另一部分是标定过程中光轴校准引起的误差，如图 11 所示。由于系统测量距离较远，RTK 测量误差为毫米级，引起的角度误差远低于 0.01，而光轴校准引起的误差与标志物半径 a 和瞄准的距离 d 相关。选择合适尺寸的标志物，在肉眼瞄准时，分划线中心落在标志物上且没有超出标志物边界，即可认为瞄准完成，其引起的误差如图 11 所示，具体表达式如下：

$$\Delta\beta = \arctan\left(\frac{a}{d}\right) \quad (17)$$

其中：标志物半径 a 为 7.5 mm，光轴校准距离 d 一般是 50 m，引起的角度误差约 0.01°。

综上所述，炸点位置坐标受 PSD 读数 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ，光敏面到测量坐标原点的距离 L_1 和 L_2 ，两设备的方位角 β_1 和 β_2 ，以及镜头焦距 f_1 和 f_2 等参数的影响。所以炸点位置坐标的误差取决于上述参数的测量误差，由误差传递公式得炸点 X_w 坐标测量误差为：

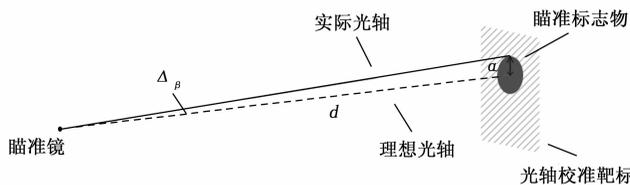


图 11 光轴校准误差示意图

$$d_{X_w} = \sqrt{\frac{[\Delta x(x_1)]^2 + [\Delta x(x_2)]^2 + [\Delta x(\beta_1)]^2 + [\Delta x(\beta_2)]^2 + [\Delta x(L_1)]^2 + [\Delta x(L_2)]^2 + [\Delta x(f_1)]^2 + [\Delta x(f_2)]^2}{}} \quad (18)$$

其中： $\Delta x(x_1)$ ， $\Delta x(x_2)$ ， $\Delta x(\beta_1)$ ， $\Delta x(\beta_2)$ ， $\Delta x(L_1)$ ， $\Delta x(L_2)$ ， $\Delta x(f_1)$ ， $\Delta x(f_2)$ 分别为两 PSD 横坐标读数 x_1 和 x_2 、方位角 β_1 和 β_2 、焦距 f_1 和 f_2 以及距离 L_1 和 L_2 对 X_w 坐标的测量误差分量，每个参数的误差分量可以用其偏微分表示，此外以 Δx_1 ， Δx_2 ， $\Delta\beta_1$ ， $\Delta\beta_2$ ， ΔL_1 ， ΔL_2 ， Δf_1 ， Δf_2 表示对应参数的测量误差值，即可得到具体的误差传递表达式：

$$d_{X_w} = \sqrt{\left(\frac{\partial X_w}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial X_w}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2\right)^2 + \left(\frac{\partial X_w}{\partial \beta_1} \cdot \Delta\beta_1\right)^2 + \left(\frac{\partial X_w}{\partial \beta_2} \cdot \Delta\beta_2\right)^2 + \left(\frac{\partial X_w}{\partial L_1} \cdot \Delta L_1\right)^2 + \left(\frac{\partial X_w}{\partial L_2} \cdot \Delta L_2\right)^2 + \left(\frac{\partial X_w}{\partial f_1} \cdot \Delta f_1\right)^2 + \left(\frac{\partial X_w}{\partial f_2} \cdot \Delta f_2\right)^2} \quad (19)$$

