

超声速弹丸着靶时刻声学测试方法

王玉龙, 苏磊, 卢小汐, 刘艳红, 张春彤

(中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200)

摘要: 针对超声速弹丸终点弹道着靶时刻测试问题, 研究了声学传感器测试机理, 建立了声波延迟触发模型, 开发了一套着靶时刻测试系统; 采用传感器阵列采集超声速弹丸激波到达不同传感器的时间差, 建立了测量超声速弹丸着靶时刻的数学模型, 该模型包含了传感器坐标、时间差和弹丸着靶时刻; 针对直线形传感器布阵, 基于高斯-牛顿法对定位模型进行解算, 分析了高斯-牛顿法的迭代公式、收敛性和适定性等; 通过计算机仿真分析了误差大小和传感器数目对误差的影响; 通过模拟试验数据计算表明, 声学测试结果与实际结果一致, 测试精度优于 0.8 ms; 该方法应用在某型高炮试验任务中, 成功测试了弹丸着靶时刻。

关键词: 声学; 着靶时刻; Gauss-Newton 法; 收敛性; 声定位

A Calculation Method for Projectile Arriving Time Based on Gauss-Newton Method

Wang Yulong, Su Lei, Lu Xiaoxi, Liu Yanhong, Zhang Chunlong

(Huayin Ordnance Test Center, Huayin 714200, China)

Abstract: For testing the hitting time of supersonic projectile, the sensor array is used to collect the time difference of its shock wave reaching different sensors, and the mathematical model for measuring the hitting time is established. The iterative formulation, convergence and well-posedness of the Gauss-Newton method was analyzed for linear microphone array. The calculation results are consistent with experimental results, which proves the correctness of the method. The influence of sensor numbers on the error was analyzed by numerical simulation. The simulation results show that: 1) When the position error of the sensor is 1mm and when the time error is 5 μ s, the arriving time error is less than 0.8 ms; 2) The sensor number has small effect on the arriving time error.

Keywords: acoustics; arriving time; Gauss-Newton method; convergence; acoustic location

0 引言

在现代武器试验靶场中, 突防类和压制类等直射武器的弹药定型试验任务中, 弹丸立靶飞行时间测试是计算弹道一致性和直射距离的一项关键参数, 也是靶、弹遭遇段参数测试的一项重要内容, 立靶飞行时间将直接影响武器作战的毁伤效应结果。立靶飞行时间主要是指弹丸到达给定着靶点处的时刻减去弹丸出炮口的时刻。其中, 弹丸出炮口时刻可以通过炮口线方法、光学方法或雷达方法获得。立靶飞行时间测试的难点在于弹丸的着靶时刻, 也就是弹丸到达给定着靶点处的时刻。本文主要研究超声速弹丸着靶时刻的测试方法及系统。目前, 靶场中进行立靶飞行时间测试主要采用天幕靶、高速录像或雷达等系统完成。天幕靶系统在测试中采用天空为背景, 当弹丸飞过天幕靶的视场时会遮挡天空背景, 使得天幕靶接收到的光通量发生变化, 从而触发天幕靶并测量弹丸着靶时刻。但在实际应用中发现, 天幕靶系统对自然

环境因素的要求较高, 背景复杂时很容易受到外物干扰, 且当大雾等天空能见度较低时难以测试, 影响试验效率。高速录像设备需要高帧频的摄像机, 再配合时统设备, 才能完成立靶飞行时间测试。高速录像通过记录弹丸的穿靶过程来实现测量, 针对不同的测试需求要设定不同的采样频率, 操作繁琐, 并且一般需要人工判读弹丸的过靶时刻, 影响系统的测试精度和稳定性。雷达技术主要是通过弹道外推实现弹丸的立靶飞行时间测试, 在近地面测试中由于地面环境复杂, 干扰信号多, 导致其靶场测试精度较低。另外, 现有的天幕靶和高速录像设备都多在地面布站, 难以完成空中吊靶的飞行时间测试。

基于声学原理的着靶坐标测试技术已相当成熟, 该技术已成功应用于立靶坐标测试设备^[1-4], 基于声学原理的炸点定位技术也得到了长足的发展。但基于声学原理的立靶飞行时间测试研究还处于起步阶段, 目前还无法测量弹丸着靶时刻。现有立靶飞行时间测试存在着一定的薄弱环节, 因此, 开展基于声学原理的立靶飞行时间测试具有十分重要的意义。

