

doi: 10.7690/bgzdh.2013.11.017

基于天幕立靶的两种弹着点坐标测量算法

冯斌, 武志超

(西安工业大学光电工程学院, 西安 710032)

摘要: 针对天幕立靶弹着点坐标的测量问题, 提出一种基于解析几何法的弹着点坐标测量算法。以天幕立靶为基础, 建立弹着点坐标系, 分别利用几何三角法和解析几何法推导简单双“N”形天幕立靶弹着点坐标测量公式, 并给出了计算实例。分析结果证明: 2种方法中, 几何三角法适用于比较简单规则的双“N”形光幕, 而解析几何法容易编制程序, 适应于各种幕形。

关键词: 天幕立靶; 光幕; 弹着点坐标; 测量算法

中图分类号: TJ013.2 **文献标志码:** A

Two Measuring Algorithms for Projectiles Impact Point Coordinates Based on Sky Screens Vertical Target

Feng Bin, Wu Zhichao

(School of Photoelectrical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032 China)

Abstract: According to the problem of the projectiles coordinates measurement, presents an algorithm with use of the analytic geometry theories. The measuring coordinate system was established in sky screens vertical target, and the derivative process of projectiles coordinates measuring formulas of simple double N-shape light screens was presented using triangulation and analytic geometry, and a computation example was given together. The analysis result shows that geometry triangles method is suitable to simple and regular dual N-shape light screens, and analytic geometry method is easy for compiling program and is suitable for varied screen shape.

Key words: sky screens vertical target; light screens; projectiles impact point coordinates; measuring algorithms

0 引言

光电靶是用来自动测量弹着点坐标的主要装置^[1]。天幕立靶也是一种光电靶装置, 它利用自然光在空中形成具有一定几何关系的6个光幕, 当弹丸依次飞过6个光幕时, 采集设备记录下弹丸穿过6个光幕的时刻, 再配合光幕之间的几何参数, 求解出弹丸与预定光幕(即测试靶面)的交点坐标。目前对天幕立靶弹着点坐标测量算法的研究主要有2种方法: 解三角形法和解析几何法。解三角形法是通过求解弹道线与各个光幕之间形成的三角形, 从而得到弹着点坐标的求解公式, 目前有关天幕立靶的文献都采用该方法, 且在文中仅给出测量公式, 没有给出推导过程, 以至于无法判断其测量公式的正确性^[2-6]; 解析几何法是建立各个光幕面的空间平面方程, 与未知参数的弹道线方程联立, 通过求解联立方程组首先求出弹道线方程, 然后将弹道线方程与预定光幕面方程联立求出它们的交点坐标, 文献[7]采用该法研究了具有框架结构的六光幕结构立靶, 而天幕立靶的幕形结构与之不同。基于此, 笔者分别用解三角形法和解析几何法推导了天幕

立靶的坐标测量公式, 使其互相验证。

1 天幕立靶的幕形结构

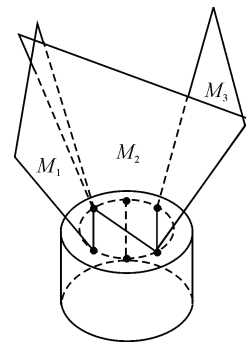


图1 单个天幕靶构建N形光幕

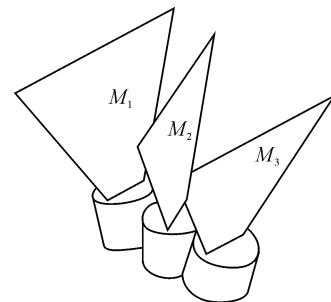


图2 多个天幕靶构建“N”形光幕

收稿日期: 2013-05-07; 修回日期: 2013-06-25

基金项目: 陕西省教育厅项目“中远程运动目标高精度激光测距关键技术研究”(12JK0988)

作者简介: 冯斌(1977—), 男, 河南人, 博士, 讲师, 从事靶场测试技术, 传感测试技术, 光机系统设计研究。

天幕立靶是以天幕靶为基础进行设计的,为了在空中形成多个具有特定几何关系的光幕,可以用单个镜头配以“N”形光缝板形成,如图 1 所示;也可以用 3 个天幕靶以一定的几何关系布置形成,如图 2 所示,其中 M_1 、 M_2 、 M_3 是 3 个光幕。将 2 台相同的“N”形天幕立靶以一定的靶距分开布置,便可用于武器系统的立靶精度测试。为了便于分析,以具有规则几何关系的“N”形结构为例进行了 2 种测量算法的比较,这里的规则几何关系是指用水平面在任一高度截取 2 个“N”形光幕时,与 M_1 和 M_3 所得交线平行。

