

doi: 10.7690/bgzd.2022.03.010

# 航空炸弹对线目标毁伤效能研究

曾松林, 王雪峰, 韩玉龙, 孙守福

(海军航空大学航空作战勤务学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对普通航空炸弹打击线目标的效能评估问题, 对炸弹从投放到爆炸之前的运动过程进行建模, 得到弹着角、斜距等参数。运用误差理论对炸弹的弹道偏差进行处理, 得到基平面上的瞄准误差; 建立炸弹毁伤线目标模型, 得到炸弹对线目标等效毁伤长度和宽度; 最后计算出单枚炸弹对线目标的毁伤效能。计算结果表明: 该方法合理有效, 易于编程实现, 可以快速、精确地计算炸弹毁伤效能。

**关键词:** 线性阻力; 线目标; 瞄准误差; 弹道偏差

**中图分类号:** TJ414 **文献标志码:** A

## Research on Damage Efficiency of Aerial Bomb to Linear Target

Zeng Songlin, Wang Xuefeng, Han Yulong, Sun Shoufu

(School of Aviation Operations and Support, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of effectiveness evaluation of conventional aerial bomb attacking linear target, the motion process model of the bomb from dropping to explosion is established, and the parameters such as impact angle and slant range are obtained. The error theory is used to deal with the trajectory deviation of the bomb, and the aiming error on the base plane is obtained. The model of the bomb damaging the line target is established, and the equivalent damage length and width of the line target are obtained. Finally, the damage efficiency of a single bomb to the line target is calculated. The calculation results show that the method is reasonable and effective, easy to program, and can calculate the bomb damage effectiveness quickly and accurately.

**Keywords:** linear resistance; linear target; aiming error; ballistic deviation

### 0 引言

线目标是指诸如飞机跑道、输油管线、交通线等狭长目标。有关这类目标的研究很少, 文献[1]针对火炮对线目标的射击效力进行了研究, 推导出相对毁伤长度和目标长度之间的关系。文献[2]给出对线目标射击效率和对线目标相对覆盖长度数学期望的计算公式。笔者同时考虑炸弹对线目标的覆盖和飞机进入方向 2 个因素来计算对线目标的毁伤效能。

### 1 炸弹线性阻力模型

文献[3]给出了炸弹在空中运动时空气阻力加速度的仿真算法。模型考虑因素多、精度高, 但编程实现复杂。为了便于编程实现, 采用一种简化的炸弹弹道模型。炸弹在空中下落时由于受空气阻力作用, 弹道会发生变化, 其受力如图 1 所示。假设炸弹所受的阻力与速度成正比。

#### 1.1 垂直运动

在垂直方向上, 由牛顿第二定律可知:

$$mg - C_d v_v = m dv_v / dt \quad (1)$$

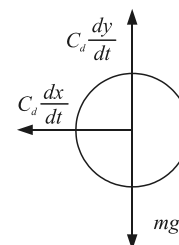


图 1 炸弹投放后受力分析

式中:  $c_d$  为阻力系数;  $v_v$  为垂直速度。

积分得:

$$V_v = (v_{0v} - g/c_0) \exp(-c_0 t) + g/c_0 \quad (2)$$

式中:  $c_0 = C_d/m$ ;  $v_{0v}$  为初始垂直速度。

从投放位置开始的垂直位移:

$$y = \int_0^t V_v dt = (v_{0v} - g/c_0)(1 - \exp(-c_0 t))/c_0 + gt/c_0 \quad (3)$$

式(1)~(3)表示投放点至弹着点之间任意时刻的垂直速度和高度。

#### 1.2 水平运动

在水平方向上, 由牛顿第二定律可知:

收稿日期: 2021-11-30; 修回日期: 2021-12-29

作者简介: 曾松林(1982—), 男, 湖南人, 博士, 讲师, 从事航空兵指挥与任务规划研究。E-mail: zengsonglin@126.com。

$$-C_d v_h = m dv_h / dt \quad (4)$$

式中  $v_h$  为水平速度。

积分得：

$$v_h = v_{0h} \exp(-c_0 t) \quad (5)$$

式中  $v_{0h}$  为初始水平速度。

从投放位置开始的水平位移：

$$x = \int_0^t V_h dt = v_{0h}(1 - \exp(-c_0 t)) / c_0 \quad (6)$$

当  $y=0$  时，计算弹着条件，得出：

$$(v_{0v} - g/c_0)(1 - \exp(-c_0 t)) / c_0 + gt/c_0 = 0 \quad (7)$$

将式(7)变形为：

$$t = (1/c_0 - v_{0v}/g)(1 - \exp(-c_0 t)) + c_0 h_0 / g \quad (8)$$

式中  $h_0$  为初始高度。

利用迭代算法可计算炸弹空中下落时间。

弹着点的速度计算公式为：

$$v = \sqrt{v_v^2 + v_h^2} \quad (9)$$

相对水平面的弹着角：

$$I = a \tan(v_v / v_h) \quad (10)$$

## 2 瞄准误差

精度分析时通常假设纵横向分布服从高斯分布或正态分布，且纵、横向相互独立<sup>[4]</sup>。由标准正态分布的概率密度函数可知，当均值为 0 时，在一倍标准差( $\pm 1\sigma$ )范围内包含了 68% 的样本值，将其转换为以概率偏差 REP 或 DEP 为单位时有：

$$\text{REP} = 0.674 5\sigma_x; \text{DEP} = 0.674 5\sigma_y \quad (11)$$

当  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$  时，有：

$$\text{CEP} = 1.177 4\sigma \quad (12)$$

式中：REP 为纵向偏差；DEP 为横向偏差；CEP 为圆概率偏差； $\sigma_x$  为纵向标准差； $\sigma_y$  为横向标准差。

除非炸弹垂直下落，空中其他方式投放的炸弹弹药在基面上的最终散布均不服从圆正态分布。通常将弹道偏差定义为  $\sigma_b$ ，是弹道散布在法平面的标准偏差，同时假定在法平面上服从高斯分布。该标准差可以转换为基平面上的纵横向偏差，然后分别同 REP 和 DEP 的平方和根得到瞄准误差。

可将弹道偏差转换为基面上具有同等含义的标准差，转换时最好使用炸弹的实际轨迹长度，但计算量很大；因此，使用斜距  $R$  为近似值。

$$\begin{aligned} x &= (\text{DEP} * R) / 1000 = (0.674 5 * R * \sigma_b) / 1000; \\ y &= (\text{REP} * R) / (1000 \sin(I)) = \\ &= (0.674 5 * R^2 * \sigma_b) / (1000 \sin(I)). \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{REP}' = \sqrt{\text{REP}^2 + x^2}; \text{DEP}' = \sqrt{\text{DEP}^2 + y^2} \quad (14)$$

## 3 炸弹对线目标毁伤效能

### 3.1 炸弹等效毁伤区域

假设炸弹的毁伤图形是一个长为  $L_{ET}$ ，宽为  $W_{ET}$  的矩形。当炸弹随机投放至线目标时，所有能够对目标造成毁伤的矩形分布如图 2 所示，反映的是所有能够对线目标造成毁伤的单枚炸弹毁伤区域之和。