声学靶是基于超声速弹丸飞行产生的激波进行定位, 其触发时刻(取为首先触发传感器对应的时刻)与弹丸着靶时刻相差很大, 不能将声学靶的触发时刻近似为弹丸着靶时刻。实际上, 弹丸着靶时刻等于传感器触发时刻减去激波在靶面上传播至首先触发传感器的时间(记为 t_0)。因

收稿日期: 2019-05-09; 修回日期: 2019-09-16。

基金项目: 试验技术研究重点项目(1700010134); 试验技术研究一般项目(2014SY32B6012)。

作者简介: 王玉龙(1981-), 男, 陕西华阴人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事终点弹道测试与数据信息处理。

通讯作者: 王玉龙(1981-), 男, 陕西华阴人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事 方向的研究。

此, 弹丸着靶时刻的确定归结为如何计算 t_0 。

本文通过对声学靶测量原理的分析, 开发了一套声学测试系统, 建立了确定 t_0 的数学模型, 进而用 Gauss-Newton 法^[5-6]求解该模型, 并详细分析了解的存在唯一性、迭代公式和适定性等。

1 测试系统组成

基于声学原理的弹丸着靶时刻测试方法, 就是利用超声速飞行弹丸产生的附体激波触发声传感器来提供弹丸的着靶时刻, 然后结合声学靶数据对其进行时延修正。

本文用于测试超声速弹丸着靶时刻的探测系统主要由声学靶测量分系统和激波触发时间记录分系统两部分组成。其中, 声学靶测试分系统用于测试弹丸的弹着点坐标和着靶时刻, 激波触发时间记录分系统记录弹丸激波传到声传感器时对应的 GPS 时间数据。声学靶测试分系统的工作原理如下: 在声学靶布置了若干个声学传感器, 在超声速弹丸飞过声学靶测试分系统的过程中, 弹丸激波依次扫过声传感器, 进而触发传感器。不同传感器测量的时间差不同, 并且弹着点不同时, 传感器测量的时间差也不同。声学靶测试分系统根据传感器的位置及测量的时间差建立定位模型, 在求解该模型即可得到弹丸的弹着点坐标及相对着靶时刻, 再结合激波触发时间记录系统即可得到绝对着靶时刻。下面介绍激波触发时间记录系统, 其原理如图 1 所示。其主要包含三部分, 第一部分是激波信号的采集与调理, 包括声学传感器和线号调理电路, 用于实现对激波信号的采集滤波放大存储等功能; 第二部分是激波到达时间记录模块, 该模块将 GPS 绝对时间与传感器采集时间进行对应, 使得传感器采集的时间就是 GPS 绝对时间; 第三部分是数据信号的无线传输和远程控制, 采用无线网桥将采集的激波信号及 GPS 时间实时传输到上位机, 并接收上位机的控制指令。

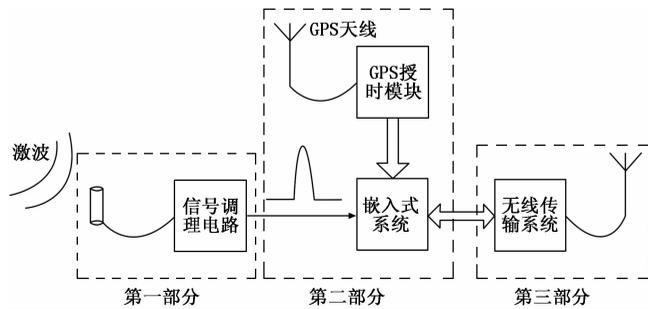


图 1 激波触发时刻记录系统原理图

该时间记录分系统能够实现 GPS 同步、数传和无线远程控制功能。当声传感器接收到激波信号触发时, 能够采集触发信号的 GPS 时间, 然后通过无线数传模块传输到上位机计算机, 实现采集触发事件的 GPS 时刻。

