

文章编号: 1001-2486(2008)02-0123-05

导弹飞行试验破片速度测定方法及其误差修正模型研究^{*}

傅常海^{1,2}, 黄柯棣¹, 张凤林², 谭锋²

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073; 2. 北京特种工程设计所, 北京 100028)

摘要: 破片速度的测量是导弹实弹飞行试验中一项难度较高的课题, 准确的测量结果对于科学评价武器毁伤效能等技术指标具有十分重要的意义。立足国内技术现状, 综述了导弹破片速度测量评定的一般方法, 分析了各方法的基本原理, 针对每种方法探讨了测量评定破片速度所存在的误差源。结合导弹实弹飞行试验特点及靶场试验实际情况, 重点对采用靶网法测量单枚破片速度的误差及误差源进行了分析, 给出了误差修正模型及提高测速精度的技术措施, 并指出了靶场现有破片测速方案的不足和改进方向。论文成果在靶场实践中得到了部分应用。

关键词: 导弹; 飞行试验; 破片; 速度; 测量; 评定; 误差模型

中图分类号: O389 文献标识码: A

Methods of Measuring and Evaluating the Fragments' Speed in Missile Flight Tests and Their Error-model

FU Chang-hai^{1,2}, HUANG Ke-di¹, ZHANG Feng-lin², TAN Feng²(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Beijing Special Engineering Design Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: The measure of fragment's speed is a difficult problem in missile damaging-flight tests, and exact measure results are very important for the evaluation of weapon's damage effect and other technical parameters. Based on domestic actuality, the basic principles of the measure and evaluation methods of missile fragment's speed are summarized. The error sources of measure and evaluation of fragment's speed are discussed in each method discussed in the research. In view of the characteristics of the missile damaging-flight tests and the actual instance of the range, the error and error sources of single fragment's speed under the method of Reticulate Targets Method are analyzed. The corrected error model and the technique of improving speed measure's precision are put forward. The flaw and improving direction of the scheme normally used are pointed out. The results of the research have partially applied to the missile damaging-flight tests.

Key words: missile; flight tests; fragment; speed; measure; evaluate; error-model

为确保获得可靠、有效的导弹武器试验鉴定结论, 靶场一般均安排进行少量的实弹毁伤效应飞行试验, 获取战斗部部分指标或因因子评定所必需的样本数据。破片作为一种产生毁伤作用的重要元件, 其主要作用在于利用其质量高速撞击并毁伤目标。对常规导弹尤其是杀伤爆破类导弹, 破片速度是重要的威力参数。准确测量、评定破片速度对客观评价导弹毁伤威力、改进武器研制具有重要意义。

本文总结了适用于导弹毁伤效应飞行试验中破片速度测量评定的方法, 阐述了各方法的基本原理, 并对应分析了误差源。重点对目前最常用的靶网法存在的误差进行了分析, 给出了误差修正模型及提高测速精度的技术措施。

1 常用破片速度测定方法

导弹弹头到达预定位置引爆后形成一定质量的许多破片, 将以一定速度对目标实现侵彻毁伤。破

^{*} 收稿日期: 2007-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50702075)

作者简介: 傅常海(1980—), 男, 工程师, 博士生。

片的杀伤效应与其速度、质量和形状有关,常用比动能 e_d 来衡量

$$e_d = \frac{E_d}{A} = \frac{mV_a^2}{2A} \quad (1)$$

式中, E_d 为破片的动能; A 为破片与目标遭遇面积数学期望值; m 为破片的质量; V_a 为破片击中目标瞬间的速度。

对破片速度的测定方法有两类,即经验公式推定法和时距法。

1.1 经验公式推定法

对于破片的初速(脱离壳体瞬间速度)存在经验推导公式^[1]:

$$V_0 = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{m_c/m_s}{1 + m_c/2m_s}} \quad (2)$$