同理，炸点 Y_w 坐标测量误差和 Z_w 坐标测量误差传递表达式分别为：

$$d_{Y_w} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y_w}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_w}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_w}{\partial \beta_1} \cdot \Delta\beta_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_w}{\partial \beta_2} \cdot \Delta\beta_2\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_w}{\partial L_1} \cdot \Delta L_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_w}{\partial L_2} \cdot \Delta L_2\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_w}{\partial f_1} \cdot \Delta f_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_w}{\partial f_2} \cdot \Delta f_2\right)^2} \quad (20)$$

$$d_{Z_w} = \sqrt{\left(\frac{\partial Z_w}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_w}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_w}{\partial \beta_1} \cdot \Delta\beta_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_w}{\partial \beta_2} \cdot \Delta\beta_2\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_w}{\partial L_1} \cdot \Delta L_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_w}{\partial L_2} \cdot \Delta L_2\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_w}{\partial f_1} \cdot \Delta f_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_w}{\partial f_2} \cdot \Delta f_2\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_w}{\partial y_1} \cdot \Delta y_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_w}{\partial y_2} \cdot \Delta y_2\right)^2} \quad (21)$$

为了得到炸点测量误差在测量坐标系下的分布规律，因此需要对其中与标定无关的参数进行变换。在距离、方位角、焦距取定值的情况下，由前文坐标表达式可知：

$$\begin{cases} X_w = f_1(x_1, x_2) \\ Y_w = f_2(x_1, x_2) \end{cases} \quad (22)$$

反解上述表达式得到：

$$\begin{cases} x_1 = f_3(X_w, Y_w) \\ x_2 = f_4(X_w, Y_w) \end{cases} \quad (23)$$

将其代入误差传递公式 (19) 和 (20)，即可得到坐标误差随实际位置变化的表达式。

由于理论上两侧 PSD 设备的 y 读数误差是完全一致的，因此在仿真时不需要进行平均处理。从表达式中可以看出，在方位角、距离和焦距取定值时， ΔZ_w 是关于 x_1 、 x_2 和 y 的函数，即使采取前文反解代入的办法， ΔZ_w 仍然是关于 X_w 、 Y_w 和 Z_w 的函数，即：

$$\begin{cases} X_w = f_1(x_1, x_2) \\ Y_w = f_2(x_1, x_2) \\ Z_w = f_5(x_1, x_2, y) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x_1 = f_3(X_w, Y_w) \\ x_2 = f_4(X_w, Y_w) \\ y = f_6(X_w, Y_w, Z_w) \end{cases} \quad (24)$$

因此用散点拟合的方式来分析 Z_w 坐标的误差分布。

3.2 理论最大误差仿真结果

根据误差分析结果，各个参数误差均取最大值，在 Matlab 里仿真参数设置如表 1 所示

表 1 仿真参数表

测量距离/m	100	交汇角度/(°)	90
镜头焦距/mm	50	焦距误差/mm	0.1
PSD 读数误差/ μm	150	方位角误差/(°)	0.01

测试区域为两设备探测视场的重合区域，其俯视图如图 12 所示。

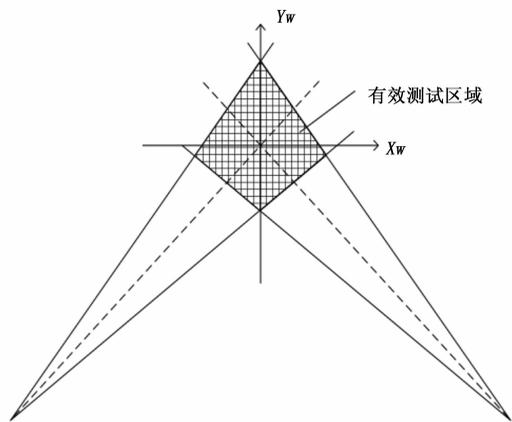


图 12 有效测试区域

根据测量距离、PSD 光敏面线性区域尺寸和镜头焦距以及计算公式， X_w 的取值范围在 $(-15, 15)$ 内， Y_w 坐标取值范围在 $(-15, 16)$ 内，为方便观察，仿真时坐标取值范围均取 $[-16, 16]$ 。 X_w 和 Y_w 坐标的误差在实际测量坐标系下的分布情况仿真结果如图 13 和图 14 所示。