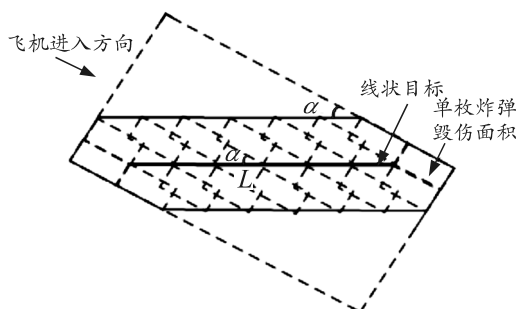


图 2 炸弹对线目标毁伤区域

假设上图中总毁伤区域上部、下部三角形区域面积分别为  $S_1$ 、 $S_2$ ，中间毁伤区域之和面积为  $A_T$ ，其余尺寸如图 3 所示。

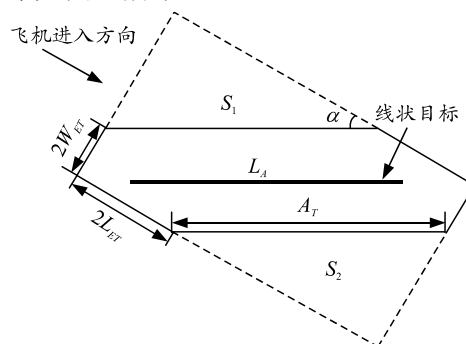


图 3 简化后的炸弹毁伤区域

从图 2、3 分析可知，毁伤区域面积  $A_T$  为：

$$A_T = (2L_{ET} + L_A \cos \alpha)(2W_{ET} + L_A \sin \alpha) - L_A^2 \sin \alpha \cos \alpha \quad (15)$$

借鉴炸弹对点目标的毁伤计算方法，将毁伤区域转换成一个长为  $L_{EP}$ 、宽为  $W_{EP}$  的毁伤矩形，如图 4 所示。

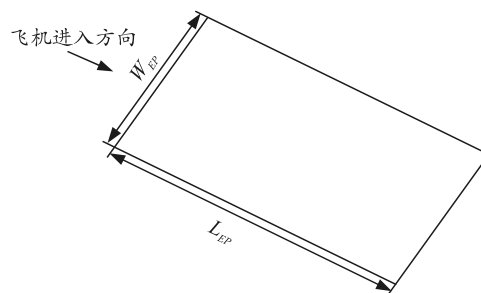


图 4 转换后的毁伤矩形

考虑飞机进入方向，可以得到  $L_{EP}$  如下：

$$L_{ER} = 2L_{ET} + L_A \sin \alpha \quad (16)$$

计算出新的毁伤矩形长为  $L_{ER}$ 、面积为  $A_T$  的基础上，可以得出新的毁伤矩形的宽度  $W_{EP}$ ：

$$W_{EP} = A_T / L_{EP};$$

$$W_{EP} = \frac{(2L_{ET} + L_A \cos \alpha)(2W_{ET} + L_A \sin \alpha) - L_A^2 \sin \alpha \cos \alpha}{2L_{ET} + L_A \sin \alpha} \quad (17)$$

### 3.2 毁伤效能

如果攻击使用单枚非制导炸弹或多枚单独瞄准的制导炸弹，则线目标可以认为是一个整体目标，可采用文献[5]的方法计算毁伤效能。

#### 3.2.1 当飞机进攻方向平行于线目标长边方向时

在纵向上的毁伤概率  $SSPD_x$ ：

$$SSPD_x = \frac{((2L_{ET} + L_A \cos \alpha)(2W_{ET} + L_A \sin \alpha) - L_A^2 \sin \alpha \cos \alpha) / (2L_{ET} + L_A \sin \alpha)}{\sqrt{17.6DEP^2 + [(2L_{ET} + L_A \cos \alpha)(2W_{ET} + L_A \sin \alpha) - L_A^2 \sin \alpha \cos \alpha] / (2L_{ET} + L_A \sin \alpha)^2}} \quad (22)$$