2 基于解三角形法的弹着点坐标测量算法

从图 1 和图 2 可以看出,“N”形光幕的 3 个探测光幕在空间彼此相交,必定有 1 个公共交点,以该交点为坐标原点建立如图 3 所示的坐标系,其中 Z 轴垂直于探测光幕 M_1 和 M_3 在水平面 XOZ 上的投影,弹丸速度矢量为 V ,其在 3 个坐标轴上的分量为: V_x 、 V_y 、 V_z 。弹道线的俯仰角为 γ ,方位角为 φ 。将 2 个距离为 S 布置的“N”形光幕阵列投影到 YOZ 平面上,如图 4 所示。图中 A 点为弹丸与第 1 个光幕的交点,穿过该光幕的时刻为 t_1 ,令 $t_1=0$ 并设其坐标为 $A(x_1, y_1, z_1)$ 。 t_3 、 t_4 、 t_6 为弹丸穿过相应光幕的时刻。角度 β 是光幕 M_1 和 M_3 与平面 XOY 之间的夹角, S 称为靶距,它们是光幕阵列的结构参数,为已知量。

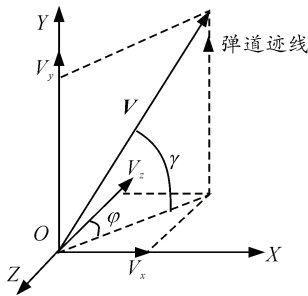


图 3 测量坐标系及弹丸速度矢量

从图 4 中可以看出,由于 $\triangle AMB \sim \triangle BND$, 可以得到如下关系:

$$\frac{AM}{BN} = \frac{t_3 - t_1}{t_6 - t_3} = \frac{t_3}{t_6 - t_3} \Rightarrow \overline{AM} = \frac{S \cdot t_3}{t_6 - t_3} \quad (1)$$

在 $\triangle AO_1M$ 中, $\tan \beta = \frac{\overline{AM}/2}{\overline{AF}}$, 而 $y_1 = \overline{AF} = \frac{\overline{AM}/2}{\tan \beta}$,

将式 (1) 代入得到:

$$y_1 = \frac{S \cdot t_3}{2 \tan \beta (t_6 - t_3)} \quad (2)$$

在 $\triangle AFO_1$ 中, $\tan \beta = \frac{\overline{FO_1}}{\overline{AF}}$, 而 $y_1 = \overline{AF}$, $z_1 = \overline{FO_1}$,

所以

$$z_1 = y_1 \cdot \tan \beta = \frac{S \cdot t_3}{2(t_6 - t_3)} \quad (3)$$

为求 A 点在 X 轴上的坐标,需将双“N”形光幕投影在平面 XOZ 上,首先用平行于平面 XOZ ,且过 A 点的平面截取双“N”形光幕中的各个光幕平面,然后投影到 XOZ 平面上,得到如图 5 所示的图形。图中 α 是光幕 M_2 和 M_5 与平面 XOY 的夹角,且光幕 M_2 和 M_5 垂直于平面 XOZ 。