式中, $\sqrt{2E}$ 为格尼速度,随炸药类型而定,可查有关资料获得; m_c 为装药质量; m_s 为壳体质量。

破片的即时速度(破片到达某位置处的瞬间速度)和破片脱离壳体后飞行距离 x 即衰减距离有关。已有试验充分证明,破片的运动服从阻力的二次方定律^[2],破片即时速度 V_x 存在经验推导公式:

$$V_x = V_0 \cdot e^{-\frac{C_D \rho}{2m} x} \quad (3)$$

式中, V_0 为破片脱离壳体瞬间速度; C_D 为破片的阻力系数(不规则破片 $C_D \approx 1.5$, 预制破片 $C_D \approx 1.24$, 球形破片 $C_D \approx 0.97$); ρ 为空气密度; A 为破片的迎风面积; m 为破片的质量。

1.2 时距法

在试验靶场,对破片速度的实测均采用时距法,即依靠一定手段测得破片在某位置附近的飞行距离 s 并记录所花费时间 t ,由此确定破片的速度(实质是以短距离内平均速度近似某点速度)。目前,除极少数采用高速摄影方法测定破片飞行速度外,一般均采用靶网法。

1.2.1 高速摄影方法

在试验时,在破片预定散布位置附近架设高速摄影设备。当战斗部即将解爆之前,通过一定触发方法(通常采用远距离手动触发和光幕触发两手段互为备份的方法)将摄影设备“唤醒”——开始记录。着靶后试验人员进入现场查看并分析摄影设备所存记录,给出该位置破片速度评定结论。原理是:摄影机记录频率一定,即帧数与时间存在一定的对应关系,故可通过分析所抓取的破片飞行记录和帧数即可确定摄影场内破片的飞行速度。

因一般破片具有体积小、速度快的特点,采用此方法测速时对摄影设备要求较高。如要测定直径为 1cm、真实速度约 1000m/s、测定速度误差小于 1%,则需要采用采集率大于 1000 帧/s 的高速摄影机。

1.2.2 靶网法

(1) 测速系统组成

靶网法测速系统主要包括若干测速靶(光幕靶或梳状靶)、计时仪、供电设备和传输电缆等^[3]。所有测速靶构成一个测速网络,测速靶与计时仪之间用电缆连接。

梳状靶为两个电极相间而成,在破片命中靶的瞬间,两电极导通输出中靶信号。光幕靶是一种新型速度测量装置,它的一侧光源发光,另一侧接收,产生一狭缝光幕,当有物体通过光幕时,光通量发生改变,接收一侧根据光通量变化产生脉冲电信号。

(2) 测速原理

如图 1 所示,每个测点位置布置双层测速靶,双层间距为 h_1 ,面向靶心与地面成 α 角。战斗部实际炸点为 O ,地平面投影为 O' , h 为炸高, $O'X$ 垂直于靶着地线方向, s 为 O' 与靶着地线的距离。解爆后破片与水平面成 β 角(针对具体弹片其值为确定值)穿过测速靶,穿靶点分别为 A 、 B (距离为 l),穿靶时间(通过计时仪计算破片穿过两层靶的时间间隔得到)为 t ,破片飞行方向的地平面投影与 $O'X$ 夹角为 γ 。因为战斗部实际炸点具有随机性,破片穿靶的角度 β 未知,实际上是以 h_1 代替 l ,则测得的破片速度为

$$v_{\text{测}} = \frac{h_1}{t} \quad (4)$$

在导弹武器毁伤效应飞行试验中,常借助高速高精度数字摄影设备(如 Phantom V6 等)对战斗部炸点位置进行精确测量。在修正测速误差时常默认由高速摄影设备测得的炸点位置是准确无误差的,但真实情况并非如此,因此,下文分“不计炸点测量误差”和“考虑炸点测量误差”两类情况进行分析,以应用于不同的误差修正场合。

