

双三角阵声靶测试系统研究

冯 斌^{1,2†} 石秀华¹

(1 西北工业大学 航海学院 西安 710072)

(2 西安工业大学 光电学院 西安 710032)

摘要 声靶容易构成较大的测试靶面,常用在大口径弹药的立靶密集度测试中。为了消除声波在空气中传播速度变化对声靶测试精度的影响,采用双三角阵声阵列模型使测量公式中不再引入声波速度。为了使测试系统紧凑、可靠,整个测试系统由双三角阵列、多通道数据采集仪、计算机系统构成。对测试系统进行了实弹射击实验,在 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 靶面内,弹着点测量误差为 $\pm 10\text{ mm}$ 。

关键词 声靶,双三角阵,立靶密集度,弹着点

中图分类号: TJ012.3 O422

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2012)02-0140-05

Studies of acoustic target with two equilateral triangle arrays

FENG Bin^{1,2} SHI Xiuhua¹

(1 School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 School of Opto-electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032)

Abstract The acoustic target can form a larger test area easily, and it is commonly used to test the vertical target dispersion of projectiles with large caliber. The measurement precision of the acoustic target is affected by the velocity changes of the sound waves in the air. In order to avoid the influence of the speed of sound wave, a double-triangle array model is adopted in the measuring formulas, in which sound wave velocity is not needed. The whole test system is composed by double-triangular arrays, a multi-channel data acquisition instrument, and a PC. And the structure of the test system is compact and reliable. The test precision is verified by the real firing. If the area of the target is within $2\text{ m}\times 2\text{ m}$, the errors from the impacting points to the projectile is about $\pm 10\text{ mm}$.

Key words Acoustic target, Two equilateral triangle array, Vertical target dispersion, The impacting points of the projectile

1 引言

立靶密集度试验是身管类武器(步枪、火炮等)研制过程中的必测项目^[1],目前我国大多数靶场仍采用人工报靶的方法(该方法危险、精度

低),特别是在大口径身管武器的立靶密集度测试中。声靶是较早应用于靶场测试中的自动化报靶装置^[2-3],早期的测量模型中将声速作为一个常数代入测量公式进行弹着点坐标的计算,但在实际中声速并非常数,它随空气的温度、湿度而

2011-09-13 收稿; 2012-01-18 定稿

作者简介: 冯斌 (1977-), 男, 河南荥阳人, 西安工业大学讲师, 博士研究生, 研究方向: 靶场测试技术。

石秀华 (1945-), 女, 教授, 博士生导师。

[†] 通讯作者: 冯斌, E-mail: fengbin98@126.com

变化^[4]。另外, 早期的激波探测传感技术、信号采集处理技术都存在不足, 故国内并没有成熟的声靶设备。国外 MS Instruments PLC 公司、HPI 公司已推出一系列声靶设备, 如 B541, B590, B590-2 等型号。国内的某单位靶场曾购买过 B541 型声靶 (精度指标为: 20m×20m 靶面, 误差为±20mm), 实际的测试效果没有达到预期的指标, 但近年来该类声靶已对我国禁止出口。目前还没有检索到关于国外声靶设备的详细文献资料。

文中采用小量程高频动态压力传感器来探测弹丸超声速飞行时产生的激波, 并用六个传感器构成双三角阵列测量模型, 该测量模型不需要代入声速进行计算^[5-6]。测试系统采用数据采集设备采集传感器阵列输出的信号, 将传感器输出的模拟信号变成数字信号, 通过相应的数字信号处理算法提取激波到达各个传感器的时间差, 从而提高整个测试系统的精度。