2 着靶时刻定位模型

在建立着靶时刻定位模型时, 首先建立声学靶测量系统的测量坐标系。取 xoz 平面为水平面, z 轴指向炮口方

向, 传感器布置在 x 轴上, xoy 平面为竖直平面, xoy 平面即为虚拟靶平面, 也就是说超声速弹丸从 xoy 平面飞过, 如图 2 所示。

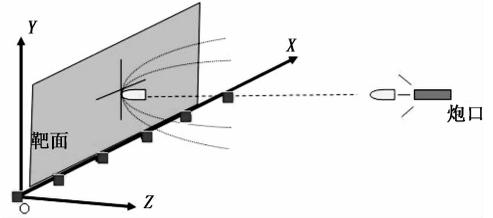


图 2 立靶坐标系示意图

在着靶探测系统中, 超声速飞行弹丸产生的附体激波在穿过声传感器阵平面时启动声传感器, 当声传感器接收到激波信号触发 GPS 授时仪记录下 GPS 时刻 T 时, 但这个时刻 T 不是弹丸着靶时的终止时间, 这是因为声传感器收到的激波信号脉冲是从弹道上某一点传过来, 需要一定的走时延迟, 必须将延迟时间计算出来并进行处理, 才能得到弹丸的着靶时刻。弹丸穿靶过程如图 3 所示。当弹丸着靶时, 如图 3 中的位置 1, 超声速弹丸飞行产生的激波形成近似圆锥形, 也就是说激波相比于弹丸要存在一定的滞后性, 此时激波还没有传到声传感器。当声传感器收到激波信号时, 弹丸已经飞到如图 3 中的位置 2, 此时弹丸已经飞过靶面, 因此需对“弹丸的着靶时刻”与“声传感器的触发时刻”之间的 ΔT 进行修正解算。

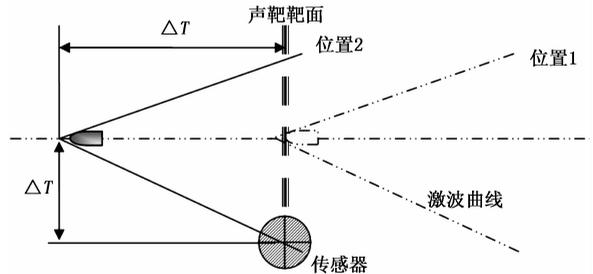


图 3 弹丸穿靶过程示意图

下面, 建立具体的解算方程。设弹丸垂直虚拟靶平面入射, 传感器坐标为 $(x_i, y_i, 0), i = 1, 2, \dots, n$, 其中 n 为传感器个数, 着靶点坐标为 $(x, y, 0)$ 。如图 4 所示, 在靶平面上观察的激波是以着靶点为圆心向外扩散的圆环, 圆环向外扩散的速度呈现由快变慢的趋势, 最后趋于某一速度 v_0 (也叫视速度), 本文取视速度为定值。

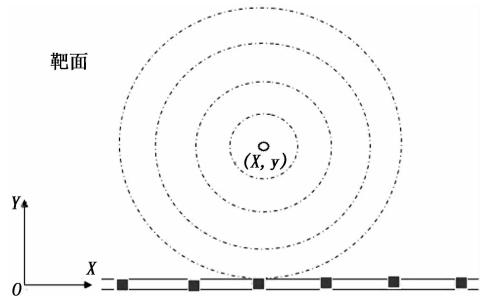


图 4 传播示意图声传感器布阵及视速度传播示意图

计算分析和实验表明, 风对定位精度的影响不可忽略。假定风平行地面运动, 且在弹丸着靶时刻靶面周围的局部风场是均匀的。因为风在 z 方向的分量 v_z 影响较小, 所以主要考虑风在 x 方向的分量 v_x 。利用矢量叠加原理可得到此时的基本方程组如下^[7-10]:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x - v_x(t_0 + t_1))^2 + (y_1 - y)^2} = v_0(t_0 + t_1) \\ \sqrt{(x_2 - x - v_x(t_0 + t_2))^2 + (y_2 - y)^2} = v_0(t_0 + t_2) \\ \vdots \\ \sqrt{(x_n - x - v_x(t_0 + t_n))^2 + (y_n - y)^2} = v_0(t_0 + t_n) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $t_i, i = 1, 2, \dots, n$ 是激波到达各个传感器的相对时间 (即时延), t_0 是激波视速度在靶面上传播至首先触发传感器的时间, 也就是弹丸着靶时刻, v_0 是视速度。

当 $n \geq 4$ 时方程组 (2) 有解。当 $n = 4$ 时, 方程组 (2) 是非线性方程组; $n > 4$ 时, 方程组 (2) 是超定非线性方程组 (矛盾方程组)。求解方程组 (2) 即得 x, y, v_0, t_0 。

当 $v_x = 0$ 时, 方程组 (1) 简化为:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = v_0(t_0 + t_1) \\ \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} = v_0(t_0 + t_2) \\ \vdots \\ \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2} = v_0(t_0 + t_n) \end{cases} \quad (2)$$

