

doi: 10.7690/bgzd.2015.07.003

开放式 T 靶弹丸斜入射风矢量修正模型

应 浩, 黄克平

(总参谋部第六十研究所科研处, 南京 210016)

摘要: 针对开放式 T 靶的自动报靶存在的问题, 提出一种开放式报靶风矢量修正的数学模型。从 T 靶的实用性和报靶精度出发, 重点讨论开放式 T 靶的二维风矢量修正, 并通过实际打靶测试验证。结果表明, 该方法可大大提高系统报靶精度。

关键词: 风矢量; 修正; 精度

中图分类号: TJ012.3⁺1 **文献标志码:** A

Oblique Incidence Wind Vector Correction Model About
Opened T-shape Target Projectile

Ying Hao, Huang Keping

(Scientific Research Bureau, No. 60 Research Institute of General Staff Department of PLA, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problem of opened T-shape target automatic scoring, put forwards the math model of opened scoring wind vector modification. Based on T-shape target practicality and scoring accuracy, emphasize on 2D wind vector modification of opened T-shape target, verify it through real targeting. The results show that the method can greatly improve the system target scoring.

Keywords: wind vector; correction; accuracy

0 引言

随着现代军事训练的发展, 射击训练和射击比赛对于自动报靶的条件及报靶精度的要求不断提高。基于声学的开放式声学立靶通常在室外对射击的弹着点进行测量, 报靶精度通常不可避免地会受到环境因素的影响。相对于某一段时间的环境温度变化, 风速的大小和方向是时刻变化的, 因此, 对于风矢量的修正无法像对环境温度那样进行修正。笔者通过弹丸入射过程对二维风矢量进行分析, 得到了一种弹丸入射时风矢量修正的数学模型。

1 风矢量的测量

基于声学的开放式 T 靶报靶原理是根据传感器布阵的方式, 检测各传感器接收到弹丸在射击过程中与空气摩擦产生的激波到达传感器时间的不同得到相应的数学模型。根据模型可以看出, 声速、弹丸速度和 ΔT_i 的准确性将直接影响到报靶的精度。 ΔT_i 的精度由信号处理的软硬件电路决定, 通常可以做到 10^{-6} 甚至更高, 对于计算结果的影响可以忽略。所以, 对于精度报靶, 速度是决定报靶精度的关键^[1-2]。温度对于声速的影响, 可以通过传统的温度声速校正公式 (1) 对其进行修正。

$$C = 331.4 + 0.61 \times T \quad (1)$$

其中: C 为声速; T 为环境温度。

通过实验分析可知风速对于报靶精度的影响: 在小于二级风时, 计算结果和实际坐标的误差一般在 3~5 mm, 二级风以上或风向与弹丸轨迹存在一定角度时, 会达到十几毫米甚至几十毫米; 所以, 对于室外的开放式报靶系统, 必须考虑风矢量对报靶精度的影响。

风矢量包括风速的大小和方向, 对于开放式报靶系统, 风矢量指的是三维情况下的风矢量。对于本报靶系统模型, 在不考虑俯仰角射击的情况下, 可以将三维模型简化为二维风矢量模型, 即只考虑平面风的大小和方向。对于射击过程来说, 风速的大小和角度是时刻发生变化的, 相对于某个弹丸穿过 T 靶的时间段(通常为毫秒级), 可认为风矢量是不发生变化的。笔者将 T 型靶中第一个传感器接收到信号时刻的风矢量作为计算过程中的风矢量。

2 无风状态下报靶模型

超音速弹丸在空气中飞行时, 弹丸的表面和空气摩擦产生声波。由声学理论, 一个固定声源辐射的每一个波阵面以声速 C 行进, 形成以固定声源为中心的一系列同心波阵面(在三维空间是球形)。弹丸在空气中运动时, 相当于一个运动的声源, 当弹