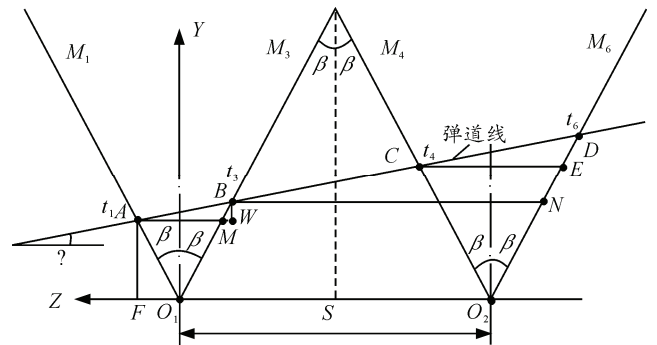


图 4 双“N”形光幕在平面 YOZ 上的投影

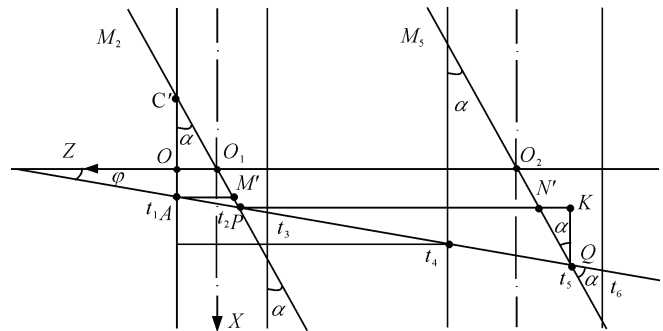


图 5 双“N”形光幕在平面 XOZ 上的投影

从图 5 可以看出 $\triangle AM'P \sim \triangle PN'Q$, 由此可得

$$\frac{\overline{AM'}}{\overline{PN'}} = \frac{t_2}{t_5 - t_2} \Rightarrow \overline{AM'} = \frac{t_2 \cdot S}{t_5 - t_2} \quad (4)$$

在直角 $\triangle C'AM'$ 中, $\tan \alpha = \frac{\overline{AM'}}{\overline{C'A}}$, 而

$$\overline{C'A} = \frac{\overline{AM'}}{\tan \alpha} = \frac{t_2 \cdot S}{(t_5 - t_2) \tan \alpha} \quad (5)$$

在直角 $\triangle C'OO_1$ 中, $\overline{OO'} = |z| = \frac{S \cdot t_3}{2(t_6 - t_2)}$,

$\tan \alpha = \frac{\overline{OO'}}{\overline{C'A}}$, 从而有

$$\overline{C'O} = \frac{\overline{OO'}}{\tan \alpha} = \frac{S \cdot t_3}{2(t_6 - t_3) \tan \alpha} \quad (6)$$

A 点的 X 轴坐标为: $x_1 = |\overline{OA}| = |\overline{C'A}| - |\overline{C'O}|$, 将

式 (5) 和式 (6) 代入得到：

$$x_1 = \frac{S}{\tan \alpha} \left(-\frac{t_2}{t_5 - t_2} - \frac{t_3}{2(t_6 - t_3)} \right) \quad (7)$$

参看图 3，当求出弹丸速度在各个坐标轴上的分速度时 (V_x, V_y, V_z)，便可以求出弹丸的速度和弹道线的仰角和方位角。

参看图 4，由于 $\triangle AMB \sim \triangle CED$ ，所以有

$$\frac{\overline{AM}}{\overline{CE}} = \frac{t_3}{t_6 - t_4} \quad (8)$$

$$\text{而 } \overline{AM} = \frac{t_3}{t_6 - t_4} \cdot S \quad (9)$$

$$\text{又 } \tan \beta = \frac{\overline{CE}/2}{y + t_4 \cdot V_y} \Rightarrow \overline{CE} = 2(y + t_4 \cdot V_y) \tan \beta \quad (10)$$

将式 (9)、式 (10) 代入式 (8)，并化简可得：

$$V_y = \frac{(t_6 - t_4 - t_3)S}{2(t_6 - t_3)t_4 \tan \beta} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \tan \varphi = \frac{\overline{KQ}}{\overline{PK}} \\ \overline{KQ} = (t_5 - t_2) \cdot V_x \\ \overline{PK} = \overline{MN'} + \overline{N'K} = S + \overline{N'K} \\ \tan \alpha = \frac{\overline{N'K}}{\overline{KQ}} \end{cases} \Rightarrow \frac{(t_5 - t_2) \cdot V_x}{S + (t_5 - t_2) \cdot V_x \cdot \tan \alpha} = \tan \varphi = \frac{V_x}{V_z} \quad (14)$$

将式 (14) 进行化简，并代入 V_z 可得：

$$V_x = \frac{S}{2 \tan \alpha} \left(\frac{t_5 - 2t_4 - t_2}{t_4(t_5 - t_2)} + \frac{1}{t_6 - t_3} \right) \quad (15)$$

以上是用解三角形的方法推导得到的双“N”形光幕阵列的测量公式。从推导过程可以看出，该方法是建立在阵列中各个光幕平面之间具有严格平行的几何关系基础之上的，但在实际工程实现中，很难保证各个光幕平面之间的几何关系，若再出现多光幕拼接、测试区域交叉等情形，将很难用解三角形法得到测量算法。