3 基于 Gauss-Newton 法的模型求解

3.1 解的存在性和唯一性

因为实际试验中弹丸必定飞过靶面, 因此解的存在性是显然的, 也就是说一定存在这个着靶时刻。下面对方程解的个数进行讨论。以方程组 (2) 为例说明如下事实: 当存在三个共线的传感器时, 方程组 (2) 至多有两个解, 若还存在一个传感器不在上述直线上, 则有唯一解。

用几何方法证明。如图 5 所示, 任取 3 个传感器, 编号为 1、2 和 3, 对应的时延分别为 t_1, t_2 和 t_3 。由于传感器测量的是时延, 也就是激波到达传感器之间的时间差, 故着靶点在两个传感器的双曲线一支上, 或者到两个传感器的时间差相同, 此时双曲线退化为一根直线。所以, 若 $t_1 \leq t_2 \leq t_3$, 则解的分布如图 5 (a) 所示点 P 和点 Q 均为问题的解, 且显然有两个。其中, 当 $t_1 = t_2$ 时, S_{12} 退化为直线; 当 $t_2 = t_3$ 时, S_{23} 退化为直线。若 $t_2 \leq t_1 \leq t_3$, 则解的情形如图 4 (b) 所示。因此, 若有三个传感器共线, 则方程组至多有两个解。若还存在一个传感器不在上述三个传感器所在的直线上, 则用该传感器与上述共线的传感器比较, 进而得到唯一解。

3.2 Gauss-Newton 法迭代公式

为了说明上的方便, 下面以方程组 (2) 为例详细推导 Gauss-Newton 法迭代公式。记:

$$f_i = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 - v_0^2(t_i + t_0)^2, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

设 $f: D \subset R^4 \rightarrow R^n, f = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$ 。求解非线性方

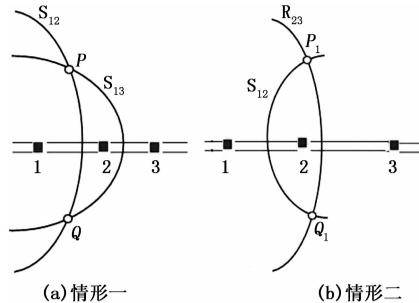


图 5 解的个数示意图

程组 (2) 等价于求解如下非线性最小二乘问题。

$$\min_{x \in D} \frac{1}{2} f(x)^T f(x) \quad (4)$$

用 Gauss-Newton 法求解非线性最小二乘问题 (4) 的具体公式如下:

$$x^{k+1} = x^k + [Df(x^k)^T Df(x^k)]^{-1} Df(x^k)^T f(x^k), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

其中:

$$Df(x^k) = \begin{bmatrix} \frac{Df_1}{Dx} & \frac{Df_1}{Dy} & \frac{Df_1}{Dv_0} & \frac{Df_1}{Dt_0} \\ \frac{Df_2}{Dx} & \frac{Df_2}{Dy} & \frac{Df_2}{Dv_0} & \frac{Df_2}{Dt_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{Df_n}{Dx} & \frac{Df_n}{Dy} & \frac{Df_n}{Dv_0} & \frac{Df_n}{Dt_0} \end{bmatrix}$$

是 Jacobi 矩阵, $\frac{Df_i}{Dx} = 2(x - x_i), \frac{Df_i}{Dy} = 2(y - y_i), \frac{Df_i}{Dv_0} = -2v_0(t_i + t_0)^2, \frac{Df_i}{Dt_0} = -2v_0^2(t_i + t_0), i = 1, 2, \dots, n, x^0 = (x^0, y^0, v_0^0, t_0^0)$ 是初值, 在实际计算中, x^0, y^0 取为虚拟靶靶面的中心点即可, 激波在虚拟靶靶面内的视速度 $v_0^0 = \frac{vc}{\sqrt{v^2 - c^2}}$ 可以由弹丸理论着靶速度 v 和当地声速 c 确定, $t_0^0 = \frac{\sqrt{(x^0 - x_s)^2 + (y^0 - y_s)^2}}{v_0^0}, (x_s, y_s)$ 是首先触发传感器在 xoy 平面内的坐标。

3.3 Gauss-Newton 法的收敛性

求解非线性最小二乘问题 (4) 的 Newton 法迭代公式如下:

$$x^{k+1} = x^k + [Df(x^k)^T Df(x^k) + S(x^k)]^{-1} Df(x^k)^T f(x^k), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