2 测量模型及算法

双三角阵声靶包含两个等边三角形声探测阵列, 激波探测传感器固定在每个等边三角形结构的顶点, 测量模型示意图如图 1 所示。图中

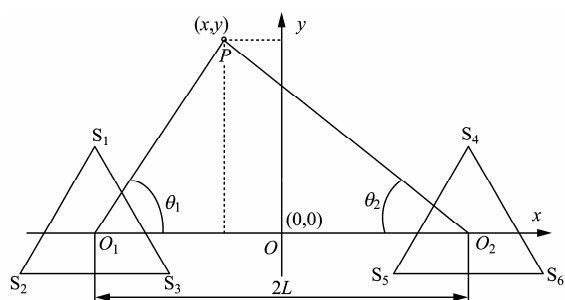


图 1 双三角阵声靶测量模型

$S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ 为 6 个传声器, 它们被固定在三角形的顶点, 且使其处于同一垂直平面内。 O_1, O_2 为两个等边三角形的中心。 P 为弹丸在预定靶面的弹着点, PO_1, PO_2 与 x 轴的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 。

设 O_1 和 O_2 之间的距离为 $2L$, 且 O_1, O_2 关于 y 轴对称。通过解三角形 PO_1O_2 可以得到:

$$x = \frac{L(\tan \theta_2 - \tan \theta_1)}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}, \quad (1)$$

$$y = \frac{2L \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}. \quad (2)$$

从式(1)和式(2)可以看出, 只要求出 $\tan \theta_1$ 和 $\tan \theta_2$ 就可以得到弹着点的坐标。在设计三角阵尺寸时, 使其尺寸远小于弹着点到阵列的距离 (约 10 倍数量级), 所以从弹着点 P 发出的激波传播到接收阵列时, 可以将圆弧形的激波波前近似为平面波前, 在根据等边三角阵的几何关系便可得到 $\tan \theta$ 的数值。

如图 2 所示, 图中等边三角形 ABC 代表双三角阵中的一个, 设其边长为 d , 激波波前的

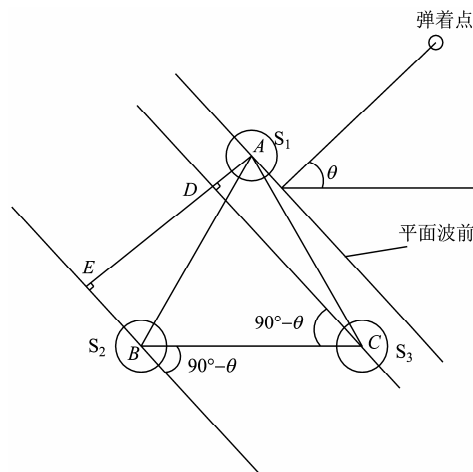


图 2 $\tan \theta$ 的求解示意图

法线与水平线的夹角为 θ 。设激波由弹着点传到传感器 S_1 和传到传感器 S_3 所用的时间差为 t_1 , 到达传感器 S_1 和到达传感器 S_2 的时间差为 t_2 。在另一个三角阵中, t_3 为激波到达传感器 S_4 和到达 S_5 的时间差, t_4 为激波到达传感器 S_4 和到达 S_6 的时间差。依据声波传播原理可知,

$$t_1 = \frac{\overline{AD}}{V_e}, \quad t_2 = \frac{\overline{AE}}{V_e}. \quad (3)$$

在直角三角形 ADC 中,

$$\begin{aligned} \overline{AD} &= d \cdot \sin \angle ACD = d \cdot \sin(\theta - 30^\circ) \\ &= \frac{1}{2}(\sqrt{3} \sin \theta - \cos \theta). \end{aligned} \quad (4)$$

在三角形 AEB 中,

$$\begin{aligned}\overline{AE} &= d \cdot \sin \angle ABE = d \cdot \sin(30^\circ + \theta) \\ &= \frac{1}{2}(\sqrt{3} \sin \theta + \cos \theta).\end{aligned}\quad (5)$$

由式(1)和(2)可得:

$$\begin{aligned}\frac{t_1}{t_2} &= \frac{\overline{AD}}{\overline{AE}} = \frac{\sqrt{3} \sin \theta - \cos \theta}{\sqrt{3} \sin \theta + \cos \theta} \Rightarrow \\ \tan \theta &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{t_2 + t_1}{t_2 - t_1}. \quad (\text{此处 } \theta \text{ 为 } \theta_1)\end{aligned}\quad (6)$$