3 基于解析几何法的弹着点坐标测量算法

解析几何法是一种将几何问题转化为代数问题的方法，把双“N”形光幕阵列看成是一个空间几何模型，阵列中的各个探测光幕相当于分布在一固定坐标系下的空间几何平面，而弹道线则相当于一条空间直线。求解弹丸在预定靶面上的弹着点坐标就相当于求解空间直线与多个空间平面相交的交点坐标，为此应首先确定代表各个探测光幕的空间平面方程，以及弹道线的空间直线方程，并将它们联立构成代数方程组，进而转化为代数问题，以下给出

参看图 4 中的 $\triangle AWB$ ， $\overline{AW} = t_3 \cdot V_z$ ，而

$$\overline{AW} = \overline{AM} + \overline{MW}$$

又 $\tan \beta = \frac{\overline{MW}}{V_y \cdot t_3} \Rightarrow \overline{MW} = V_y \cdot t_3 \cdot \tan \beta$ ，所以有

$$V_z \cdot t_3 = \frac{t_3 \cdot S}{t_6 - t_3} + V_y \cdot t_3 \cdot \tan \beta \quad (12)$$

求解式 (12)，并代入 V_y 后可得：

$$V_z = \frac{S(t_6 + t_4 - t_3)}{2t_4(t_6 - t_3)} \quad (13)$$

V_z 的方向与 Z 轴的方向相反，应为负值，上式没有给出 V_z 的符号。

方位角 φ 有如下关系， $\tan \varphi = \frac{V_x}{|V_z|}$ ，所以

$V_x = |V_z| \cdot \tan \varphi$ ，只有求出 $\tan \varphi$ 就可以得到 V_x 。

参看图 5，在 $\triangle PKQ$ 中，可以得到如下关系式：

双“N”形光幕阵列的求解过程。

首先建立图 4 和图 5 中光幕 $M_1 \sim M_6$ 的空间平面方程，由于双“N”形光幕阵列中的各个探测光幕平面是无限延伸的，适合于建立点法式的平面方程。仍以第 1 个“N”形光幕阵列中 3 个探测光幕的交点为坐标原点，可得到如下的光幕平面方程：

$$\begin{cases} M_1 : [0 \quad -\sin \beta \quad \cos \beta] \cdot [x \quad y \quad z]' = 0 \\ M_2 : [\sin \alpha \quad 0 \quad \cos \alpha] \cdot [x \quad y \quad z]' = 0 \\ M_3 : [0 \quad \sin \beta \quad \cos \beta] \cdot [x \quad y \quad z]' = 0 \\ M_4 : [0 \quad \sin \beta \quad -\cos \beta] \cdot [x \quad y \quad z + S]' = 0 \\ M_5 : [\sin \alpha \quad 0 \quad \cos \alpha] \cdot [x \quad y \quad z + S]' = 0 \\ M_6 : [0 \quad \sin \beta \quad \cos \beta] \cdot [x \quad y \quad z + S]' = 0 \end{cases} \quad (16)$$

弹道线与第 1 个光幕的交点坐标为 $A(x_1, y_1, z_1)$ ， $t_i (i=1, \dots, 6)$ 是弹丸穿过各个光幕的时刻，其中 $t_1 = 0$ ，则与第 2 个光幕的交点坐标为： $(x_1 + V_x t_2, y_1 + V_y t_2, z_1 + V_z t_2)$ ，以此类推可以得到弹道线与其他光幕平面的交点坐标，将它们分别代入式 (16) 的各光幕平面方程，并整理成矩阵形式可得：

$$\begin{bmatrix} 0 & -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \cdot t_2 & 0 & \cos \alpha \cdot t_2 \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta & 0 & \sin \beta \cdot t_3 & \cos \beta \cdot t_3 \\ 0 & \sin \beta & -\cos \beta & 0 & \sin \beta \cdot t_4 & -\cos \beta \cdot t_4 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \cdot t_5 & 0 & \cos \alpha \cdot t_5 \\ 0 & \sin \beta & 0 & 0 & \sin \beta \cdot t_6 & \cos \beta \cdot t_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ S \cdot \cos \beta \\ -S \cdot \cos \alpha \\ -S \cdot \cos \beta \end{bmatrix} \tag{17}$$

用 Matlab 可对式 (17) 进行数值求解, 也可以得到未知数的符号表达式, 与解三角形法得到公式相同, 验证了文中所给出的测量公式是正确的。从解析几何法的求解过程可知, 该方法不要求光幕阵列中各个光幕平面之间具有规则的几何关系, 当在使用中需要旋转光幕阵列时, 只要将系数矩阵乘以相应的旋转矩阵就可以得到旋转后的平面方程组。