其中,

$$S(x^k) = \sum_{i=1}^n f_i(x^k) \nabla^2 f_i(x^k) = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & D \\ 0 & 0 & E & F \end{bmatrix},$$

$$A = 2 \sum_{i=1}^n f_i(x^k), B = 2 \sum_{i=1}^n f_i(x^k),$$

$$C = -2 \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x}^k)(t_0 + t_i)^2,$$

$$D = -4v_0 \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x}^k)(t_0 + t_i),$$

$$E = -4v_0 \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x}^k)(t_0 + t_i),$$

$$F = -2v_0^2 \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x}^k)$$

Gauss-Newton 法相当于在 Newton 法的基础上忽略了 $S(\mathbf{x}^k)$, 而 $S(\mathbf{x}^k)$ 包含了二阶导数项信息。

记 \mathbf{x}^* 非线性最小二乘问题 (4) 的解, 由 $S(\mathbf{x}^k)$ 的表达式知:

$$S(\mathbf{x}^*) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

由此可知, Gauss-Newton 法二阶收敛。

式 (7) 是在不存在传感器坐标误差和时延误差时得到的结果。在实际应用中, 传感器坐标和时延都存在一定的误差。下面针对存在不同传感器坐标误差和时延误差的情况下, 进行数值分析, 对 $\|S(\mathbf{x}^*)\|$ 和 $\|Df(\mathbf{x}^*)^T Df(\mathbf{x}^*)\|$ 的大小关系进行计算。表 1 和表 2 给出了在不同坐标误差和时延误差时 $\|S(\mathbf{x}^*)\|$ 和 $\|Df(\mathbf{x}^*)^T Df(\mathbf{x}^*)\|$ 的计算结果。

表 1 $\|S(\mathbf{x}^*)\|$ 在不同坐标误差和时延误差时的数值

	时延误差 5 μs	时延误差 10 μs	时延误差 20 μs
坐标误差 1 mm	2.4 m	4.2 m	10.2 m
坐标误差 2 mm	4.3 m	9.0 m	15.3 m
坐标误差 5 mm	5.2 m	11.2 m	55.4 m

表 2 $\|Df(\mathbf{x}^*)^T Df(\mathbf{x}^*)\|$ 在不同坐标误差和时延误差时的数值

	时延误差 5 μs	时延误差 10 μs	时延误差 20 μs
坐标误差 1 mm	4.5E8m	4.5E8m	4.5E8m
坐标误差 2 mm	4.6E8m	4.6E8m	4.5E8m
坐标误差 5 mm	4.5E8m	4.5E8m	4.5E8m

由表 1 和表 2 可知, $\|S(\mathbf{x}^*)\|$ 远远小于 $\|Df(\mathbf{x}^*)^T Df(\mathbf{x}^*)\|$, 因此 Gauss-Newton 法是线性收敛的。

3.4 Gauss-Newton 法的适用性

由解的存在性和唯一性分析知, 对于直线型传声器布阵, 存在两个解。而在实际应用中, 传感器阵存在测试方向性要求, 只允许弹丸在半个平面内射击, 因此可以排除另外一个解。在计算时按实际试验布阵情况即可确定唯一的解。具体分析如下: 对于地面着靶时刻测试, 此时传感器布置在地面, 显然弹丸从空中飞过, 因此很容易得到真实结果。对于对中射击弹丸着靶时刻的测试, 一般也是要求弹丸从传感器的某一侧飞过, 因此在实际应用中根据试验条件就可以得到弹丸的着靶位置。另外, 这是对于弹着点坐标而言存在的两个解的情况, 然而对于着靶时刻, 实

际上只能得到一个值, 并不存在多解的情况。也就是说, 确定弹丸的着靶时刻比确定弹着点位置更加容易。

4 仿真分析

通过计算机模拟进行仿真分析, 研究在不同的传感器坐标误差和时延误差情况下, 着靶时刻的误差大小及分布特性, 进而分析传感器数目对精度的影响。在计算机仿真时, 取靶幅为 10 m \times 10 m, 风速 $v_x = 3$ m/s, 传感器等间距布置, 坐标误差服从均值为 0 mm, 标准差为 1 mm 的随机分布, 时延误差服从均值为 0 μs , 标准差为 5 μs 的随机分布。

4.1 误差分析

为了分析靶面上的误差, 根据传感器布阵的对称性和靶面的对称性可知, 只需考虑半个靶面的误差即可, 并且在靶面上取若干个特征点, 用特征点的误差描述整个靶面的误差特性。在计算时在靶面上取 6 个特征点, 坐标分别如下: 特征点 1 (1 m, 1 m), 特征点 2 (1 m, 5 m), 特征点 3 (1 m, 9 m), 特征点 4 (5 m, 1 m), 特征点 5 (5 m, 5 m), 特征点 6 (5 m, 9 m), 如图 6 所示。