同理可得另一个三角阵中:

$$\tan \theta_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{t_3 + t_4}{t_4 - t_3}.\quad (7)$$

从式(6)和式(7)可以看出,只需测量出时间差,不需要代入声速参数便可求出 $\tan \theta_1$, $\tan \theta_2$ 的数值,代入式(1)和式(2)便可求出弹着点的坐标。

3 测量系统的实现

3.1 测量系统总体构成

整个测量系统由处于同一垂直平面内的两个等边三角形探测阵列、一台数据采集仪,以及相应的供电、显示设备组成,系统组成框图如图3所示。三角形探测阵列用来探测弹丸超音速飞行时产生的激波,并将其转换成电信号。由于弹丸产生的激波非常微弱,信号调理单元的任务就是将其进行放大、滤波,转换成可以与数据采集仪相匹配的输入信号。探测阵列输出的模拟信号

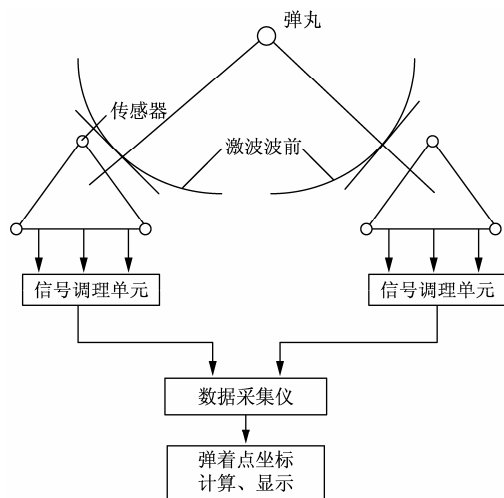


图3 系统组成框图

经信号调理、数据采集后变成相应的数字信号,利用数字信号处理算法求取各路信号之间的时间差,将其代入测量公式进行弹着点坐标计算,并送入显示设备进行显示。

3.2 弹丸激波压力传感器

激波压力传感器是声靶设备中非常关键的传感部件,只有声靶的传感器阵列可靠的捕捉到弹丸超声速飞行时产生的激波信号,才能利用这些信号来分析计算弹丸飞过预定靶面的坐标。国外的声靶装置中采用的是具有半球形圆顶的压电传感器,目前市场上无法买到类似的传感器。经过对测试原理的深入分析和弹丸激波压力的理论近似计算,我们发现影响激波压力传感器输出信号大小的因素有:弹丸的口径、飞行速度以及弹丸飞过传感器的距离等,因此弹丸激波压力传感器的输出信号的幅值范围较宽,最低可以小于 100 Pa,最大在 3000 Pa,以至更大。另外弹丸激波压力信号上升时间很短(微秒级),这就对传感器的性能以及后续信号的处理提出了较高的要求。

经过调研和测试试验我们选择了国产的高频动态激波压力传感器,以下是所选用的弹丸激波压力传感器的主要参数:(1)转换原理:压电转换;(2)固有频率: $\geq 200\text{kHz}$; (3)上升时间: $\leq 2\mu\text{s}$; (4)量程范围: 0.05~100kPa; (5)灵敏度: 13pC/kPa; (6)敏感面尺寸: $\phi 7.5\text{mm}$; (7)非线性: $\leq 0.5\%$; (8)工作温度: $-25\sim 80^\circ\text{C}$; (9)抗冲击性: 2000 g。图4是采用该传感器采集的弹丸激波信号波形,弹丸口径 12.7 mm,飞行速度 780m/s,传感器距离弹道的垂直距离为 2.5 m。