根据仿真结果， X_w 坐标的误差分布结果为沿 Y_w 轴方向由负到正（由近及远）先减后增，沿 X_w 轴方向由负到正（从左往右）先增后减且关于 Y_w 轴对称，在 $(-14.002 1, -1.400 2)$ 和 $(14.002 1, -1.400 2)$ 处取得最小误差约 0.292 m ，在 $(0, 15.713 5)$ 取得最大误差约 0.303 m 。 Y_w 坐标的误差分布结果为沿 Y_w 方向由负到正逐渐增加，沿

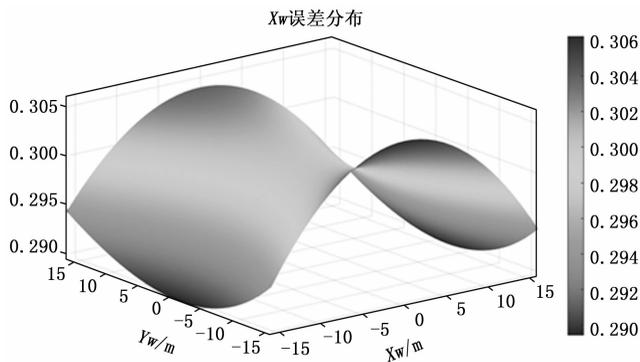


图 13 炸点位置 X_w 坐标的误差分布

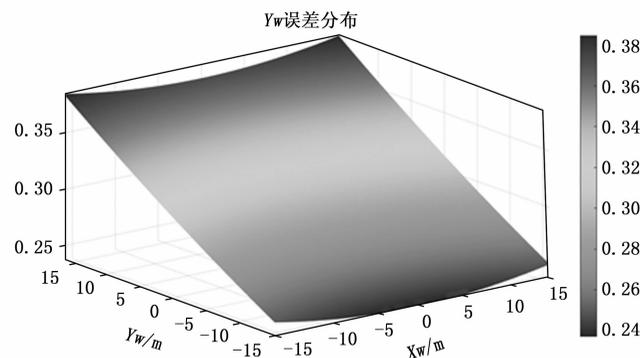


图 14 炸点位置 Y_w 坐标的误差分布

X_w 方向先减后增且关于 Y_w 轴对称，在 $(0, -12.856 5)$ 处取得最小误差约 0.251 m ，在 $(0, 15.713 5)$ 处取得最大误差约 0.371 m 。由于 X_w 和 Y_w 坐标计算与高度无关，因此可以理解为在有效测试区域内任意高度下，两者误差分布都满足上述规律。

由前文分析， Z_w 坐标误差与三个维度均有关联，因此选择散点图来仿真其分布规律。如图 15 所示，在有效测试区域内选择 125 个特征点，三维坐标对应测量坐标系下的位置，颜色轴对应该炸点 Z_w 坐标误差值，通过观察颜色变化得到 Z_w 坐标误差的分布规律。为了更细致的观察，分别绘制了如