将单枚炸弹纵向  $SSPD_x$  与横向  $SSPD_y$  相乘，得出总的毁伤效能  $SSPD$ ：

$$SSPD = SSPD_x \times SSPD_y \times R \quad (23)$$

毁伤概率计算流程如图 5 所示。

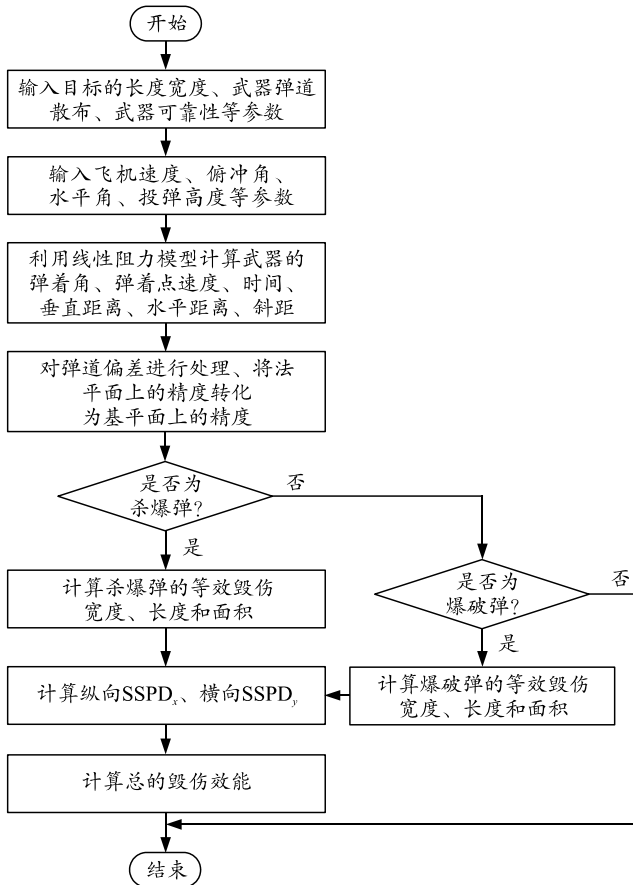


图 5 毁伤概率计算流程

$$SSPD_x = L_{ET} / \sqrt{17.6REP^2 + L_{ET}^2} \quad (18)$$

在横向上的毁伤概率  $SSPD_y$ ：

$$SSPD_y = W_{ET} / \sqrt{17.6DEP^2 + W_{ET}^2} \quad (19)$$

将单枚炸弹纵向  $SSPD_x$  与横向  $SSPD_y$  相乘，得出总的毁伤效能  $SSPD$ ：

$$SSPD = SSPD_x \times SSPD_y \times R \quad (20)$$

式中  $R$  为炸弹的可靠性。

#### 3.2.2 当飞机进攻方向与线目标长边方向成夹角时

在纵向上的毁伤概率  $SSPD_x$ ：

$$SSPD_x = \frac{(2L_{ET} + L_A \sin \alpha)}{\sqrt{17.6REP^2 + (2L_{ET} + L_A \sin \alpha)^2}} \quad (21)$$

在横向上的毁伤概率  $SSPD_y$ ：

## 4 算例

某飞机使用 1 枚普通航空炸弹打击 1 条宽 10 m、长 150 m 的交通线，瞄准目标后，在 1 000 m 高度，以 600 km/h 的速度、30°的俯冲角、飞行方向平行于交通线长边方向。已知炸弹阻力系数  $c_0=0.005$ ，瞄准精度  $REP=11.4$  m， $DEP=6.36$  m，弹道偏差为  $\sigma_b=5$  m，杀伤面积  $MAE=2\ 500$  m<sup>2</sup>，弹药可靠性  $R=0.95$ ，计算毁伤效能。

经计算可得：

$$SSPD_x = \frac{L_{ET}}{\sqrt{17.6REP^2 + L_{ET}^2}} = \frac{150}{\sqrt{17.6(11.4)^2 + 150^2}} = 0.953;$$

$$SSPD_y = \frac{W_{ET}}{\sqrt{17.6DEP^2 + W_{ET}^2}} = \frac{10}{\sqrt{17.6(6.36)^2 + 10^2}} = 0.351;$$

$$SSPD = SSPD_x \times SSPD_y \times R = 0.953 \times 0.351 \times 0.95 = 0.318. \quad (24)$$

当飞机与线目标长边呈一定角度进入时，线目标有效尺寸分析计算如图 6 所示，另外结合炸弹单发毁伤概率的计算方法，得到飞机与线目标呈不同角度进入时的单发毁伤概率  $SSPD$ ，通过定量分析得到进入最佳的角度。

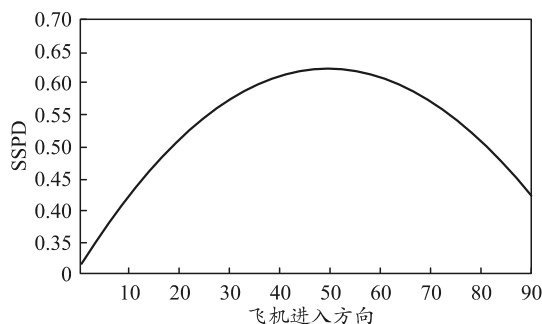


图 6 不同进入方向时的 SSPD

从上图可看出，当飞机进入方向与线目标长边的夹角在  $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$  时，毁伤概率较高。当飞机执行对机场跑道攻击时，一般要求进入方向与跑道方向成  $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$  角，笔者建立的模型与飞机实际对地攻击战术较为吻合，证明了模型的正确性。