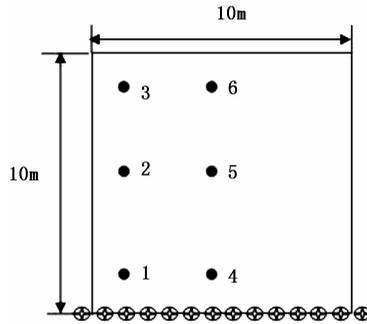


图 6 仿真计算示意图

仿真时在每个特征点处计算 10 000 次。图 7 给出了在特征点 1~特征点 6 处的仿真误差随仿真次数的变化图形。

由图 7 可知, 着靶时刻误差呈现一定的随机性和分布特性。为了进一步分析误差, 计算各个特征点处误差的均方根误差。如表 3 所示, 分别给出了在特征点 1~特征点 6 的均方根误差

表 3 特征点处着靶时刻的均方根误差

特征点	1	2	3	4	5	6
误差/ μs	13.8	54.5	212.2	12.0	122.2	754.3

由表 3 知, 着靶时刻或 t_0 误差小于 0.8 ms, 并且距离传感器阵越近均方根误差越小。

图 8 进一步给出了在 10 m \times 10 m 靶面上 t_0 的误差等值线图。

由图 8 可以得到如下规律: 1) 离传感器阵所在直线越远误差越大; 2) 离传感器阵所在直线距离相同时, 越靠近中间 t_0 误差越大, 这主要是因为越靠近中间时, 两边的传感器由于对称性进行了抵消, 相当于减少了传感器的个数。

4.2 传感器数目对误差的影响

为了分析传感器个数对着靶时刻误差的影响, 图 9 给

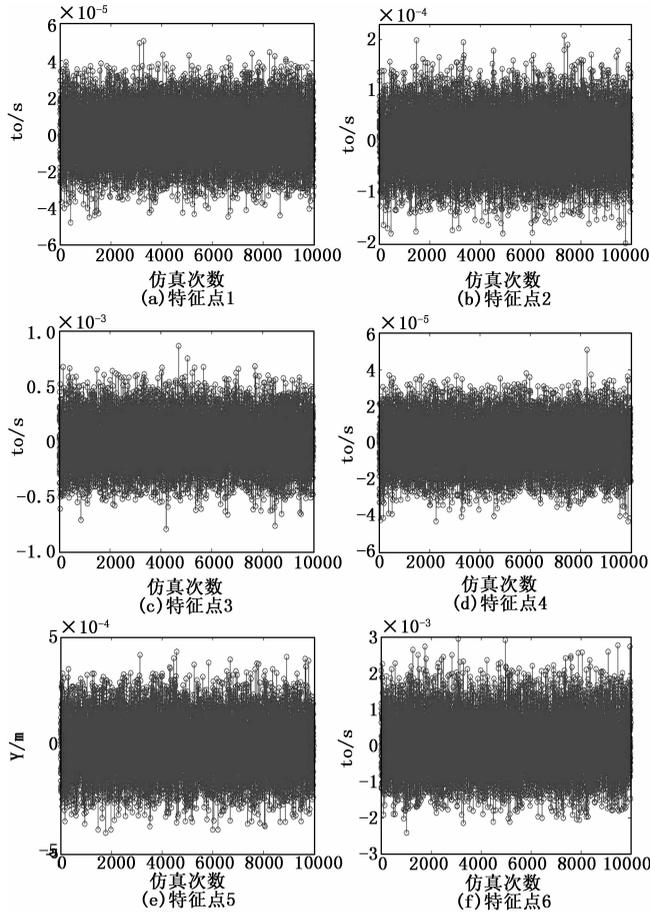


图 7 特征点 1~特征点 6 处的仿真误差随仿真次数的变化

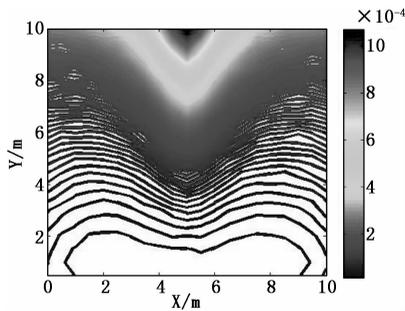


图 8 t_0 的误差等值线图 (单位: s)