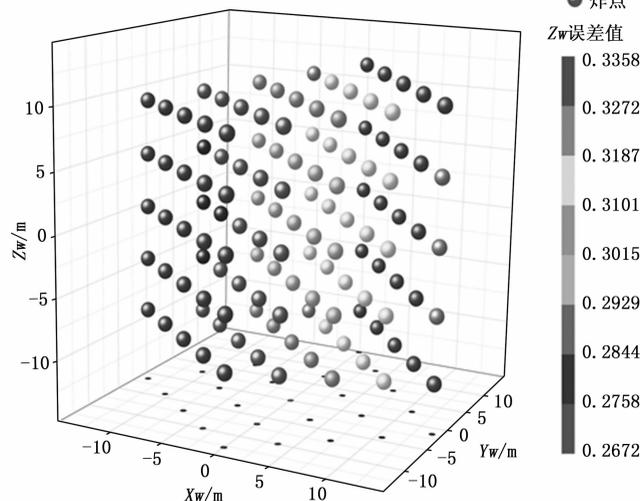


图 15 Z_w 坐标误差散点图

图 16 所示的俯视分布图与图 17 所示的 Y_w 切面分布图。

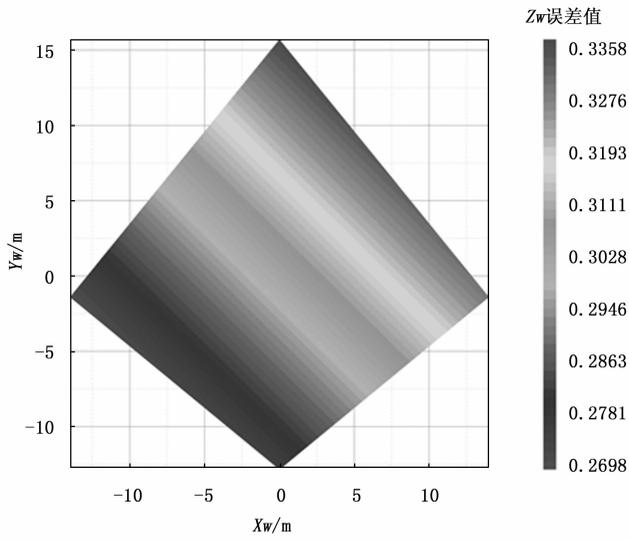


图 16 俯视分布图

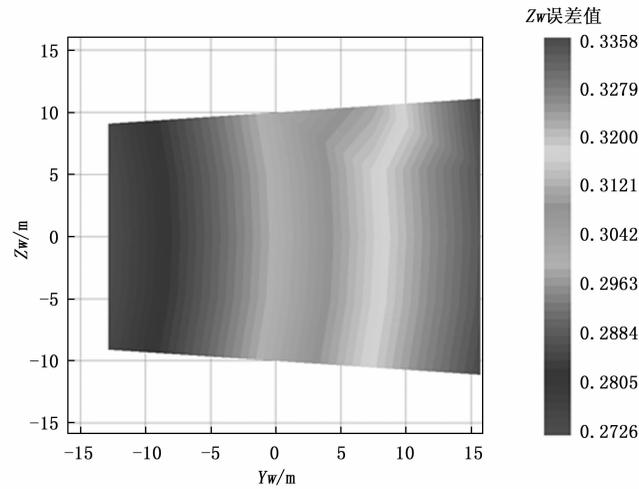


图 17 $Y_w=0$ 切面分布图

根据仿真结果, 从俯视角度观察, 在每一个高度下, Z_w 坐标的误差均由测量坐标系第三象限向第一象限逐渐增大, 即由近及远逐步增大, 在同一远近距离下, 从左往右逐步增大; 从 $Y_w=0$ 切面观察, Z_w 坐标误差沿 Y_w 轴方向由负到正 (由近及远) 逐渐增大, 沿 Z_w 轴方向由负到正 (从低到高) 先减后增, 在 $(-14.002\ 1, -1.400\ 2, 0)$ 处取得最小误差约 0.270 m, 在 $(0, 15.713\ 5, 11.111\ 1)$ 处取得最大误差约为 0.336 m。

4 试验方案与结果

测量系统在外场进行试验时, 除去测试系统主机外, 还需要连接火光触发器。这是因为在靶场中存在较多复杂的环境干扰因素, 如: 震动、电磁、环境光等, 使用火光触发器作为外触发的方式相对于内触发的方式更抗干扰。

本次试验在南阳某靶场进行, 属于静爆试验, 环境温度约 20 摄氏度, 白天有太阳光背景, 预设炸点位置为固定

点位的弹托。在布场阶段, 先预估出大概的测量范围, 然后于预设炸点附近测量范围内架设 RTK 设备基站, 通过移动站测出预设炸点位置, 根据靶场环境选择背对太阳方向分别布设两侧测量设备, 设备主机架设于三脚架上, 操作者通过其上瞄准镜和位姿调整模块进行光轴交汇, 交汇点选择基站上的标志点, 通过水平仪调平之后, 利用 RTK 移动站分别测出两侧设备的坐标点, 然后根据坐标点计算出距离和方位角, 即完成标定。随后连接火光触发器并设置其参数, 然后使其对准预设炸点位置, 完成后连接采集模块并设置采集参数进入待采集状态。标定参数如图 18 所示, 测量系统如图 19 所示。