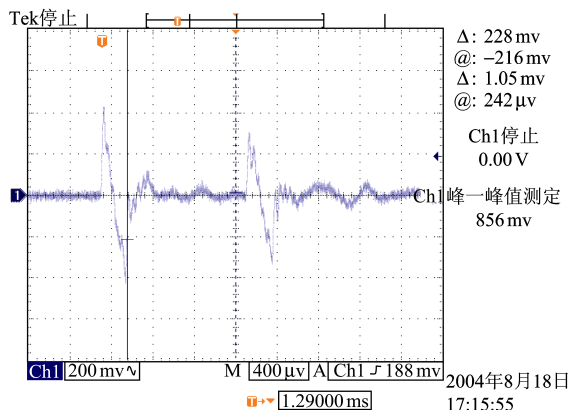


图4 传感器输出的弹丸激波波形

3.3 数据采集系统

数据采集系统采用两块 PCI9812 数据采集卡和工控计算机组成,该采集卡的采样率为 1M,所以测时精度可以达到 1 个微秒。将声靶传感器阵列中的六个传感器接入数据采集仪,当超声速飞行弹丸飞过预定靶面时,数据采集仪采集到六路传感器的输出信号,如图 5 所示。通过数字信号处理算法找到各个传感器输出的激波波形特征点,并计算出各个特征点之间的时间差,再根据传感器阵列的结构参数和前面推导的坐标计算公式便可以计算出弹丸穿过预定靶面的位置坐标。

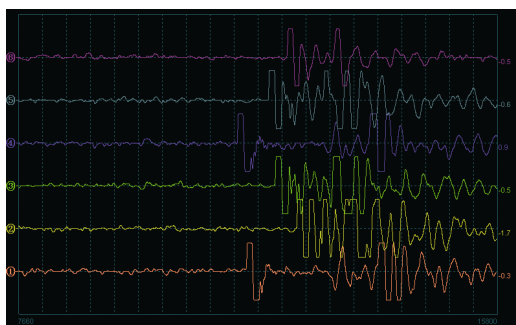


图5 采集到的六路弹丸激波形

4 试验及结果分析

弹丸超声速飞行时才能产生弹道激波,为了验证系统的测试性能,必须对测试系统进行实弹射击试验。图 6 是系统试验方案示意图,用 7.62 mm 步枪弹对声靶进行射击,枪口距离测试靶面为 30 m,弹道高度为 2.5 m,弹丸过靶速度大于 700 m/s。在声靶后面 1 m 处放置一木板靶,并在上面粘贴坐标纸,用以记录弹丸过靶时的弹孔位置,同声靶测量的坐标值进行比对。天幕靶放置在声靶前方 0.3 m 处,用于触发数据采集仪。

在 2 m×2 m 的靶面内进行了 30 发的实弹射击试验,将声靶计算出的弹着点坐标值与木板靶上测得的相应弹孔坐标值进行相减,分别得到弹着点坐标 x , y 的差值,最大差值为 10 mm。离差值由差值减去 x , y 平均差值得到^[7],并由此计算得到 x , y 坐标的标准差为: $\sigma_x = 6.3$, $\sigma_y = 5.8$ 。