出了着靶时刻误差随传感器数目变化的结果。其中,在固定传感器个数的情况下,在每个特征点处计算 10 000 次,统计其均方根误差作为该点的误差。

由图 9 可知: 1) 在特征点 6 处的误差最大; 2) 随着传感器数目的增加,误差逐渐降低; 3) 随着传感器个数的增加,误差降低不明显。在实际工程应用中,可根据使用条件,适当选择传感器个数。

5 试验结果与分析

5.1 发令枪目标试验

为了检验测试系统和算法的准确性,试验在实验室环境下进行,利用发令枪模拟测试声信号。在击发发令枪后,

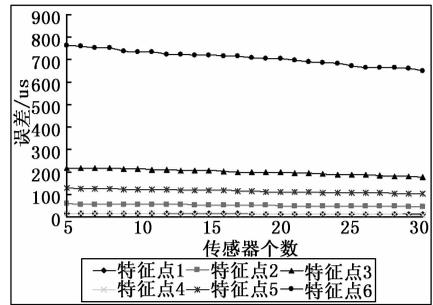


图 9 着靶时刻误差随传感器数目的变化

几乎会同时产生声信号和光信号,并忽略发令枪击发时声信号和光信号起点差异,然后利用高精度高速摄像机与声学测试设备分别测试其光信号和声信号,声传感器距发令枪击发点距离 2.2 米,因此声测试设备时间需经声信号传播延迟修正,而光学传播延迟可忽略,环境温度 26° ,标准大气压环境,此时的环境声速为 346.9 m/s,则声波传播 2.2 米的走时时间约为 6.3 ms,因此需将声测试设备时间修正 6.3 ms 的走时延迟。一共进行了 14 次试验,试验数据结果如表 4 所示。

表 4 测试数据对比表 (ms)

序号	光学测试	声学测试	误差
1	334.3	341.7	7.4
2	138.1	146.2	8.1
3	354.2	361.5	7.3
4	564.5	571.3	6.8
5	342.6	349.4	6.8
6	256.5	265.7	9.2
7	252.4	260.5	8.1
8	692.8	699.7	6.9
9	678.9	687.6	8.7
10	207.2	215.7	8.5
11	434.1	443.8	9.7
12	781.3	790.7	9.4
13	260.2	269.5	9.3
14	755.0	762.5	7.5

由表 4 中的数据可知,声学测试系统的时刻测试精度为 8.2 ms。另外从表 4 中的数据可以看出,声学测试系统的测试数据明显滞后于光学测试的数据。这主要是因为试验中发令枪击发时,首先产生火光信号,然后再产生声信号。去除掉这种系统差后,声学测试系统的时刻测试精度为 1.0 ms。

5.2 某型高炮试验

声学着靶时间测试系统体积较小,很容易用于对空中目标射击时的弹丸着靶时刻测试。在某型高炮对空射击试验中,采用声学测试系统测试了 6 弹丸的着靶时刻数据。试验时将系统与空中靶标架设在同一支架上测试弹丸的着靶时刻,再采用光学方法测试弹丸出炮口时刻,表 5 是得到的最终飞行时间。

表 5 飞行时间表

序号	1	2	3	4	5	6
飞行时间/ms	1199	1201	1195	1193	1195	1203

6 结论

针对空中吊靶或低能见度条件下着靶时刻的测试难题, 研制了基于声学原理的测试系统, 建立了修正弹丸着靶时刻的数学模型, 提出了基于 Gauss-Newton 的求解方法, 进而仿真分析了误差大小和传感器数目对误差的影响, 解决了声传感器延迟触发的测试问题。主要结论如下: (1) 传感器坐标误差 1 mm, 时延误差 5 μ s 时, 着靶时刻误差优于 0.8 ms; (2) 传感器数目对着靶时刻误差影响不大。提出的基于声学原理的立靶飞行时间测试方法受环境影响较小, 是超声速弹丸立靶飞行时间测试的有效手段。

参考文献:

[1] 牛凤翔. ATS 自动检靶系统的数学处理方法 [J]. 气动实验与测量控制, 1993, 7 (3): 118-122.