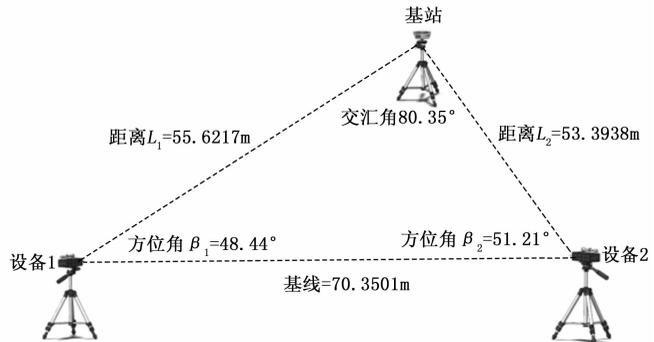


图 18 实验布场示意图

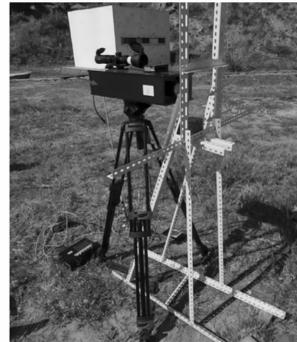


图 19 测量系统照片

在实际测量过程中, 由于存在背景光干扰, PSD 传感器经过调理模块处理后的坐标电压值是包含背景光和目标入射光的, 所以需要直接测量 PSD 传感器 4 个引脚的输出, 有入射光时的 4 个引脚电压减去仅含背景光时的 4 个引脚电压可以去除背景光的干扰, 再代入公式 (1) ~ (2) 依然可以得到入射光斑坐标。因此当战斗部爆炸瞬间产生火光引起火光触发器响应后, 采集模块开始记录 PSD 传感器的 4 个引脚输出电压数据形成随时间变化的波形。读数选取波形拐点即一次微分的峰值点, 部分波形如图 20 和图 21 所示。

其中通道 CH1 到 CH4 分别对应 PSD 传感器 4 个引脚 V_{x1} 、 V_{x2} 、 V_{y1} 、 V_{y2} 。

为了检验测量系统功能性, 以预设炸点在测量坐标系下的坐标作为坐标参考值, 实验中得到炸点位置坐标作为坐标测量值, 通过比对坐标参考值和坐标测量值来验证测量系统的功能性是否正常。实验数据表如表 2 所示。