(1) 不计炸点测量误差

1 测速误差

由(4)式和(11)式,可推得此时的测速误差为

$$\Delta v_1 = v_{实1} - v_{测} = \frac{h_1}{t \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot (\cot \alpha + \cot \beta)} - \frac{h_1}{t} = \frac{h_1}{t} \left[\frac{1}{\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot (\cot \alpha + \cot \beta)} - 1 \right] \quad (12)$$

在我们不考虑存在炸点测量误差的情况下(通常实际靶场测试环境均是如此),用上述误差修正模型修正所测得的破片测量速度即可保证足够的测速精度要求。

④ 误差源分析

(a) 测速靶摆放地面倾角 α

从破片速度测量系统的测速原理可以看出,测速靶测速主要是基于破片垂直穿过两个靶面。在布设测速靶时,考虑到战斗部解爆具有一定高度的事实,在离开理论靶心不同的距离上破片与地面具有不同的夹角,为此,在布设测速靶时使靶面与地面成一角度 α ,基本保证破片可以垂直穿过靶面。但实际上,由于战斗部的炸高与炸点位置在一定范围内具有随机性,导致破片飞行方向与靶平面方向成 $(\alpha + \beta)$ 角,使穿靶距离 l 大于靶间距 h_1 ,从而引入误差。

(b) 测速靶预制朝向

测速靶是依导弹理论炸点在试验之前摆放好的,而实际破片散布则是随机的。这将引入两方面误差:引入了穿靶偏移角 γ ;炸高 h 不为一定值,对穿过测速靶的某破片而言,穿靶角 β 不确定,也给测速靶的测量精度带来误差。

(2) 考虑炸点测量误差

尽管由高速数字摄影设备测得的战斗部炸点位置比较精确,但由于设备精度、布设位置等因素的制约,实测炸点位置与实际位置总会存在一定偏差。因此,当应用公式(11)来对测速靶测量结果进行修正时,是以 $\beta_{测}$ 来代入 β ,以 $\gamma_{测}$ 来代入 γ ,所得到的速度仍然不是破片速度真实值,此时的测速原理如图2所示。为准确掌握真实破片速度与所测取速度之间关系,下面来推导考虑炸点测量误差下的破片测量速度。

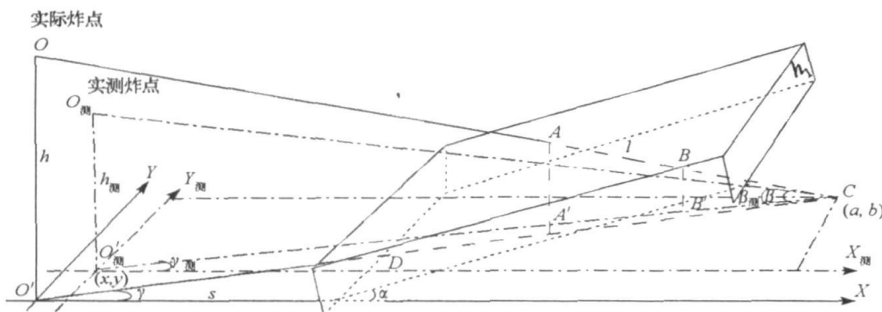


图2 炸点位置测量偏差下测速原理示意图

Fig. 2 The scheme of velocity measurement under the bias of burst points

1 经修正后测得的破片速度

为明确在“不计炸点测量误差”情况下修正后得到破片速度的内涵,先来推导该测量速度表达式。应用公式(11)修正后,即通常实际所得的破片飞行速度为

$$v_{测} = \frac{h_1}{t \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_{测} \cdot \cos \gamma_{测} \cdot (\cot \alpha + \cot \beta_{测})} \quad (13)$$

$$\text{其中 } \cos \gamma = \frac{a+x}{\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}}, \quad \sin \beta = \frac{h_{\text{测}} + \Delta h}{\sqrt{(h_{\text{测}} + \Delta h)^2 + (a+x)^2 + (b+y)^2}}, \quad \cot \beta = \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}}{h_{\text{测}} + \Delta h}。$$