## 5 结束语

航空炸弹效能评估是飞机对地打击任务的重难点

\*\*\*\*\*  
(上接第 51 页)

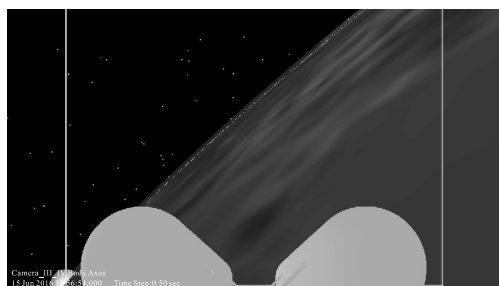


图 21 摄像装置 2 临界状态

### 3.5 仿真结果分析应用

经仿真分析，对于摄像装置 4 在整流罩分离之后，其轴向与太阳光线之间的夹角均未能满足视场角条件，即太阳光不会对其视场有效性产生影响；而对于摄像装置 1 和 2，当火箭发射时间处于 17:58:11~19:52:11 时，太阳光将可能照射进入摄像装置 1 和 2，两摄像装置可能因此失效。

综上所述，运载火箭在当天的发射窗口应尽量避免 17:58:11~19:52:11，以保证所有摄像装置不受太阳光照的影响，能够在火箭飞行全过程中正常工作。

## 4 结束语

笔者提出了一种运载火箭摄像装置视场有效性

点问题，直接关系到弹药使用量和飞机出动量。笔者根据线目标特点，结合炸弹毁伤区域，建立了打击线目标的毁伤效能计算模型。计算结果表明：该模型简便易行，适用于工程实现，可为飞机执行对地打击任务时的弹药类型和数量选择提供参考。

## 参考文献：

- [1] 李艳丽. 对岸上线目标、面目标射击的效力评估[J]. 火力与指挥控制, 2001, 26(4): 73-76.
- [2] 徐培德, 余滨, 马满好, 等. 军事运筹学基础[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003: 150-152.
- [3] 王勇亮, 赵成仁, 卢颖. 炸弹空气阻力加速度的仿真与实现[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 251-252.
- [4] TRAVERS C C. Optimizing aimpoints for multiple GPS weapons released against a single target[D]. M. S. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, Sept. 2002.
- [5] 麻广林, 赵宏宇. 常规武器运用工程手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2020: 265-286.

\*\*\*\*\*  
仿真分析方法，针对不同的发射窗口，对火箭飞行全过程中太阳光照对于摄像装置的影响进行统计分析。使用该仿真分析方法，可以为发射窗口的制定提供依据，在不影响发射任务的前提下最大程度地保障摄像装置的视场有效性，具有较强的工程应用价值。

## 参考文献：

- [1] STK User'S Manual Version 5.0.1 for PCS[S]. Analytical Graphics, Inc. (AGI), 2002.
- [2] 张辉, 郝永杰. 基于 STK 的卫星星敏感器视场仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(7): 83-86, 94.
- [3] 张守玉, 姜振东. 基于 STK 的卫星轨道机动模型设计与仿真[J]. 计算机仿真, 2004, 21(10): 25-27, 72.
- [4] 戴俊. 基于 STK 的空间目标飞行可视化仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 12.
- [5] 廖瑛, 刘光明, 文援兰. 卫星星敏感器视场建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(z2): 38-40, 44.
- [6] 田瑞娟, 薛云波, 金丰护, 等. 基于多路双光模组的智能识别预警摄像机[J]. 兵工自动化, 2020, 39(4): 21-22, 34.
- [7] 黄少罗, 李思雨, 吴巍屹. 远程火箭炮武器系统故障模拟仿真研究[J]. 兵工自动化, 2021, 40(8): 70-73.
- [8] 王志刚, 施志佳. 远程火箭与卫星轨道力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 10.