4 计算实例

为了验证 2 种算法能否得到相同的结果, 将已知的参数赋值, 分别代入进行计算。令 $t_1=0; t_2=0.12; t_3=0.52; t_4=1.02; t_5=1.2; t_6=1.5; \alpha=25^\circ; \beta=18^\circ; S=5\ 000\ \text{mm}$ 。

几何三角法得到的结果为: $\varphi=0.118\ 6\ \text{rad}; \theta=1.224\ 3\ \text{rad}; x=1.245\ 9\text{e}3\ \text{mm}, y=8.223\ 0\text{e}3\ \text{mm}, z=2.671\ 8\text{e}3\ \text{mm}$ 。

用解析几何法得到的结果与几何三角法得到结果相同。

5 结论

由分析结果可知, 用几何三角法推导双“N”形光幕立靶的坐标测量公式, 推导过程繁琐, 容易

出错, 适合于比较简单、规则的双“N”形幕形结构。当对双“N”形光幕进行旋转、平移, 以及对多个“N”形光幕进行拼接, 形成更大测试区域的“N”天幕立靶时, 用几何三角法很难或无法得到坐标测量公式, 此时采用解析几何法就相对容易, 将求解过程编制成计算机程序, 可用于计算任意变形的双“N”形天幕立靶坐标。

参考文献:

[1] 舒砚. 光电自动报靶原理样机的设计与实现[J]. 兵工自动化, 2009, 28(8): 64-67.
 [2] 董华, 王铁岭, 倪晋平. 外弹道参数天幕立靶测量误差分析[J]. 光电工程, 2009, 36(9): 17-22.
 [3] 宋玉贵, 倪晋平, 王铁岭, 等. 多光幕交汇法测量目标飞行坐标的原理与精度分析[J]. 西安工业大学学报, 2007, 27(1): 19-23.
 [4] 董涛, 王铁岭. 四光幕交汇立靶改进系统[J]. 西安工业大学学报, 2005, 25(6): 522-525.
 [5] 倪晋平, 田会. 斜入射弹丸着靶位置立靶测试原理[J]. 光学技术, 2006, 32(4): 493-495.
 [6] 倪晋平, 杨雷, 田会. 基于大靶面光幕靶的两类六光幕阵列测量原理[J]. 光电工程, 2008, 35(2): 17-22.
 [7] 冯斌, 倪晋平, 杨雷. 六光幕结构立靶坐标测量原理[J]. 弹道学报, 2008, 20(1): 59-61.

(上接第 59 页)

3) 控制初始间隙大小, 使其恒小于筒体径向变形量。

4) 采用基于有限元分析的结构优化方法, 研究分析该密封结构材料和结构参数的最佳优化组合。

4 结束语

笔者针对某高压试验装置设计了一种新型增压自胀式密封结构, 并采用 ABAQUS 有限元软件对其进行仿真分析, 同时对该密封结构进行了优化改进方法的探讨。实验结果表明: 该新型密封结构能够满足高压试验装置的密封要求, 同时具有承压能力强, 耐高温性能好, 重复使用时间长的特点, 既克服了药筒密封抽筒困难、寿命短的缺点, 又弥补了闭气装置结构复杂、容易凹曲变形等方面的不足, 适用于需要频繁开闭的高压装置的密封。该结构的成功设计为火炮等高压设备和装置的密封问题提供

一种新的解决方案。

参考文献:

[1] 张讯, 张相炎. 新型组合式炮膛密封结构仿真研究[J]. 弹道学报, 2009, 21(1): 63-66.
 [2] 雒智林, 茹致贤, 卢婷, 等. 高膛压楔式炮闩闭气形式分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2006(2): 21-24.
 [3] 张讯, 张相炎. 新型组合式炮膛密封结构的接触有限元分析[J]. 润滑与密封, 2008, 33(11): 69-72.
 [4] 原瑞宏, 刘军卿, 董自卫, 等. 基于图像纹理特征的炮膛疵病检测方法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(1): 78-80.
 [5] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 151-159.
 [6] 蔡仁良, 顾伯勤, 宋鹏云. 过程装备密封技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 53-60.
 [7] 顾伯勤. 静密封设计技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004: 89-126.
 [8] 顾克秋, 杨军荣. 浮动炮闩闭气结构的强度和闭气性能分析[J]. 弹道学报, 2003, 15(1): 17-20.