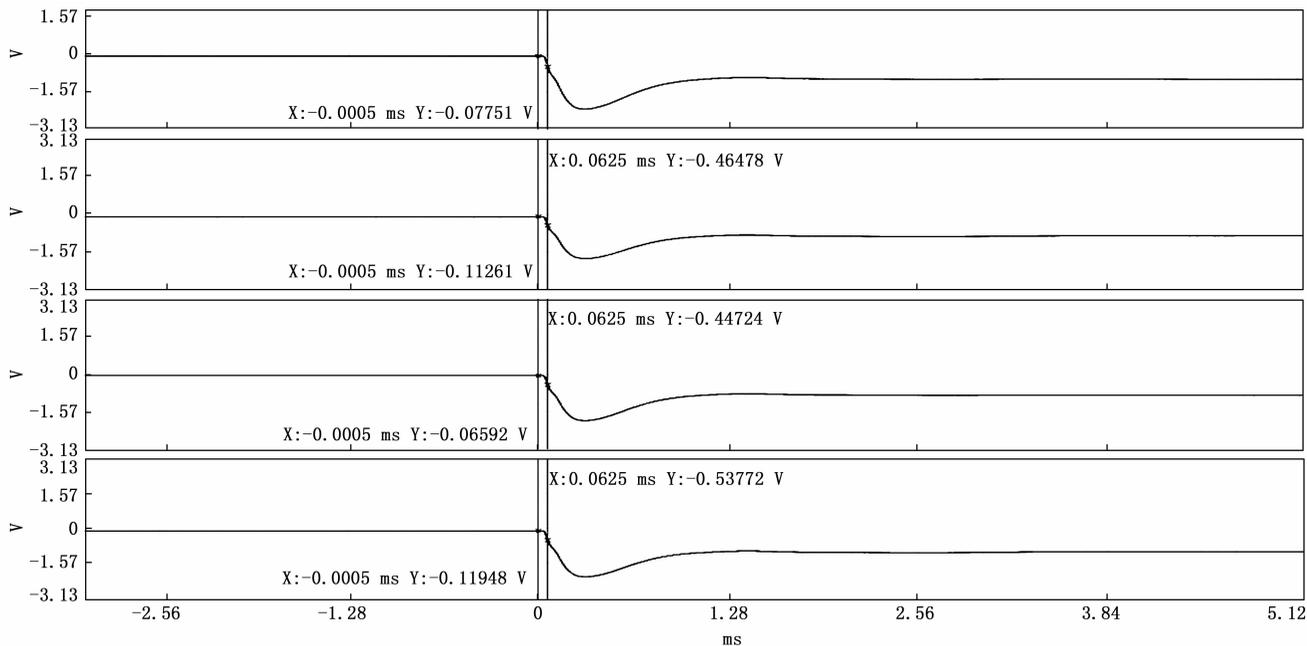


图 20 第一发左侧设备采集波形

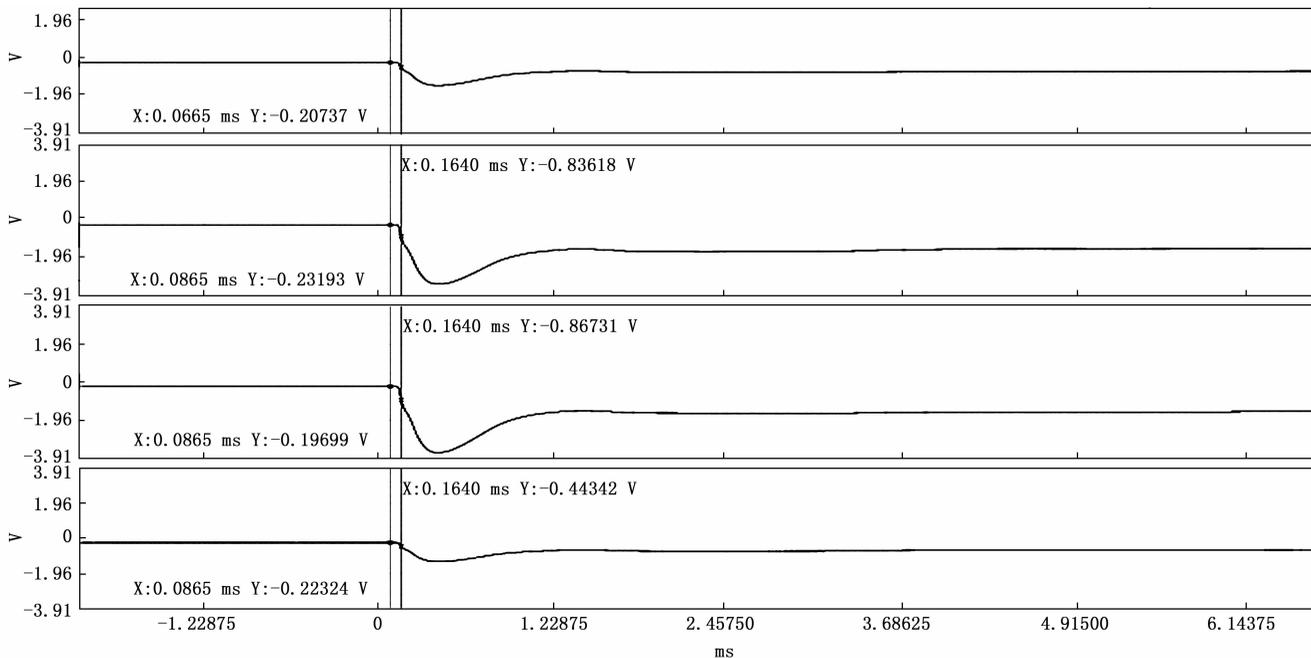


图 21 第一发右侧设备采集波形

表 2 测量数据表

组号	坐标测量值/m			坐标参考值/m			坐标偏差值/m		
	X_w	Y_w	Z_w	X_m	Y_m	Z_m	ΔX	ΔY	ΔZ
1	1.97	3.24	0.34	2.08	3.34	0.14	0.11	0.10	0.20
2	1.97	3.29	0.27				0.11	0.05	0.13
3	1.94	3.29	0.16				0.14	0.05	0.02

根据测量数据表，三次测量的一致性较好，仅高度坐标变化明显，导致该现象的原因是爆炸物放置姿态不同（横放和竖放）。通过比较坐标计算值和坐标测量值，得到 X_w 坐标误差为 0.11~0.14 m， Y_w 坐标误差为 0.05~0.10 m，

Z_w 坐标误差为 0.02~0.20 m。结合仿真结果，实际坐标测量误差小于理论最大测量误差，说明测量系统可以实现炸点位置的有效测量，从而说明基于 PSD 的炸点位置测量方法的正确性。

5 结束语