收稿日期: 2015-03-20; 修回日期: 2015-04-28

作者简介: 应 浩(1981—), 男, 安徽人, 硕士研究生, 工程师, 从事应用电子及伺服控制方向的研究。

丸的运动速度大于当地音速时，其弹丸产生的声波在空中形成一个圆锥体^[3]，如图 1(a) 所示。

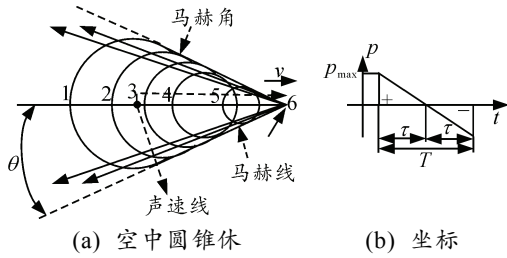


图 1 弹丸空中飞行及产生 N 波示意图

圆锥的顶点伴随着弹丸一起运动，如果在弹道线周围放置压力传感器，其感受的空气压力变化呈“N”状，常称 N 波或弹丸激波。

如图 2 所示的坐标系中，设弹道入射线与 z 轴正方向的夹角为 α ，靶面 $M_1M_3Q_0P_0$ 上的弹着点为 $P(x, y, 0)$ ， A_1 、 A_2 、 A_3 为 3 个传感器 M_1 、 M_2 、 M_3

对应于 3 个虚拟靶面(垂直于弹道)上的弹着点。传感器 M_1 、 M_2 、 M_3 的坐标分别为 $M_1(-L, 0, 0)$ ， $M_2(0, 0, 0)$ ， $M_3(L, 0, 0)$ ，设子弹速度为 v ，且在靶面前的一段飞行行为匀速， C 为当地声速，满足 $v > C$ 。

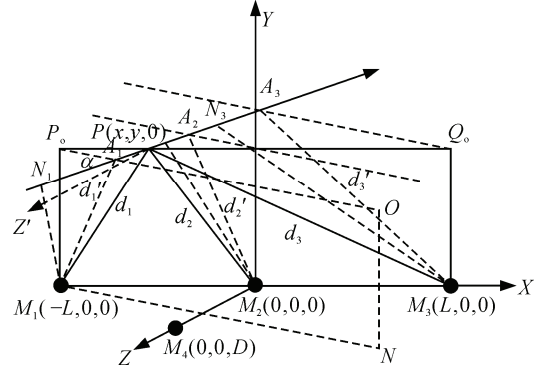


图 2 开放式 T 靶斜射数学模型

根据文献[4]，得到

$$\begin{cases} \sqrt{(L+x)^2 \cos^2 \alpha + y^2} - \sqrt{x^2 \cos^2 \alpha + y^2} = \frac{vC}{\sqrt{v^2 - C^2}} \left(\frac{L \sin \alpha}{v} + \Delta T_1 \right) \\ \sqrt{x^2 \cos^2 \alpha + y^2} - \sqrt{(x-L)^2 \cos^2 \alpha + y^2} = \frac{vC}{\sqrt{v^2 - C^2}} \left(\frac{L \sin \alpha}{v} + \Delta T_2 \right) \\ \sqrt{x^2 \cos^2 \alpha + y^2} - \sqrt{(x \cos \alpha + D \sin \alpha)^2 + y^2} = \frac{vC}{\sqrt{v^2 - C^2}} \left(\frac{D \cos \alpha}{v} + \Delta T_3 \right) \end{cases} \quad (2)$$