其中, a, b 为破片着地点在实测坐标平面 ($X_{\text{测}} O'_{\text{测}} Y_{\text{测}}$ 平面) 上的坐标, x, y 为实测炸点投影在 XOY 平面内的坐标 (即因摄影设备测量精度带来的炸点位置相对于地平面上的移动偏差), Δh 为摄影设备测得的炸高偏差。

④ 破片真实飞行速度

由图 2 可推导获得破片实际飞行速度:

$$v = \frac{h_1}{t \cdot \sin \alpha} \cdot \frac{h_{\text{测}} + \Delta h}{\sqrt{(h_{\text{测}} + \Delta h)^2 + (a+x)^2 + (b+y)^2}} \cdot \frac{a+x}{\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \cdot \left[\cot \alpha + \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}}{h_{\text{测}} + \Delta h} \right] \quad (14)$$

(四) 测速误差

破片实际测速误差为:

$$\begin{aligned} \Delta v = v - v_{\text{测}} &= \frac{h_1}{t \cdot \sin \alpha} \cdot \frac{h_{\text{测}} + \Delta h}{\sqrt{(h_{\text{测}} + \Delta h)^2 + (a+x)^2 + (b+y)^2}} \cdot \frac{a+x}{\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \cdot \left[\cot \alpha + \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}}{h_{\text{测}} + \Delta h} \right] - \frac{h_1}{t} \\ &= \frac{h_1}{t} \left\{ \frac{h_1}{\sin \alpha} \cdot \frac{h_{\text{测}} + \Delta h}{\sqrt{(h_{\text{测}} + \Delta h)^2 + (a+x)^2 + (b+y)^2}} \cdot \frac{a+x}{\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \cdot \left[\cot \alpha + \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}}{h_{\text{测}} + \Delta h} \right] - 1 \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

可见, 在现有测量设备与技术的条件即存在一定 $x, y, \Delta h$ 偏离量的情况下, 测速精度亦存在一定的限制, 即除在“不计炸点测量误差”情况下分析的误差源以外, 由测量设备测定的战斗部炸点位置也是一类误差来源。

3 提高测速精度措施

根据上述分析, 针对目前工程实践中最常用的破片飞行速度测定方法——靶网法而言, 要提高测量精度, 除需对设备触发、计时精度提高要求外, 还可以从以下几个方面进行改进:

(1) 利用上文中误差修正模型 (12)、(15) 式对测量设备测取的破片速度进行修正;

(2) 设计新型测速靶或能准确获取破片穿靶距离 l 的测量设备;

(3) 在根据实际靶心测算弹片速度, 即应用公式 (13) 来对测速结果进行修正的同时, 进一步提高高速摄影设备的测量精度和改进对炸点位置测量的方法, 以追求更高的炸点位置测量精度, 即使 $x, y, \Delta h$ 的值尽可能小;

(4) 剔除测量数据中部分异常值^[4]。

4 小结

本文是在靶场实践应用背景下, 针对破片速度测定精度改进问题展开的研究, 其成果在近年多次靶场试验中得到了成功应用。但还须指出, 靶场环境十分复杂, 靶场资源相对有限, 如何在弹头落点随机、战斗部炸点与破片散布均随机的情况下科学摆放有限数量的测速设备, 或者说, 通过何种方法、装置可以更方便、准确地对破片速度完成测量, 仍是一个需要继续研究的课题。

参考文献:

- [1] 张国伟. 终点效应及其应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 谢盘海. 球形破片长距离飞行时速度衰减规律研究[J]. 高压物理学报, 2004(4).
- [3] 倪晋平等. 一个新的模拟导弹战斗部破片群单个速度测试系统[J]. 西安工业学院学报, 1999, 19(4).
- [4] 刘世平. 弹丸速度测量与数据处理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994.