(上接第 122 页)

//以下设置数据绑定

...
});

Parameters 类继承 INotifyPropertyChanged 类, 其成员变量 x 在 set 方法中使用 PropertyChanged 委托。PropertyChanged 委托的作用是当 X 变量发生变化时, 通告所有与 Parameters 类绑定的对象, 使其成员变量数据与 X 同步。

3 应用及分析

基于 DDS 和 WPF 技术的试飞实时监控已在飞行试验领域中得到应用验证。通过基于 XAML 编辑引擎, 以拖拽控件的方式完成监控画面的快速集成, 大幅缩短了监控画面设计周期; 支持 PCM、INET、IENA 等类型的遥测数据解析与处理, 支持 TCP、UDP 传输协议, 能够对 DDS 质量服务策略进行选择, 例如实时回滚数据的处理与显示, 高网络延迟环境下的数据分发等, 应用效果如图 6 所示。

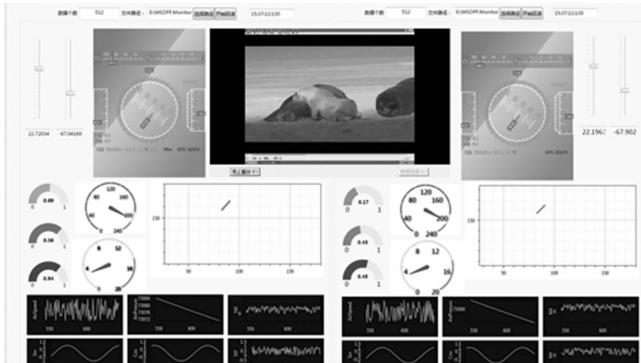


图 6 应用效果图

[2] 倪晋平, 辛 彬, 冯 斌. 室外用立靶密集度参数测量技术研究进展 [J]. 西安工业大学学报, 2013, 33 (4): 259-267.

[3] 李 健, 雷 鸣, 贺养养. 基于圆锥曲面斜入射弹着点声学检测模型 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36 (11): 124-127.

[4] MSI. Strafe scoring target type 590-air-to-ground training [EB/OL]. <http://www.ms instruments.com>, 2014.

[5] 王 磊, 陈昭男. 基于被动声学的超声速武器脱靶量解算方法 [J]. 应用声学, 2018, 37 (3): 385-390.

[6] 李思奇. 基于加权非线性最小二乘的无源协同定位 [J]. 计算机与数字工程, 2018, 46 (5): 900-903.

[7] 陈 连, 于国栋, 宋永志, 等. 声源定位算法的精度分析 [J]. 测绘科学, 2016, 41 (5): 21-25.

[8] 蒋东东. 基于被动声定位的大靶面弹着点坐标测量方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.

[9] 刘 哲, 陈日林, 滕鹏晓, 等. 基于平面传声器阵列的声源定位系统 [J]. 声学技术, 2011, 30 (2): 123-128.

[10] Wu S L, Wang X C. Analysis of Shock Wave Signals and Calculation of Trajectory Vector in Acoustic Positioning System [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 490-491: 1317-1321.

4 结束语

DDS 标准已在欧美等国家中的民航、国防领域得到广泛应用, 且已形成相对完善的商业产品。将 DDS 技术引入飞行试验测试领域, 可以很好地满足未来空天地试飞监控测试和跨试验场联合试飞等对数据实时性、可靠性和灵活性的要求, 提升数据传输能力。目前国内 DDS 的相关研究和应用范围非常有限, 特别是飞行试验鉴定领域应加强该技术的研究, 拓宽应用范围。

参考文献:

[1] 李筱雅. 多目标综合遥测监控系统架构设计 [J]. 现代电子技术, 2012, 35 (20): 124-127.

[2] 张大海, 赖兰剑, 陈鼎才. DDS 在分布式系统仿真中的应用 [J]. 计算机技术与发展, 2011, 21 (3): 250-252.

[3] 杨鑫辉, 张慧翔. 基于 DDS 的异构网络数据分发方法研究 [J]. 计算机技术与发展, 2014, (11): 63-66+70.

[4] 李海浩. 基于 DCPS 的 DDS 通信中间件的研究 [J]. 网络安全技术与应用, 2016, 182 (2): 62-64.

[5] 裘 楷, 沈 栋, 李 娜, 等. 基于 DCPS 模型的数据分发服务 DDS 的研究 [J]. 电子科技, 2006 (11): 72-75+80.

[6] 郭 亮. 基于 WPF 开发工具编写电子杂志制作软件 [J]. 信息通信, 2013 (4): 162-163.

[7] 张 勇, 李存华, 王新华. 基于 Silverlight 的 3D 电子相册翻页算法研究 [J]. 南京师大学报 (自然科学版), 2012, 35 (3): 143-148.

[8] 冷枫麒. 基于发布/订阅的分布式数据分发技术的研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.

[9] 王 坤, 房玉吉, 冯 源, 等. 基于 Qt 和 OpenDDS 的船舶电力模拟训练系统指令处理方法 [J]. 船海工程, 2018, 47 (6): 56-59.