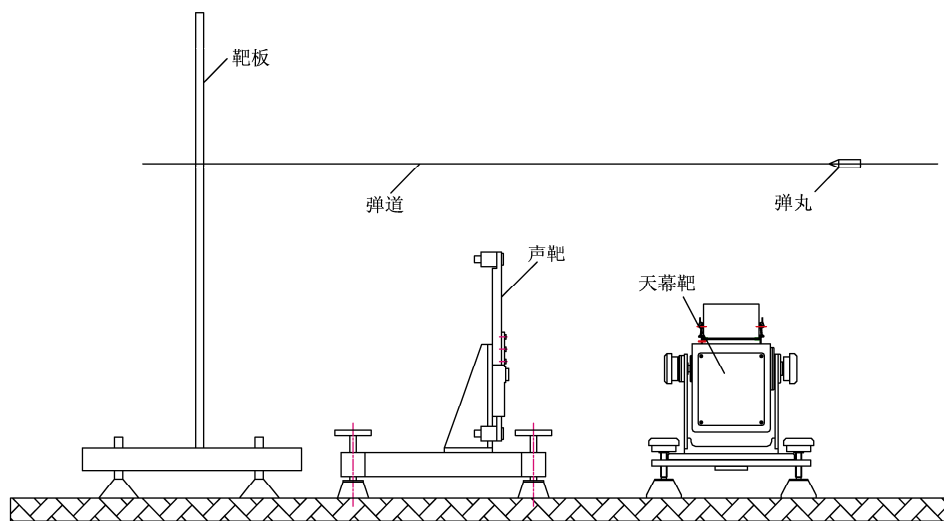


图6 系统试验方案

从试验得到的结果来看,本文所设计的声靶测试系统已具有较高的测试精度,但不会超过光电坐标靶的测试精度(2 m×2 m 靶面,坐标差值小于 5 mm),因为两类靶具有不同的测试原理,且两者的适用场合也不相同。声靶具有测试靶面

大(可以任意测试靶面),可全天候工作等优点,特别适合于大口径火炮或超高速弹药的野外测试,而光电坐标靶很难构成较大的测试靶面,且大多数光电靶具有结构框架,容易被弹丸击穿,防护较为困难。

本文中所采用的方法不需要将局部声速值代入坐标计算公式,消除了声速变化对测试精度的影响,从试验结果来看其测试精度也远高于传统的声靶装置^[9-10]。该方法的局限性是仍要求弹丸垂直入射靶面,测试时应尽量避免大风的天气状况,因为风速会改变声波的传播路径。因此要提高该声靶系统的测试精度,应尽量加大声靶离枪炮口的距离,一般弹丸密集度测试都要求距离枪炮口 200m 左右,可以降低弹丸过于倾斜入射靶面的几率,另外应尽量在微风或无风的天气状况下使用。

5 结论

本文根据双三角阵测量模型设计了相应的声靶测试系统,将传感器阵列输出的模拟信号采集到数据采集仪中,通过相应软件计算出弹着点坐标。通过实弹射击试验,该测试系统能可靠工作,在 2m×2m 的测试靶面内,获得了 $\sigma_x = 6.3$, $\sigma_y = 5.8$ 的测试精度,弹着点的绝对误差小于 $\pm 10\text{mm}$,远小于文献^[9-10]中所述测试系统的误

差(大于 100mm)。弹丸未能垂直入射靶面^[8],传感器阵列的结构参数误差,以及环境因素都可能引起测试系统的测量误差。

参 考 文 献

- [1] 王昌明. 实用弹道学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994: 248-251.
- [2] 肖峰, 李惠昌. 声武器和测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 20-22.
- [3] 郭昌建, 吴晓琴, 张林. 基于声定位的自动报靶系统的研究与设计[J]. 合肥学院学报, 2011, 21(2): 32-35.
- [4] 陆文骏, 童利标, 郑锴. 声学精度靶工作原理及其误差分析[J]. 声学及电子工程, 2007(3): 19-21.
- [5] 李宗贤, 于雪媛. 一种用于测量弹丸激波的传感器[J]. 传感器技术, 2003, 22(7): 30-32.
- [6] BRIAN D M, BERNARD J R. Position measuring apparatus and method[P]. America: US4885725, 1989.
- [7] 丁振良. 误差理论与数据处理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 50-58.
- [8] 吴松林, 林晓东, 宋波. 斜入射时声靶的时延偏差及修正方法[J]. 探测与控制学报, 2008, 30(5): 73-76.
- [9] 蒋东东, 狄长安. 八点线式声学立靶弹着点检测系统研究[J]. 电子测量技术, 2010, 33(4): 19-21.
- [10] 顾晓辉, 王晓鸣. 用双直角三角形阵对声目标定位的研究[J]. 声学技术, 2003, 22(1): 44-47.