3 风矢量的分解

根据文献[4]中提到的单个传感器入射模型分析，如图 1 所示，在 $v > C$ 时，存在以下等式方程：

$$\frac{\sqrt{d^2 + l^2}}{C} = \frac{l}{v} + \frac{d}{C} \quad (3)$$

所以，在 d 和 l 存在的情况下，风矢量只对声速 C 和弹丸速度 v 产生影响，从而影响弹丸在靶面上的弹着点位置。

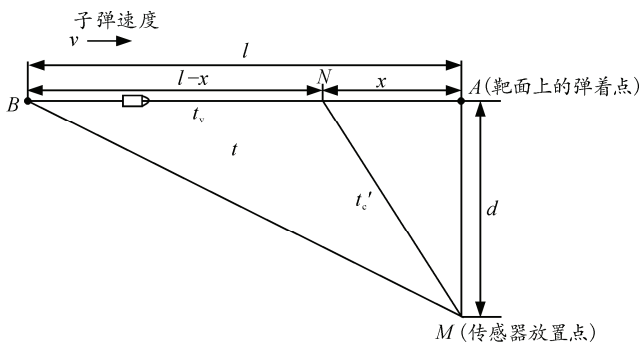


图 3 单个传感器入射时模型

由此，在图 3 的状态下，可得到单个传感器状态下弹丸入射，在 $v > C$ 时，可得到修正后的等式：

$$\frac{\sqrt{d^2 + l^2}}{C'} = \frac{l}{v'} + \frac{d}{C'} \quad (4)$$

其中 v' 和 C' 分别为风矢量修正后的 v 和 C 。

根据上述等式，笔者可以推导 T 型靶状态下二维风矢量的数学模型。

在二维风状态下，设传感器最早接收到弹丸激波信号时风矢量与 X 轴正方向的夹角为 β ，大小为 v_F ，模型示意图如图 4 所示。

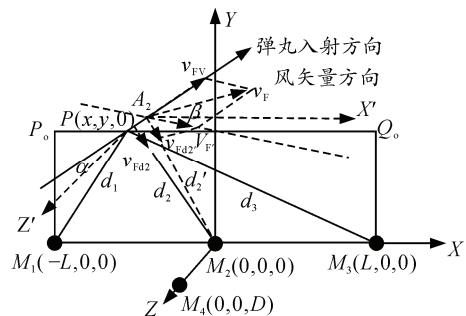


图 4 风矢量分解模型

设 A_2 为传感器 M_2 最先接收到信号时弹丸所在弹道上的位置， A_2X' 平行于 X 轴，则二维风矢量 v_F 与 X' 的夹角为 β ，设弹道入射线与 z 轴正方向的夹角为 α ，靶面 $M_1M_3Q_0P_0$ 上的弹着点为 $P(x, y, 0)$ 。

在 A_2X' 与弹道入射线的平面内对风矢量进行分解，根据三角形及三角函数关系可以得到：

$$v_{FV} = v_F \sin(\alpha + \beta)$$

$$v_{F'} = v_F \cos(\alpha + \beta)$$

同理，在 d_2 、 d_2' 方向上，可得

$$v_{Fd2'} = v_F \arctan \frac{x}{d_2' \cos \alpha}$$

则在温度补偿和风矢量进行分解后，得到修正后的弹丸速度 v' 和 M_2 方向上的声速 C' ：

$$v' = v + v_{FV} = v_F \sin(\alpha + \beta)$$

$$C_{d2'} = C + v_{Fd2'} = C + v_F \cos(\alpha + \beta) \arctan \frac{x}{d_2' \cos \alpha}$$

同理：

$$C_{d1'} = C + v_F \cos(\alpha + \beta) \arctan \frac{x}{d_1' \cos \alpha}$$

$$C_{d3'} = C + v_F \cos(\alpha + \beta) \arctan \frac{x}{d_3' \cos \alpha}$$

$$C_{d4'} = C + v_F \cos(\alpha + \beta) \arctan \frac{D \tan \alpha + x}{d_4' \cos \alpha}$$

结合公式 (2)，得到在二维风矢量条件下的弹丸斜入射的数学模型：

$$\begin{cases} \sqrt{(L+x)^2 \cos^2 \alpha + y^2} - \sqrt{x^2 \cos^2 \alpha + y^2} = v' \left(\frac{C_{d1'}}{\sqrt{v'^2 - C_{d1'}^2}} \frac{L \sin \alpha}{v'} + \frac{C_{d2'}}{\sqrt{v'^2 - C_{d2'}^2}} \Delta T_1 \right) \\ \sqrt{x^2 \cos^2 \alpha + y^2} - \sqrt{(x-L)^2 \cos^2 \alpha + y^2} = v' \left(\frac{C_{d2'}}{\sqrt{v'^2 - C_{d2'}^2}} \frac{L \sin \alpha}{v'} + \frac{C_{d3'}}{\sqrt{v'^2 - C_{d3'}^2}} \Delta T_2 \right) \\ \sqrt{x^2 \cos^2 \alpha + y^2} - \sqrt{(x \cos \alpha + D \sin \alpha)^2 + y^2} = v' \left(\frac{C_{d3'}}{\sqrt{v'^2 - C_{d3'}^2}} \frac{D \cos \alpha}{v'} + \frac{C_{d4'}}{\sqrt{v'^2 - C_{d4'}^2}} \Delta T_3 \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $v' = v_F \sin(\alpha + \beta)$ 。