本文提出了基于二维 PSD 位置传感器的远距炸点空间三维坐标测量方法，构建了基于二维 PSD 传感器的炸点三维坐标测量系统；提出了基于瞄准镜和 RTK 的快速标定技术，通过设计特殊的机械结构实现被动探测设备在远距离情况下的光轴交汇，利用 RTK 设备完成方位角和距离的标

定; 根据误差传递公式建立了炸点坐标测量误差仿真模型, 详细分析了各参数的误差情况, 最终得到了炸点测量误差在实际测量坐标系下的分布情况; 对系统的理论最大误差进行了仿真分析, 在 100 m 距离垂直交汇的情况下, 各参数取最大误差值, 得到 X_w 坐标测量误差约为 0.292~0.303 m, Y_w 坐标测量误差约为 0.251~0.371 m, Z_w 坐标测量误差约为 0.270~0.336 m。在南阳某靶场通过静爆实验验证得到测量系统实际测量误差小于理论最大误差, 且连续三发炸点测量结果一致性较高, 说明测量系统可实现炸点位置有效测量且适应野外测试环境。并且在该次实验中, 根据前文的标定方法, 在靶场实际操作中可以方便的实现测量系统光轴的快速交汇和参数标定, 验证了被动探测系统野外快速标定技术的可行性。虽然测量系统的功能性经过了靶场试验的验证, 但仍有很大的改进空间, 尤其是在精度方面, 与双 CCD 交汇测量法相比, 精度还有很大差距, 主要原因是 PSD 传感器的精度不够理想, 下一步的研究目标就是通过修正、补偿或是更换传感器的办法提高测量系统的精度。

参考文献:

- [1] 张小霞. 多闪光点视频定位与回放系统的研究与实现 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [2] 张华刚. 基于机器视觉算法的车站人员定位方法 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023 (2): 81-86.
- [3] 姚 雷, 李翰山, 张晓倩, 等. 线阵 CCD 辅助探测天幕阵列弹丸位置解析模型 [J]. 传感器与微系统, 2023, 42 (8): 22-25.
- [4] 曹广如, 黄石甫. 基于机器视觉的尺寸测量研究进展 [J]. 轨道交通材料, 2023, 2 (6): 29-33.
- [5] 马伯乐, 卫红凯, 郑思远, 等. 一种水声组网定位一体化系统设计与实现 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6 (6): 706-712.
- [6] 王雨辰. 声定位与识别系统的信号处理研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [7] LIU M, ZENG Q, JIAN Z, et al. Underwater target passive acoustic localization method based on Hanbury Brown-Twiss interference [J]. Sensor Review, 2022, 42 (6): 725-732.
- [8] 郑霄霏. 基于五元十字阵空中炸点位置测量系统研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2017.
- [9] 贾添丹. 空中炸点三维坐标定位技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2017.
- [10] 武威兴, 赵冬娥, 张 斌, 等. 基于光敏管阵列交汇的空间炸点位置测试系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2022, 41 (1): 114-116.
- [11] 张亚男. 基于 PSD 的炸点空间位置测量系统设计 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [12] 黄战华, 张 光, 曹雨生, 等. 通用工业相机的炸点瞬时位置测量模拟研究 [J]. 应用光学, 2021, 42 (5): 891-897.
- [13] 冯 松, 张亚辉, 尚书贤, 等. 声测连发弹丸炸落点坐标的快速定位方法 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40 (7): 234-237.
- [14] CHUNYAN W, LI Y, ZAI L, et al. Linear Laser Scanning Measurement Method Tracking by a Binocular Vision [J]. Sensors, 2022, 22 (9): 3572-3572.
- [15] 赵 楠. 双目立体视觉系统的研究与应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2021 (5): 118-119.
- [16] TA C C, TING Y H. A CMOS Monolithic Position-Sensitive Detector With Stray Illumination Noise Removal for Light Spot Position Detection Applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17 (6): 1918-1924.
- [17] ALVARO D, LUIS J L, AITOR A, et al. Accuracy and Precision of Agents Orientation in an Indoor Positioning System Using Multiple Infrastructure Lighting Spotlights and a PSD Sensor [J]. Sensors, 2022, 22 (8): 2882-2882.
- [18] 王 冲. 基于双目视觉的机器人控制系统设计 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [19] 黄战华, 张亚男, 方 石, 等. 基于单 PSD 的目标空间位姿测量方法 [J]. 光子学报, 2018, 47 (9): 166-174.
- [20] DWIK S, SOMASUNDARAM N. Modeling and simulation of two-dimensional position sensitive detector (PSD) sensor [J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2019, 9 (1): 744-753.
- [21] 张发兴, 王大千, 员 航. 基于实时动态载波相位差分的无人机起降引导系统研制 [J]. 湘潭大学学报 (自然科学版), 2023, 45 (5): 87-96.

(上接第 180 页)

- [3] 张 团, 张国伟, 徐立新. 低成本中高空超音速靶弹弹道优化设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2010 (2): 198-200.
- [4] 张邦楚, 韩子鹏. 巡航导弹模拟靶弹平飞弹道设计 [J]. 弹道学报, 2003, 15 (2): 28-34.
- [5] 贾志涛. 导引头角跟踪回路性能分析 [J]. 制导与引信, 1994, (2): 23-26.
- [6] 丁鹭飞. 雷达原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [7] 高 烽. 雷达导引头概论 [M]. 电子工业出版社, 2010.
- [8] Merrill I. Skolnik, Radar Handbook, Third Edition [M], McGraw-hill Publishing Company, 2009.
- [9] 雷虎民. 导弹制导与控制原理 [M], 北京: 国防工业出版社, 2016.

- [10] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [11] 马洪霞, 梁 彦. 某有源靶弹微波源程序指向系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (9): 121-125.
- [12] 陈 涛, 杜 江. 一种靶弹微波辐射源辅助控制系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (5): 66-68.
- [13] 唐国富, 邵宗舜. 飞航导弹雷达导引头 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1991.
- [14] 穆 虹. 防空导弹雷达导引头设计 [M], 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [15] 王 刚, 刘基睿, 杜 江. 基于数传电台的靶弹微波源辅助控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (8): 122-128.