4 模型验证

根据得到的风矢量修正数学模型，笔者分别在南京军区某靶场 (温度为 12.6 °C) 和北京军区某靶

场 (温度为 8.2 °C) 进行了射击试验数据对比，超音速弹丸采用 95 式步枪和二维超声传感器对风矢量进行测量，风向传感器指北方向指向 X 轴正方向。在靶面长度 L 为 1.88 m， D 为 0.6 m 时部分计算结果及实际测量结果对比如表 1 所示。

表 1 开放式 T 靶实验数据

cm

风向角/(°)	风速/(m/s)	无风修正计算值		修正后计算值		测量值		无风修正误差		修正后误差	
		x	y	x	y	x	y	Δx	Δy	Δx	Δy
133.22	1.1	74.22	118.80	73.48	117.32	73.8	117.5	0.42	1.30	-0.32	-0.18
121.88	0.9	72.37	158.01	72.55	157.86	72.5	158.6	-0.13	-0.59	0.05	-0.74
107.71	1.5	63.49	213.20	63.12	213.74	62.8	214.1	0.69	-0.90	0.32	-0.36
201.25	2.7	-50.45	165.80	-51.22	166.46	-51.6	167.3	-1.15	-1.50	-0.38	-0.84
184.25	1.9	13.55	170.60	14.20	169.55	14.6	168.8	-1.05	2.00	-0.40	0.95
212.60	4.1	138.65	100.32	136.44	104.38	135.2	106.4	3.45	-6.08	1.24	-2.02
167.24	3.5	63.35	131.71	64.32	132.56	65.3	134.3	-1.95	-2.59	-0.98	-1.74
226.77	3.8	12.82	167.15	13.93	165.48	13.5	164.2	-0.68	2.95	0.45	1.28

根据修正后的数学模型计算得到的弹着点与实际测量的弹着点进行比较发现：采用此种方法得到的风矢量修正模型的报靶精度得到了一定程度的改善，同时 y 轴方向上的报靶精度得到了明显的提高。

从模型上分析，风矢量的分解增加了方程组的复杂度和求解的难度，从未知数的个数上来看：由于风速的大小和方向都是已知的，因此，方程组的解仍可按原迭代法进行求解^[5]。

5 结束语

笔者从开放式 T 靶的实用性及报靶精度出发，结合模型方程的复杂度、计算的实时性以及实际有效修正 (x 和 y 方向上的修正，不考虑 z 轴方向上的修正) 的要求，重点讨论了开放式 T 靶的二维风矢量修正^[6]。对于三维情况下的风矢量修正，需与在

俯仰存在情况下的射击模型进行考虑，风矢量的分解类似于二维风矢量。

参考文献：

- [1] 卓宁. 靶场高精度脱靶量测量方案与仿真实现[J]. 兵工自动化, 2014, 33(3): 84-85.
- [2] 田春. 弹丸超声报靶定位系统的研究与实践[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
- [3] 肖峰, 李惠昌. 声、武器和测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 5-18.
- [4] 黄克平, 应浩, 张亚, 等. 基于开放式 T 靶的弹丸斜入射数学模型[J]. 应用声学, 2010, 29(1): 43-46.
- [5] 黄克平, 应浩, 张亚, 等. 开放式三维 T 靶的数学模型建立及其解析算法[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(5): 124-126.
- [6] 刘云, 贾洪平, 张鹏, 等. 基于 SVPWM 的无刷直流电机矢量控制系统研究[J]. 机电工程, 2014, 31(9): 1177-1181.